



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**



## **Análise de Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido em Unidades Industriais**

**PAULO FERNANDO DE LEMOS OLIVEIRA**

**(Bacharelato em Engenharia Máquinas)**

**Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica**

**Orientadores:**

**Doutor João Manuel Ferreira Calado**

**Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques**

**Engenheiro João Davide Sabino**

**Júri:**

**Presidente: Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu**

**Vogais:**

**Doutor Carlos Augusto Santos Silva**

**Doutor João Manuel Ferreira Calado**

**Fevereiro 2018**





ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

## **Análise de Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido em Unidades Industriais**

**PAULO FERNANDO DE LEMOS OLIVEIRA**

(Bacharelato em Engenharia Máquinas)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor João Manuel Ferreira Calado

Mestre Nuno Paulo Ferreira Henriques

Engenheiro João Davide Sabino

Júri:

Presidente: Doutor António João P. da Costa Feliciano Abreu

Vogais:

Doutor Carlos Augusto Santos Silva

Doutor João Manuel Ferreira Calado

**Fevereiro 2018**

*“Somente quando a última árvore for cortada, o último rio for envenenado e o último peixe for pescado, nós vamos perceber que não podemos comer dinheiro.”*

*Pensamento Indígena Norte-Americano*

---

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar os meus sinceros agradecimentos vão para o Prof. Nuno Paulo Ferreira Henriques e Prof. João Davide Sabino, pela disponibilidade manifestada para a orientação deste trabalho e utilidade dos conselhos dados para a sua execução, por terem partilhado o seu, tão vasto, conhecimento nesta área de estudo e me ter orientado ao longo do percurso. Apenas, desta forma, foi possível alcançar os objectivos que nos propusemos no início deste trabalho.

Gostaria também de agradecer a todos os meus colegas do Mestrado pela excelente camaradagem e bons momentos que proporcionaram, especialmente ao meu amigo Especialista Eng<sup>o</sup> Carlos Sestelo que sempre têm demonstrado o seu apoio incondicional na elaboração/colaboração e sugestões dadas neste trabalho.

À minha Irmã, Carla Oliveira agradeço a paciência e apoio fiel no meu percurso académico.

Finalmente, um agradecimento muito especial aos meus pais, António Miguel Gomes e Virgínia Pinto Gomes, à minha esposa, Cláudia Patrícia Pinto Gomes e minhas filhas Beatriz Gomes Oliveira e Mariana Oliveira Pinto Gomes pelo incentivo e apoio constantes ao longo de todo este percurso académico e profissional, especialmente neste período de elaboração da Tese de Mestrado.

---

## Resumo

O ar comprimido é uma forma de energia largamente difundida na generalidade da indústria. Tem várias características que lhe conferem esta universalidade. É uma forma de energia que responde a inúmeras solicitações industriais: accionamento de sistemas pneumáticos, accionamento de ferramentas e bombas, transporte de substâncias, decapagem e pintura, oxigenação e agitação de meios, etc. Acresce a tudo isto o facto de o ar comprimido ser uma forma de energia limpa, segura e fácil de manusear, o que lhe permite ter um papel fundamental na maioria dos processos industriais. Porém, o reverso desta realidade é o facto de ser uma forma de energia com elevados custos. Vários estudos indicam que numa unidade fabril, cerca de 10% do consumo eléctrico é relativo à produção de ar comprimido, podendo mesmo chegar aos 30% em processos muito dependentes desta forma de energia. Paradoxalmente, os mesmos estudos dão conta que os sistemas de ar comprimido são frequentemente negligenciados, desconhecendo-se o enorme potencial de poupança energética.

Pretende-se assim, neste trabalho, abordar os sistemas de ar comprimido (SAC) nos seus diferentes sub-sistemas (produção, tratamento, armazenamento e distribuição), olhando-os individualmente e no seu todo, por forma a sensibilizar os diversos agentes para a contribuição potencial de medidas de melhoria energética e assim difundir as boas práticas nesta indústria.

Para levar a cabo um plano de melhoria de eficiência energética num SAC é importante identificar os pontos de melhoria recorrendo a uma auditoria, quantificar os seus benefícios e depois avaliar os investimentos envolvidos para a sua implementação. Sendo essa relação custo-benefício economicamente atractiva, as medidas de melhoria tem toda a legitimidade para serem implementadas.

Por último, é proposto uma nova abordagem de controlo de compressores electropneumáticos com vista à optimização de produção de ar comprimido.

**Palavras Chave:** Sistemas de Ar Comprimido (SAC); Auditorias Energéticas, Eficiência Energética.

---

## Abstract

Compressed air is a widespread form of energy in the general industry. It has several characteristics that give it this universality. It is a form of energy that responds to innumerable industrial demands: actuation of pneumatic systems, drive of tools and pumps, transport of substances, pickling and painting, oxygenation and agitation of means, etc. In addition to this, compressed air is a form of clean, safe and easy-to-handle energy, which allows it to play a key role in most industrial processes. However, the reverse of this reality is that it is a form of energy with high costs. Several studies indicate that in a plant, about 10% of the electrical consumption is related to the production of compressed air, and may even reach 30% in processes that are very dependent on this form of energy. Paradoxically, the same studies show that compressed air systems are often neglected and the enormous potential for energy savings is unknown.

The aim of this work is to discuss compressed air systems (SACs) in their different sub-systems (production, treatment, storage and distribution), looking at them individually and as a whole, in order to sensitize the various agents for the Energy improvement measures and thus disseminate good practice in this industry.

In order to carry out a plan to improve energy efficiency in a SAC, it is important to identify the points of improvement by means of an audit, to quantify its benefits and then to evaluate the investments involved in its implementation. As this cost-benefit ratio is economically attractive, the improvement measures have all the legitimacy to be implemented.

Finally, a new approach to the control of electro-pneumatic compressors is proposed with a view to optimizing the production of compressed air.

**Key words:** Compressed Air Systems (SAC); Energy Audit; Energy Efficiency.

---

# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	ii
Abstract.....	iii
Índice .....	iv
Índice de Figuras .....	vii
Índice de Tabelas .....	x
Acrónimos .....	xi
1. Introdução .....	1
1.1. Motivação e Enquadramento.....	2
1.2. Conceito de Energia .....	4
1.3. Fontes de Energia .....	5
1.4. Objectivo .....	6
1.5. Estrutura do Documento.....	7
2. Sistema de Ar Comprimido (SAC).....	8
2.1. Medidas de Eficiência Energética (MEE).....	8
2.2. Indicadores de Eficiência Energética (IEE) .....	15
2.2.1. Potência Específica.....	15
2.2.2. Consumo Específico .....	16
2.3. Estrutura de Custos de um SAC.....	18
3. Análise das Necessidades de Ar Comprimido.....	19
3.1. Levantamento de Perfil de Consumo .....	20
3.2. Medidas de Economia .....	21
3.2.1. Redução das Fugas .....	22
3.2.2. Sobre-pressurização da Rede.....	24
3.3. Recuperação de Energia .....	25

---

3.3.1. Controlo .....	28
3.3.2. Rede de Distribuição.....	34
3.3.3. Armazenamento .....	39
3.4. Redução dos Custos de Exploração de Centrais de Ar Comprimido.....	41
3.4.1. Optimização da Selecção de Compressores .....	41
3.5. Aspectos a Considerar na Selecção de Compressores de Parafuso.....	42
3.5.1. Performance dos Equipamentos.....	42
3.5.2. Consumo Específico de Compressores “package” SER “Specific Energy Requirement “ .....	44
4. Caso de Estudo .....	46
4.1. Descrição Sumaria do Sistema Ar Comprimido.....	46
4.2. Perfil Consumo de Ar Semanal /Produção.....	47
4.2.1. Análise do Perfil de Consumo Semanal .....	48
4.2.2. Análise do Perfil de Consumo Diário.....	49
4.2.3. Análise de caudais relativos .....	61
4.2.4. Análise de Pressões ao Longo da Rede .....	64
4.3. Análise dos Equipamentos Instalados .....	67
4.3.1. Análise dos Compressores .....	67
4.3.2. Horas de Operação no Período de Registo .....	70
4.3.3. Eficiência Global dos Compressores da Rede Geral .....	71
4.3.4. Consumos Anuais Estimados dos Compressores de Ar .....	72
4.4. Análise dos Secadores .....	73
4.4.1. Secadores de Refrigeração.....	73
4.4.2. Secador FD511 .....	74
4.4.3. Secador FD300 .....	74
4.4.4. Unidades de Filtragem.....	74
4.5. Síntese .....	75

---

4.5.1. Capacidade de Reserva .....	75
4.5.2. Gestão Eficiente do Grupo de Máquinas .....	76
4.5.3. Perdas de Carga na Central de Compressores .....	78
4.5.4. Configuração da Central de Ar Comprimido.....	79
4.5.5. Fugas na Instalação.....	79
4.5.6. Substituição dos Equipamentos Existentes.....	81
4.5.7. Sistema de Recuperação de Energia Térmica.....	82
4.5.8. Tabela Resumo de Poupanças .....	85
4.5.9. Investimentos.....	86
5. Nova Abordagem de Controlo.....	87
5.1. Escolha do Autómato .....	87
5.2. Descrição do Controlo.....	89
6. Conclusões.....	101
Bibliografia.....	a
ANEXOS.....	A

---

## Índice de Figuras

Figura 1.1 – Custo do Ciclo de Vida de uma Central de Ar Comprimido .....	1
Figura 1.2 – Sequência das transformações de Energia .....	6
Figura 2.1 – Repartição de Caudais .....	8
Figura 2.2 – Sistema de Ar Comprimido.....	9
Figura 2.3 – Cadeia do SAC.....	10
Figura 2.4 – Compressor .....	16
Figura 2.5 – Estrutura de Custos de um SAC.....	18
Figura 3.1 – Diagrama de Consumo ( KESS ) de um SAC.....	20
Figura 3.2 – Fases de uma Auditoria Energética.....	21
Figura 3.3 – Central de Ar Comprimido.....	21
Figura 3.4 – Sistema de Ar Comprimido.....	25
Figura 3.5 – Balanço Térmico de um Compressor Lubrificado .....	25
Figura 3.6 – Diagrama de Calor .....	26
Figura 3.7 – Sistema de Recuperação de Calor para Produção de Água quente com Canal de saída de Ar e Válvula Giratória Integrada.....	27
Figura 3.8 – Sistema de Recuperação de Calor para Produção de Água Quente .....	27
Figura 3.9 – Diagrama de Fluxo de Calor .....	27
Figura 3.10 – Curva de Potência Específica.....	29
Figura 3.11 – Controlo por Cascata e Controlo Centralizado .....	31
Figura 3.12 – Monitorização do Sistema.....	32
Figura 3.13 – Optimização da Exploração da Central de Compressores .....	33
Figura 3.14 – Rede de Distribuição .....	34
Figura 3.15 – Baixadas de Rede de Distribuição .....	36
Figura 3.16 – Perda de Carga em Tubagens.....	37
Figura 3.17 – Acessórios de Ar Comprimido.....	37
Figura 3.18 – Instalação de Ar Comprimido .....	38
Figura 3.19 – Reservatório de Ar Comprimido.....	40
Figura 3.20 – Perfil típico de Consumo Semanal.....	41
Figura 3.21 – Rotação do Compressor vs Capacidade de Armazenamento.....	43
Figura 3.22 – Rotação do Compressor vs Capacidade de Armazenamento.....	44
Figura 3.23 – Curva de um Elemento Compressor de Parafuso.....	45

Figura 4.1 – Esquema Simplificado da Rede e Medições Efectuadas.....	47
Figura 4.2 – Caudal e Pressão .....	47
Figura 4.3 – Caudal e Pressão no 1º dia de registo.....	50
Figura 4.4 – Registo A – Perfil de Operação de arranque da Instalação.....	50
Figura 4.5 – Caudal e Pressão no 2º dia de registo.....	51
Figura 4.6 – Registo B – Perfil de Operação entre as 09h00 e as 16h00 .....	52
Figura 4.7 – Registo C – Perfil de Operação na transição entre dia 09 e 10 de Dezembro .....	53
Figura 4.8 – Registo D – Perfil de Operação entre as 00h00 e as 08h00 .....	53
Figura 4.9 – Caudal e Pressão no 3º dia de registo.....	54
Figura 4.10 – Caudal e Pressão no 4º dia de registo.....	55
Figura 4.11 – Registo E – Período de Maior Consumo.....	55
Figura 4.12 – Registo E – Período de Maior Consumo ( Zoom ) .....	56
Figura 4.13 – Registo F – Paragem da Produção Semanal.....	57
Figura 4.14 – Caudal e Pressão no 5º dia de registo.....	57
Figura 4.15 – Caudal e Pressão no 6º dia de registo.....	58
Figura 4.16 – Registo G – Arranque da Instalação.....	58
Figura 4.17 – Caudal e Pressão no 7º dia de registo.....	59
Figura 4.18 – Perfil de Operação dos Compressores 7º dia de registo.....	60
Figura 4.19 – Perfil de Operação dos Compressores 7º dia de registo ( Zoom ).....	60
Figura 4.20 – Perfil de Consumo por Linha .....	61
Figura 4.21 – Período somente da Linha do FD 300.....	62
Figura 4.22 – Período somente da Linha do FD 511 .....	62
Figura 4.23 – Perfis de Consumo Linha do PET.....	63
Figura 4.24 – Pressões na Rede .....	64
Figura 4.25 – Pressões Período da Produção 1.....	65
Figura 4.26 – Pressões Período da Produção 1( Zoom ) .....	65
Figura 4.27– Pressões Período da Produção 2.....	66
Figura 4.28 – Pressões Período da Produção 2 ( Zoom ) .....	66
Figura 4.29 – Compressor ZR .....	67
Figura 4.30 – Gráfico de Eficiência do Compressor ZR3 .....	68
Figura 4.31 – Gráfico de Eficiência do Compressor ZR132 .....	69
Figura 4.32 – Número de horas dos Compressores .....	70
Figura 4.33 – Diagrama de Fluxo de um Secador de Refrigeração.....	73

---

Figura 4.34 – Ilustração de um Sistema de um Compressor em espera .....	76
Figura 4.35 – Ilustração de um Sistema de Gestão.....	76
Figura 4.36 – Ilustração de zona óptima de funcionamento de compressores VSD .....	77
Figura 4.37 – Ilustração de Grupo de Máquinas mais Eficiente .....	77
Figura 4.38 – Exemplo de Secagem antes dos Reservatórios .....	79
Figura 4.39 – Caudal estimado no dia 7 antes da paragem dos compressores e respetivo circuito de refrigeração .....	80
Figura 4.40 – Caudal medido antes da paragem de fim-de-semana.....	80
Figura 4.41 – Compressor com Unidade de Recuperação Térmica .....	83
Figura 4.42 – Ilustração de um Esquema de Recuperação Térmica.....	83
Figura 5.1 – Exemplo de um Sistema de Supervisão e controlo (SCADA usando Controladores PLC .....	87
Figura 5.2 – Constituição básica do S7-1200.....	88
Figura 5.3 – Exemplo de Perfil de Caudal .....	89
Figura 5.4 – Sistema de vários Compressores comandado por um Controlador Principal .....	90
Figura 5.5 – Representação das Combinações dos Compressores .....	91
Figura 5.6 – Sistemas de Controlo On/Off.....	91
Figura 5.7 – Sistema de Controlo de Compressores bem dimensionados.....	92
Figura 5.8 – Caudal e Eficiência de um sistema de controlo bem dimensionado.....	93
Figura 5.9 – Representação Esquemática da Central de Ar Comprimido.....	93
Figura 5.10 – Comportamento do Consumo na Utilização ou não de um Sistema de Monitorização.....	95
Figura 5.11 – Fluxograma das Condições de Funcionamento.....	96

---

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Medidas de Melhoria em SAC .....	11
Tabela 2.1 – Custos de Energia de um SAC .....	18
Tabela 3.1 – Qualidade do Ar segundo ISO 8573-1:2010 .....	19
Tabela 3.2 – Caudais de Fuga em Função do Diâmetro vs Custos .....	22
Tabela 3.3 – Energia Recuperável ( Tipo de Compressor/meio de Arrefecimento/meio a aquecer ) .....	28
Tabela 3.4 – Regime de Funcionamento ( Caudal vs Potência ).....	29
Tabela 3.5 – Perdas de Carga .....	37
Tabela 3.6 – Perda de Carga Recomendáveis do compressor até Entrada do Ponto de Consumo.....	38
Tabela 4.1 – Poupanças Anuais Estimadas .....	85
Tabela 4.2 – Investimentos.....	86
Tabela 5.1 – Combinações de Compressores de base e a Capacidade de incremento entre Combinações .....	92

---

## **Acrónimos**

$C_E$  – Consumo Específico

$CO_2$  – Dióxido de Carbono

$d$  – Diâmetro interno da tubagem

$E_{\text{anual}}$  – Energia Anual

$E_{\text{consumida}}$  – Energia Consumida

$E_{\text{final}}$  – Energia Final

$E_{\text{primária}}$  – Energia Primária

$E_{\text{secundária}}$  – Energia Secundária

$E_{\text{útil}}$  – Energia Útil

FAD – Free Air Delivery

FBD – Function Block Diagram

FC – Factor de Carga

FRL – Filtração, Regulação e Comprimento Linha

GEE – Gases com Efeito de Estufa

HMI – Human Machine Interface

HR – Humidade Relativa

IEE – Indicadores de Eficiência Energética

I/O – Input/Output

L – Comprimento equivalente

$NO_x$  – Óxidos de Azoto

P – Potência

$p$  – Pressão

$p_v$  – Pressão de Vapor

$P_E$  – Potência Específica

$P_T$  – Potência Total

$P_{TC}$  – Potência Total Consumida

---

PDP – Ponto de Orvalho  
PET – Polyethylene Terephthalate  
P&ID – Piping and Instrumentation Diagram  
PLC – Programmable Logic Controller  
 $p_{\text{máx}}$  – Pressão máxima  
 $p_{\text{inicial}}$  – Pressão Inicial  
 $p_{\text{final}}$  – Pressão Final  
 $\Delta p$  – Perda de Carga Máxima Admissível  
Q – Caudal  
Qa – Caudal Armazenado  
Qa – Caudal Armazenado  
Qf – Caudal de Fugas  
Qp – Caudal Produzido  
Qa – Caudal Armazenado  
RAC – Regulamentação de Ar Comprimido  
 $\eta$  energético – Rendimento Energético  
SAC – Sistemas de Ar Comprimido  
SER – Specific Energy Requirement  
SFC – Sequential Function Chart  
SO<sub>x</sub> – Óxidos de Enxofre  
t – Tempo  
 $t_{\text{TM}}$  – Tempo Total de Medição  
 $t_{\text{C}}$  – Tempo de Carga  
T – Temperatura  
TIA Portal – Totally Integrated Automation Portal  
URE – Utilização Racional de Energia  
V – Volume  
VSD – Unidade de Velocidade Variável

## 1. Introdução

Nos dias de hoje, em que as questões ambientais assumem um papel preponderante no desenvolvimento industrial em todo o mundo, torna-se necessário otimizar as instalações industriais, com vista à redução dos consumos energéticos. Cerca de 99% dos processos de fabrico industriais recorrem ao ar comprimido como um tipo de energia, a par da energia eléctrica ou hidráulica. Deste modo grande parte das fábricas têm uma central de produção e tratamento de ar comprimido composta por vários compressores em paralelo. No ciclo de vida de uma central de ar comprimido, o seu consumo energético representa cerca de 80% do seu custo total de exploração.

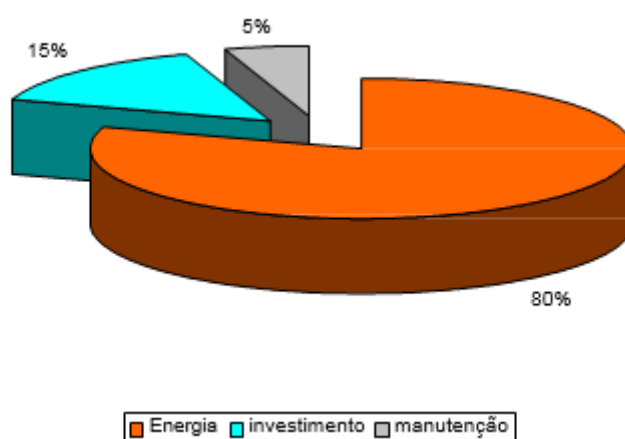


Figura 1.1 Custo do ciclo de vida de uma central de Ar Comprimido [1].

O ar comprimido é uma forma de energia ou vector de transporte de energia largamente difundida na generalidade da indústria. É uma *utility*, no sentido em que estamos perante um produto básico de utilidade geral, do qual, de forma geral, depende o processo produtivo. É uma forma de energia que responde a uma multiplicidade de solicitações industriais: accionamento de sistemas pneumáticos, accionamento de ferramentas e bombas, transporte de substâncias, decapagem e pintura, oxigenação e agitação de meios, sopro de limpeza e arrefecimento, entre outras. Acresce a tudo isto, o facto do ar comprimido ser uma forma de energia limpa, segura, fácil de manusear e armazenável, o que lhe permite ter um papel fundamental na maioria dos processos industriais.

Deste modo, o ar comprimido é um grande consumidor de energia e a forma de energia mais cara que podemos encontrar numa empresa ou unidade fabril. Auditorias

---

energéticas indicam que numa unidade produtiva, o ar comprimido representa mais de 10% do consumo eléctrico, podendo mesmo chegar aos 30% em processos mais dependentes desta forma de energia. Sendo a central de ar comprimido um dos principais consumidores de energia eléctrica numa instalação fabril, torna-se importante a optimização da sua exploração. A diminuição dos custos energéticos da central de ar comprimido reflecte-se directamente na diminuição do custo de produção fabril aumentando a competitividade das empresas no mercado.

A optimização de exploração de uma central de ar comprimido obtém-se actuando em diversas áreas, entre as quais se destacam as seguintes:

- Optimização da selecção de compressores
- Utilização de sistemas de tratamento de ar comprimido de elevada eficiência
- Sistemas de controlo e optimização de funcionamento de compressores
- Dimensionamento de redes de ar comprimido
- Eliminação de fugas na rede de ar comprimido
- Recuperação de Energia térmica ou recuperação de calor

## **1.1. Motivação e Enquadramento**

A energia é, sem dúvida, uma das grandes preocupações da nossa sociedade, não só pela forma como dependemos do seu uso, como também pelo impacto ambiental, económico e social que causa. Ao longo dos últimos anos tem havido uma crescente consciencialização nesta matéria e, por isso, vários têm sido os esforços dos governos no estabelecimento de limites para as emissões de poluentes e fomentar o uso de energia sustentável a partir de fontes limpas e renováveis. Mesmo com uma elevada penetração de energias renováveis no mix energético, estas não estão sincronizadas com o consumo de energia eléctrica e, por isso, a queima de combustíveis fósseis para a produção de energia eléctrica continua a ser indispensável. Segundo a agência internacional de energia [2], a procura mundial das várias classes de carvões vai continuar a aumentar devido à disponibilidade e reduzido custo deste recurso, principalmente em alguns países como a China, os Estados Unidos da América, a Índia e a Turquia, entre outros [3].

A queima de combustíveis fósseis resulta na libertação de espécies para a atmosfera, tais como, óxidos de azoto (NO<sub>x</sub>) e óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), que são responsáveis por

---

vários danos no nosso ecossistema. A emissão de CO<sub>2</sub> é a principal contribuição para o aumento dos gases com efeito de estufa (GEE). Neste contexto, é esperado que nas próximas décadas se adoptem tecnologias em centrais termoelétricas que permitam uma elevada eficiência na produção de energia a partir do carvão. Uma estratégia prudente é a captura e sequestro de CO<sub>2</sub> nas centrais alimentadas a carvão já existentes. Esta tecnologia tem sido amplamente divulgada como um método promissor para o controlo das emissões de GEE [4,5].

O contexto económico actual, a pressão por resultados financeiros, juntamente com a ameaça do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a constante elevação dos preços da energia e as preocupações ambientais, levam-nos à utilização da energia de uma forma mais consciente. Nesse sentido, a energia está a ser considerada um factor de produção tão importante quanto o capital, a mão-de-obra ou a matéria-prima. As empresas estão cada vez mais a desenvolver e a implementar programas de optimização e gestão energética, como uma solução para os problemas de consumos actuais, combater as alterações climáticas e manter-se competitivas no mercado.

O tema da presente dissertação é a Análise de Eficiência dos Sistemas de Ar Comprimido em Unidades Industriais de uma Unidade Fabril da qual o autor é o responsável pela gestão e manutenção. Acções deste tipo visam a redução dos consumos energéticos dos processos ou edifícios (comerciais ou de serviços) e são, por sua vez, ferramentas essenciais a um Desenvolvimento Sustentado pois:

- Permitem uma optimização dos processos, redução das facturas energéticas, aumento da competitividade das organizações e, por vezes, redução do impacte ambiental;
- A nível nacional, um eventual benefício na redução da “dívida externa” pela aquisição de Energia Primária, uma vez que Portugal não tem reservas a serem exploradas e o “mix” energético é, como se sabe, constituído maioritariamente por combustíveis fósseis. A evolução da política energética nas últimas décadas e a avançada idade de grande parte do parque industrial e dos edifícios existentes, faz com que as actividades de Reabilitação Energética possam desempenhar um papel importante na redução da dependência externa.
- Permitem a redução de emissões de gases poluentes (gases com efeito de estufa, gases que deterioram a camada de ozono, gases que provocam chuvas ácidas).

---

De facto, a gestão da energia é necessária para permitir traçar directrizes que conduzam à redução dos desperdícios energéticos que ocorrem não só devido às limitações dos processos tecnológicos, mas também por descuido dos consumidores e outras deficiências inerentes à falta de manutenção dos equipamentos. Um dos primeiros passos para uma posterior redução do consumo energético é a correcta quantificação da energia consumida. O processo de medição das formas de energia envolvidas num dado processo fabril permitirá obter uma visão global da situação energética desse mesmo processo. É necessário encontrar um uso adequado para a energia rejeitada de processo de fabrico, muito antes de ser considerado qualquer outro processo de recuperação de energia. Na realidade, não faz sentido investir recursos no estudo e concepção de um dado sistema de recuperação de energia se, no final, se concluir que não existe uma utilização adequada para a energia economizada. De notar que aparentes reduções nos custos de energia poderão implicar custos adicionais noutros sectores fabris, inviabilizando economicamente o processo.

Ao identificar e caracterizar os principais consumidores de energia numa indústria ou processo torna-se possível estudar medidas que possam conduzir a uma maior eficiência energética.

## **1.2. Conceito de Energia**

A energia está presente na nossa vida de diversas maneiras. Quando, por exemplo, usamos motores ou músculos, acendemos o queimador de um fogão, nos alimentamos ou ainda nos informamos pela televisão ou pelos jornais que frequentemente se referem a alguma questão energética em Portugal ou no mundo. Por tal diversidade, o campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até aos aspectos relacionados com o desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem que considere apenas os temas de carácter técnico ou envolva os seus componentes sócio-económicos e ambientais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras. Para este largo campo do saber, procura-se nestas notas efetuar uma revisão das definições, das leis básicas e da terminologia empregada, em particular procurando fundamentar a racional utilização dos fluxos de energia.

Potência é a velocidade na qual a energia é produzida ou consumida, sendo um conceito importante ao se tratar de processos humanos e económicos, onde o tempo é essencial.

---

Por exemplo, um motor elétrico de 1 kW que funcione durante dez horas consome a mesma energia que um motor de 10 kW durante uma hora, mas permitem obter efeitos muito diferentes.

Em princípio, qualquer capacidade instalada poderia atender qualquer necessidade de energia, desde que lhe seja dado tempo suficiente, o que evidentemente não atende às necessidades impostas pela realidade. Por isso, podemos afirmar que a sociedade moderna, que procura atender às solicitações energéticas de forma rápida, é tão ambiciosa em potência quanto em energia. Para explorar um pouco mais estes conceitos, podíamos pensar nos nossos usos diários de energia e verificar se para os atendermos o tempo importa ou não. Será imediato verificar que a taxa de utilização dos fluxos energéticos é tão importante quanto sua mera disponibilidade.

### **1.3. Fontes de Energia**

A fonte de energia primária, também conhecida por fonte de energia natural, existe na natureza e pode gerar energia de forma directa. São exemplo disso o carvão mineral, o petróleo, o gás natural, a energia hídrica, solar e eólica, a biomassa, oceânica e geotérmica.

As fontes primárias de energia podem classificar-se em renováveis e não renováveis. As primeiras são uma infinita fonte geradora, mesmo quando utilizadas pelo homem, possuindo a capacidade de se regenerar naturalmente. Quanto às segundas, como o combustível petroquímico, são formadas no subsolo a partir de restos de animais e plantas que demoraram milhões de anos até se transformarem em combustível. Estas não podem ser recuperadas rapidamente e as suas quantidades tornam-se cada vez mais reduzidas com o consumo por parte do homem.

As fontes secundárias de energia são resultantes da transformação parcial dos recursos primários, por meio físico, químico ou bioquímico. São elas a electricidade, a gasolina, o óleo diesel, o carvão mineral, o óleo combustível, o gás e querosene, entre outras.

A energia final designa a energia tal como é recebida pelo utilizador nos diferentes sectores, seja na forma primária ou secundária. A forma como se apresenta a energia final depende do tipo de energético que lhe deu origem. Pode ser um tanque de óleo, uma botija de gás, uma linha de distribuição ou uma tomada de força, não passando mais por transformações, apenas modificações técnicas e comerciais.

A forma de energia útil corresponde à energia efectivamente utilizada e aparece geralmente como calor, frio, força motriz, iluminação e as combinações destes.

Na Figura 1.2 pode-se observar a sequência de transformações de energia e todas as formas que esta adquire até chegar a energia útil.



Figura 1.2 – Sequência das Transformações de Energia.

## 1.4. Objectivo

O objectivo para a elaboração deste trabalho é estudar os sistemas de ar comprimido (SAC) nos seus diferentes sub-sistemas: Produção, Tratamento, Armazenamento e Distribuição, por forma a sensibilizar os diversos agentes para a contribuição potencial de medidas de melhoria energética, difundir as boas práticas e custos envolvidos neste tipo de energia e identificar pontos de melhoria para otimizar os sistemas. O objectivo desta dissertação é determinar o perfil da central de ar comprimido, no que diz respeito aos seus compressores, avaliando as potências consumidas e procurando soluções mais económicas, que permitam melhorar a eficiência energética na produção de ar comprimido. Neste âmbito, definiram-se os seguintes procedimentos:

- Identificar o perfil de consumo de ar comprimido na instalação;
- Analisar regime de funcionamento dos compressores;
- Quantificar as reservas de produção de ar comprimido em relação ao perfil de consumo existente; e
- Com base na análise dos dados, propor eventuais melhorias que conduzam à obtenção de poupanças energéticas.

Muitos são os pressupostos realizados à volta das necessidades e custos do ar comprimido, relativamente aos ambientes de trabalho atuais. Por forma a eliminar todas estas conjeturas e suposições, utilizou-se um conjunto de ferramentas para fornecer o seguinte:

- Os dados adquiridos, são processados no software “AirScan <sup>TM</sup>” o que permite obter o perfil de consumo da instalação, o regime de funcionamento do(s) compressor(es), retirar valores e construir os Indicadores de Eficiência

---

Energética (IEE). Permite igualmente avaliar o comportamento da instalação nos diferentes regimes de consumo. Todo este diagnóstico bem como a informação obtida são imprescindíveis na avaliação/recomendação das Medidas de Eficiência Energética (MEE).

- O software AirScan™ permite efectuar simulações quanto à forma como o sistema de ar comprimido se poderá comportar com a introdução da mais recente tecnologia em compressores, tais como, unidades de velocidade variável (VSD) ou sistemas de gestão e controlo, que com algoritmos avançados possibilitam obter economias energéticas significativas.

## **1.5. Estrutura do Documento**

O presente documento está organizado em seis capítulos, existindo também informações na forma de anexo, no final do documento.

No presente capítulo descreve-se, de uma maneira introdutória, o contexto e temática e seus principais objectivos.

A seguir, e para que o leitor compreenda melhor a situação actual, a necessidade de mudança e a motivação para a criação deste tema, o capítulo dois apresenta um panorama dos sistemas de Ar Comprimido. Descrevem-se também conceitos sobre Eficiência Energética e da Gestão de Energia desenvolvendo problemáticas, metodologias, ferramentas e estratégias para alcançar a redução do consumo energético.

O capítulo três descrevem-se as necessidades de Ar Comprimido, as suas medidas de economia, bem como, a redução de custos de exploração de centrais de Ar Comprimido.

O capítulo quatro é dedicado ao estudo de caso, onde é realizada uma descrição energética da organização modelo de estudo, uma análise sobre os consumos e um levantamento das oportunidades de melhoria.

O capítulo cinco apresenta-se uma nova abordagem de controlo em centrais de ar comprimido.

Por último, o capítulo seis apresenta as principais conclusões obtidas na realização do trabalho, as medidas a serem adoptadas para alcançar o objectivo de reduzir o consumo e as perspectivas para o futuro.

---

## 2. Sistema de Ar Comprimido (SAC)

### 2.1. Medidas de Eficiência Energética (MEE)

O processo de compressão do ar é, desde logo, ineficiente pela própria natureza do ar. Ao ser comprimido, o ar aquece e tende a expandir. Este aquecimento degrada o rendimento termodinâmico do ciclo de compressão e coloca a temperatura dos órgãos mecânicos na ordem dos 96%. Devido á limitação térmica dos materiais, é necessário retirar mais de 80% da energia sob a forma de calor, para que o compressor possa funcionar em níveis de temperatura toleráveis. Os restantes elementos do sistema são também eles fontes de ineficiência, no caso o tratamento e a distribuição, devido à perda de carga e as fugas.

Paralelamente, conforme se pode verificar figura 2.1, estima-se que só 50% do ar produzido é devidamente utilizado, sendo que, aproximadamente 40% do caudal de ar produzido é desperdiçado em caudal de fugas e caudal desregulado. Os restantes 10% são utilizações que poderiam ser satisfeitas com ar proveniente de sopradores ou através de outra forma de energia mais eficiente para a utilização em causa.

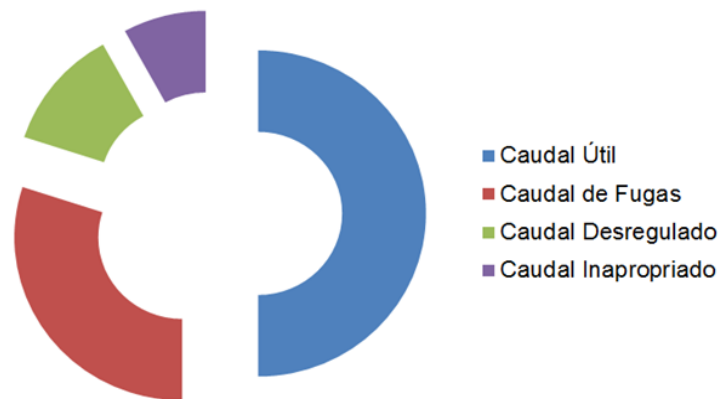


Figura 2.1 Repartição de Caudais.

Um sistema de ar comprimido (SAC) é composto por quatro elementos distintos: produção, tratamento, armazenamento e distribuição, existindo entre eles uma relação de complementaridade e de forte interdependência. Neste sentido, o desempenho de um SAC depende em primeira instância do desempenho de cada elemento.

Um outro aspecto prende-se com o facto de uma ineficiência num determinado ponto do sistema poder potenciar ineficiências nos restantes, comprometendo deste modo a eficiência global do sistema.

A conjugação destas duas realidades faz do ar comprimido uma forma de energia dispendiosa, pelo que, obter melhorias de desempenho tanto pela via da eficiência como pela via da redução do desperdício são opções técnicas e economicamente justificáveis.

O objectivo de um SAC é entregar ar comprimido aos seus diferentes consumidores nas condições de caudal (mássico ou volúmico, em função do solicitado) e pressão requeridos, com a qualidade de ar exigida dependendo da sua aplicação. Terá obviamente como pano de fundo, a preocupação energética, procurando sempre menores níveis energia para o sistema.

Um sistema de ar comprimido integra então quatro elementos fundamentais produção, tratamento, armazenamento e distribuição.

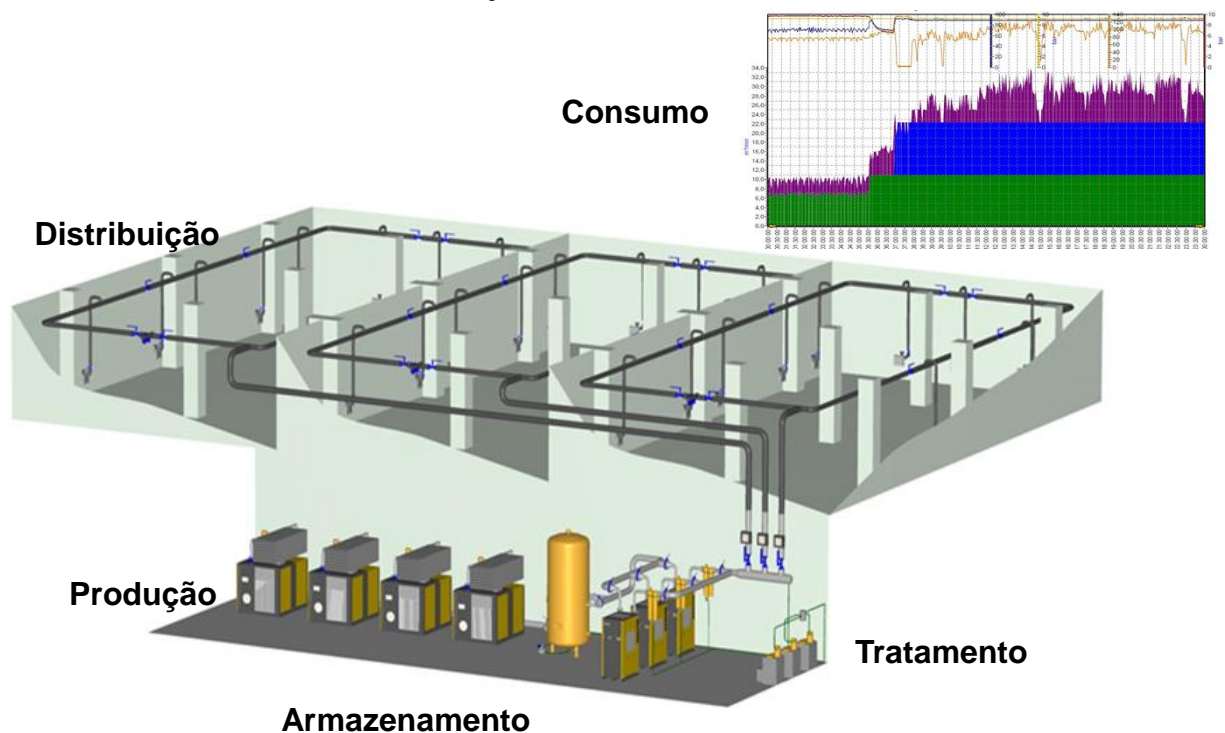


Figura 2.2 Sistema de Ar Comprimido completo (Extraído) (Manual 2016) [9].

Esta característica faz da eficiência energética um conceito transversal, onde coexiste, simultaneamente, um plano de avaliação individual, elemento a elemento, e um plano de avaliação colectivo, como resultante da conjugação dos diferentes elementos.

Elementos secundários, como a ventilação da central de compressores, a qualidade do ar de admissão/arrefecimento, a rede de condensados e o cabal cumprimento do plano de manutenção para os diferentes equipamentos, são também imprescindíveis nesta lógica de eficiência.

Recorrendo à noção de cadeia de eficiência, podemos representar o SAC através de um conjunto de actividades primárias e de actividades de suporte, interligadas entre si e com um objectivo comum (Figura 2.3).

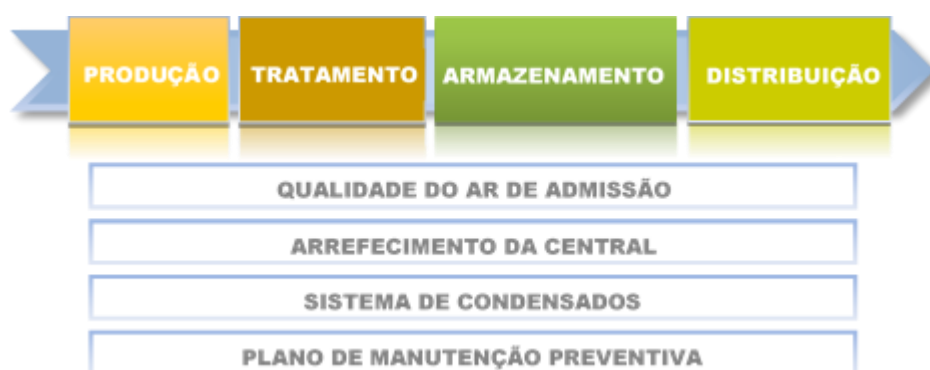


Figura 2.3 Cadeia do SAC (Adaptado) (2016) [6].

Conceptualmente, o consumo é aqui tido como uma variável exógena. Todavia, é uma perturbação do sistema caudal em função da pressão, já que condiciona o comportamento do sistema numa lógica de causa-efeito.

Um outro aspecto que decorre desta natureza sistémica prende-se com o facto de uma ineficiência num determinado elemento do sistema poder potenciar ineficiências nos restantes, condicionando e comprometendo em larga medida a eficiência global do sistema. Neste âmbito, e segundo a publicação da Compressed Air Challenge [6] existem significativas ineficiências nos SAC, podendo-se alcançar poupanças energéticas da ordem dos 20 - 50% com a implementação de medidas de melhoria. No mesmo sentido Radgen [7] estima que os SAC na União Europeia tenham um potencial de poupança entre os 5 - 50% e hierarquiza diferentes medidas de melhoria, quantificando-as quanto à contribuição potencial de poupança:

1 <sup>a</sup>	Redução de Fugas	16,0%
2 <sup>a</sup>	Reformulação do Sistema	4,5%
3 <sup>a</sup>	Recuperação de Calor	4,0%
4 <sup>a</sup>	Velocidade Variável	3,8%

Tabela 1.1 - Medidas de Melhoria em SAC (Extraído) (Radgen) [7].

<b>Medidas de Economia de Energia</b>	<b>Ganhos<sup>1</sup> (%)</b>	<b>Aplicabilidade<sup>2</sup> (%)</b>	<b>Contribuição Potencial<sup>3</sup> (%)</b>
<b>Instalação ou Renovação do Sistema</b>			
Melhoria dos accionamentos (substituição de motores convencionais por motores de alto rendimento)	25	2	0,5
Utilização de variadores electrónicos de velocidade	25	15	3,8
Melhoria do compressor	30	7	2,1
Utilização de sistemas de controlo sofisticados e precisos	20	12	2,4
Recuperação de calor para outras utilizações	20	20	4,0
Melhoria dos sistemas de arrefecimento, secagem e filtragem	10	5	0,5
Concepção geral do sistema, incluindo sistemas multipressão	50	9	4,5
Redução das perdas de carga	50	3	1,5
Optimização dos equipamentos utilizadores finais de ar comprimido	5	40	2,0
<b>Operação e Manutenção do Sistema</b>			
Redução das fugas de ar comprimido	80	20	16,0
Maior frequência na substituição dos filtros	40	2	0,8

(1) % de economia do consumo energético anual

(2) % de sistemas em que a medida é aplicável e viável economicamente

(3) Contribuição potencial (%) = Ganhos (%) x Aplicabilidade (%)

As auditorias, dão também indicação de um enorme potencial de poupança energética com a aplicação de simples medidas de melhoria e recomendações para uma boa gestão deste recurso:

- Desligar o compressor nos períodos de paragem, como pausa para refeições, períodos de não laboração, etc.

- 
- Produzir o ar comprimido a uma pressão mínima de laboração, uma vez que os consumos energéticos aumentam quase proporcionalmente com a pressão.
  - Escolher um compressor de ar correctamente dimensionada para as necessidades do processo.
  - Garantir que o ar aspirado pelo compressor é limpo e frio.
  - Os compressores são equipamentos, que por natureza, tem uma baixa eficiência, apenas 4-5% da energia eléctrica consumida é “transformada” em energia “útil”. O restante é essencialmente para refrigeração do equipamento. Em grandes equipamentos a refrigeração é feita com água. O ar quente (40-60°C) e água quente (40-80°C), pode ser utilizada em processos secundários, como aquecimento ambiente, pré-aquecimento do ar de queima de combustão, águas quentes sanitárias, Pré-aquecimento de água, para utilização em caldeiras, etc.
  - A manutenção periódica do compressor (limpeza de grelhas, filtros, lubrificação, etc.) é também essencial para um funcionamento perto dos valores de fábrica.
  - A eliminação de todas as fugas detectáveis é imprescindível para a redução do consumo energético.
  - Evitar velocidades de escoamento do ar, superiores a 6 m/seg, utilizando, para esse efeito, diâmetros de tubagem dimensionados com folga suficiente; este sobredimensionamento da tubagem, para além de garantir menores perdas de carga, permite também, fazer face a um eventual aumento de consumo de ar na instalação.
  - Evitar o mais possível, curvas e outros acidentes no traçado da rede.
  - Nos troços rectos, adoptar uma inclinação apropriada, que permita o escoamento da água condensada na tubagem; para isso, deverão também instalar-se purgadores, nos pontos mais baixos da rede, e proceder, regularmente, à verificação do correcto funcionamento destes dispositivos.
  - Remover, ou isolar convenientemente com válvula (ou tampão), eventuais troços da rede de distribuição, que deixaram de ser utilizados.
  - Da mesma forma, se numa instalação existirem determinadas zonas e/ou sectores, com um regime de laboração inferior ao que se regista nas restantes áreas da fábrica, dever-se-ão instalar válvulas, que permitam isolar a rede de distribuição de ar aquelas zonas, nos seus períodos de paragem.
  - Instalar, preferencialmente, uma rede de distribuição de ar com desenvolvimento em anel; esta solução, contrariamente à rede simples, permite repartir o caudal

---

por diversos troços, resultando em menores velocidades médias de escoamento (e, conseqüentemente, em menores perdas de carga).

- Evitar redes de distribuição demasiado longas; em muitos casos, quando é necessário alimentar com ar comprimido locais bastante afastados, a solução mais económica, consiste em adoptar uma produção de ar descentralizada, isto é, instalar compressores mais pequenos, junto às áreas de consumo, em detrimento duma única unidade, de grande capacidade, para toda a instalação.
- Verificar regularmente, o correcto funcionamento dos equipamentos e ferramentas pneumáticas, e cumprir os prazos de manutenção recomendados.
- Regular a pressão de trabalho em função da utilização; o recurso a eventuais válvulas reductoras de pressão, localizadas junto dos utilizadores, traduz-se sempre por uma economia de energia, a par duma melhoria na segurança de manuseamento. (Um caso típico, são as pistolas pneumáticas usadas para limpeza e/ou secagem de materiais ao longo do processo, equipamentos que, normalmente, trabalham com uma pressão de ar demasiado elevada, contribuindo para grandes desperdícios de energia; nestes casos deverão ser ensaiadas pressões de trabalho mais baixas (mantendo o nível de satisfação desejado) pois, por exemplo, uma pistola regulada a 1.4 bar, consome um terço do ar, que uma outra que labora a 6.2 bar.)
- Instalar electroválvulas nos equipamentos principais consumidores de ar, por forma a isolá-los convenientemente, quando os mesmos se encontram fora de serviço.
- Caso existam na instalação, operações que exijam grandes caudais de ar instantâneo (tipo descarga), de forma descontínua, instalar junto a estes consumidores, depósitos de ar (com uma capacidade adequada à operação) dotados de válvula de enchimento lento. Esta solução tem inúmeras vantagens, como seja: evitar o sobredimensionamento dos compressores, reduzir as perdas de carga, evitar flutuações indesejáveis de pressão na rede de ar, etc..
- Procurar analisar se a utilização do ar comprimido se justifica em todas as situações, isto é, se não há outras "formas de energia", de menor custo, igualmente aplicáveis a determinada operação; a título de exemplo, refere-se o caso das operações de sopragem em que, muitas vezes, é possível recorrer a um

---

simples ventilador de alta pressão, em substituição do ar comprimido, opção bastante mais económica.

Em seguida, resumem-se algumas das medidas de eficiência energética que serão possíveis de implementar num SAC:

### **1) Via Racionalização do Consumo**

- **Redução do índice de fugas**

  - Plano de Redução de Fugas

  - Purgas sem perda de ar

  - Isolar troços/equipamentos nos períodos de não produção

- **Redução do Caudal Desregulado**

  - Instalação de reguladores de pressão

- **Eliminar Usos Inapropriados**

  - Sopro de limpeza

  - Sopro de secagem

  - Sopro de arrefecimento

  - Transporte de substâncias

  - Agitação de meios

### **2) Via Optimização do Sistema (Aumento da Eficiência)**

- **Produção**

  - Compressores Ajustados ao Consumo

  - Potência Específica do Compressor

  - Tipo de Regulação

  - Sistema de gestão Centralizado

  - Redução da pressão de descarga

  - Recuperação de energia

- **Tratamento**

  - O exigível face aos requisitos de qualidade de ar

- **Armazenamento**

  - Garantia de capacidade de armazenamento

- **Rede de Distribuição**

  - Tipologia (Traçado da Rede)

  - Geometria (Secção e Singularidades)

---

## 2.2. Indicadores de Eficiência Energética (IEE)

### 2.2.1. Potência Específica

É o indicador chave e comumente utilizado para avaliar o desempenho energético de um compressor ou de um conjunto de compressores. É uma característica intrínseca do equipamento e reflecte o grau de perfeição com que a máquina se propõe a executar o seu propósito: comprimir ar a uma determinada pressão acima da atmosférica. Este indicador exprime-se pelo quociente entre duas grandezas, a potência e o caudal.

$$P_E = \frac{P_{TC}}{Q} \quad (2.1)$$

onde:

$P_E$  – Potência Específica [kW/(m<sup>3</sup>/min)];

$P_{TC}$  – Potência Total Consumida [kW];

$Q$  – Caudal [m<sup>3</sup>/min].

Contudo, é necessário especificar estas duas variáveis, bem como as condições em que são medidas. A norma ISO 1217 e respectivos anexos, estabelecem as condições de teste para os compressores de parafuso, sendo o anexo C aplicável a compressores de parafuso de carga/vazio e o anexo E aplicável a compressores de parafuso de velocidade variável. A norma ISO 1217 considera a potência eléctrica total medida aos bornes do compressor e o caudal medido à boca de descarga da máquina Free Air Delivery (FAD). Posteriormente, este volume sob pressão é convertido num volume de ar livre, às condições ambiente verificadas na admissão do compressor. A norma sugere uma temperatura ambiente de 20°C, temperatura do meio de arrefecimento de 20°C, humidade relativa de 0% e uma pressão atmosférica de 1 bar (abs) para caracterizar o volume de ar livre.



Figura 2.4 Compressor (Adaptado) ( Manual kaiser 2016) [9].

Aplicando a equação dos gases perfeitos, podemos chegar à seguinte expressão para obter um caudal normalizado FAD.

$$V_1 = \frac{V_2 \times p_2 \times T_1}{[p_1 - (p_v \times HR)] \times T_2} \quad (2.2)$$

onde:

$V_1$  – Volume de Ar [m<sup>3</sup>];

$p_1$  – Pressão Ambiente [bar];

$T_1$  – Temperatura Ambiente [°C];

$HR$  – Humidade Relativa [%];

$V_2$  – Volume de Descarga [m<sup>3</sup>];

$p_2$  – Pressão de Descarga [bar];

$p_{vapor}$  – Pressão de Vapor [bar].

### 2.2.2. Consumo Específico

O consumo específico é o parâmetro usado por excelência para comparações energéticas. No fundo corresponde à energia necessária para comprimir 1 m<sup>3</sup> de ar a uma determinada pressão. Pode ser calculado por:

---

$$C_E = \frac{P_T \times t}{V} \quad (2.3)$$

onde:

$C_E$  – Consumo Específica [kWh/m<sup>3</sup>];

$P_T$  – Potência Total [kW];

$t$  – Tempo [horas];

$V$  – Volume [m<sup>3</sup>].

O consumo específico também pode ser dado em J/l, sendo a relação com kWh/m<sup>3</sup> a seguinte:

$$\frac{\text{kW.h}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J/l}}{3600}$$

Apresentado deste modo, o consumo específico é o conceito ideal para fazer comparativos energéticos entre diferentes compressores, funcionando à mesma pressão, ou para avaliar consumos do mesmo compressor trabalhando a diferentes pressões.

- **Custo específico ou custo do m<sup>3</sup>**

Através do produto entre o consumo específico e o custo de energia obtemos o custo do m<sup>3</sup> de ar comprimido produzido. Podemos calculá-lo por:

$$Custo_E = C_E \times C_{Energia} \quad (2.4)$$

onde:

$Custo_E$  – Custo Específica [€/m<sup>3</sup>];

$C_E$  – Consumo Específico [kWh/m<sup>3</sup>];

$C_{Energia}$  – Custo Energia [€];

O quadro 2.1 pretende dar uma ideia dos custos de energia, quantificando os indicadores acima mencionados:

Tabela 2.1 - Custos de energia de um SAC

Potência Específica	Consumo Específico	Consumo Anual	Custo Energia	Custo m <sup>3</sup>	Varição
6 kW/(m <sup>3</sup> /min)	0,1 kWh/m <sup>3</sup>	960.000 kWh	96.000 €	1 Cent.	
8 kW/(m <sup>3</sup> /min)	0,133 kWh/m <sup>3</sup>	1.280.000 kWh	128.000 €	1,33 Cent	+ 33%

Considerando um caudal de 20 m<sup>3</sup>/min num regime de 8.000h/ano, sendo o custo da energia<sup>2</sup> de 0,1 €/kWh.

### 2.3. Estrutura de Custos de um SAC

Quando analisamos a estrutura de custos referente a um SAC numa perspectiva de ciclo de vida, levando em conta o custo de aquisição, o custo de manutenção e o custo de energia, a componente custo de energia evidencia-se face às outras duas parcelas. No exemplo seguinte<sup>1</sup>, considerando um ciclo de vida de 10 anos, o custo de energia representa cerca de 80% do custo total incorrido.

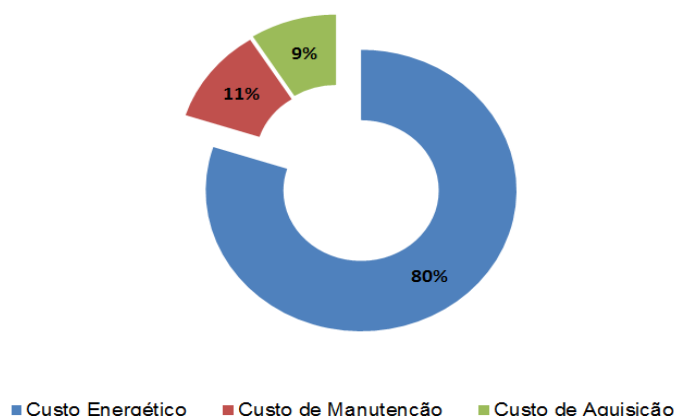


Figura 2.5 Estrutura de Custos de um SAC.

Assim, a parcela consumo energético revela-se determinante, sendo obrigatório ter em linha de conta, aquando da aquisição de um compressor, a comparação dos diferentes valores de potência específica. Porém, a eficiência energética de um SAC não depende unicamente da potência específica do compressor. Aspectos como o dimensionamento

<sup>1</sup> Compressor de parafuso lubrificado de 75 kW, regulação por carga/vazio com um factor de carga de 70%, custo da energia 0,1€/kWh. Cálculo para um regime anual de funcionamento de 6.000h.

<sup>2</sup> 0,1€/kWh Custo de energia de cogeração, energia auto-consumo logo não faz sentido fazer análise do tarifário.

do compressor, tipo de regulação ou parametrização e a rede de distribuição são também determinantes nesta equação de eficiência.

### 3. Análise das Necessidades de Ar Comprimido

Em função do tipo de ar que se pretende (ar de serviços gerais, ar de instrumentação, ar de processo, ar respirável) o conhecimento das cabais necessidades de ar é o ponto de partida para caracterizar a instalação. O caudal (valor máximo, mínimo e médio), a qualidade de ar que se pretende e a pressão mínima requerida nos pontos de utilização, são condições necessárias/obrigatórias para que o sistema seja concebido/reformulado de forma eficiente.

Relativamente à produção é obrigatório ter a perfeita noção do tipo de compressor, do número de compressores a utilizar, as capacidades envolvidas, do modo de regulação que mais se adequa e da pressão de descarga necessária, caso contrário, compromete-se definitivamente a eficiência da instalação. Analogamente, o tratamento de ar (desumidificação e filtragem), deverá respeitar estritamente a qualidade de ar exigida, porque, ir para além do grau de tratamento necessário, significa penalizar a eficiência do sistema, consumindo mais energia e aumentando a perda de carga. A norma ISO 8573-1 estabelece diferentes classes de qualidade do ar, quanto ao conteúdo de partículas sólidas, água e de óleo e aplica-se ao ar de serviços gerais, ar de instrumentação e ar de processo, deixando de fora o ar respirável e o ar medicinal.

Tabela 3.1 - Qualidade do Ar segundo ISO 8573-1:2010.

#### Classes de Qualidade do Ar ISO 8573-1: 2010

CLASSE	SÓLIDOS			ÁGUA	ÓLEO	CLASSE
	Número máximo de partículas por m <sup>3</sup> 0,1 – 0,5 µm	0,5 – 1 µm	1 – 5 µm	Ponto de Orvalho ( °C )	(mg/m <sup>3</sup> )	
0	Mais restrito que a classe 1, em acordo com as partes cliente/fornecedor					0
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	- 70	0,01	1
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	- 40	0,1	2
3	Não especificado	≤ 90.000	≤ 1.000	- 20	1	3
4	Não especificado	Não especificado	≤10.000	+3	5	4
5	Não especificado	Não especificado	≤ 100.000	+ 7	n/a	5

A norma considera também um contaminante qualquer substância ou combinação de substâncias, existentes no ar ambiente ou adicionadas pelo sistema de ar comprimido, que afectam adversamente o próprio sistema, o produto final ou o operador.

### 3.1. Levantamento de Perfil de Consumo

A auditoria é iniciada pelo trabalho de campo, inicialmente pela inspecção visual do sistema e esboço do seu *P&ID*<sup>3</sup> e posteriormente pela instalação do sistema de monitorização. Os dados relativos às variáveis determinantes do sistema são: caudal, pressão, potência e ponto de orvalho, que são recolhidos continuamente, durante um período de tempo representativo e armazenados num *logger*. O tratamento destes dados oferece um conjunto precioso de valores relativos às variáveis em jogo, permitindo caracterizar perfeitamente o comportamento da instalação e deixando espaço para um olhar analítico sobre o sistema. Em seguida são construídos indicadores de eficiência, quanto ao desempenho energético e quanto a custos, que servirão de *benchmarks* às medidas de melhoria futuras.

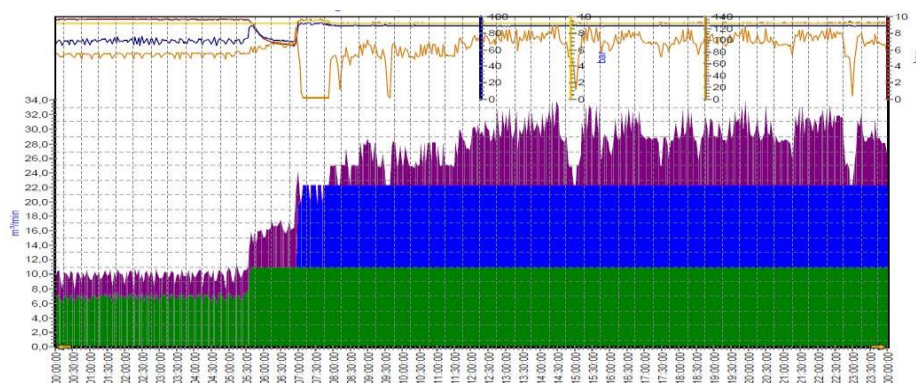


Figura 3.1 Diagrama de Consumo (KESS) de um SAC [9].

Uma análise mais pormenorizada, permite perceber qual a elasticidade do sistema face às variações de caudal, ter consciência do regime de funcionamento dos compressores e ver se este é o mais adequado em termos de caudal/regulação. Nas centrais multi-compressores, permite-se perceber se a combinação/regulação de compressores é a mais eficiente, avaliar o caudal de fugas, perceber exactamente se existe volume de armazenamento suficiente e qual a necessidade de reservatórios secundários, a fim de ter noção da perda de carga ao longo da linha e detectar pontos críticos da instalação.

<sup>3</sup> Acrónimo anglo-saxónico que define Diagrama de Tubagem e Instrumentação normalmente conhecido na industria por apenas P&ID – *Piping and Instrumentation Diagram*



Figura 3.2 Fases de uma Auditoria energética [9].

### 3.2. Medidas de Economia

Os sistemas de ar comprimido são dos principais consumidores de energia eléctrica numa instalação fabril e são utilizados na grande maioria dos processos industriais, como tal, torna-se importante a optimização da sua exploração. A diminuição dos custos energéticos reflecte-se directamente na diminuição do custo de produção fabril, aumentando a competitividade das empresas no mercado.

O ar comprimido ocupa um lugar muito importante na Indústria Portuguesa, sendo responsável por aproximadamente 10 a 30% do consumo de energia eléctrica neste sector. Um estudo a nível europeu efectuado pela Comissão Europeia, correspondendo a um levantamento durante 5 anos de funcionamento de sistemas de ar comprimido (tipicamente com 6.000 horas por ano de operação), demonstra que 75% dos custos de exploração desses sistemas resultam da parcela “Energia”.

A optimização de uma central de ar comprimido passa pela análise de diversos parâmetros, tais como, o tarifário de energia eléctrica, a eficiência das redes de energia eléctrica, a instalação de variadores de velocidade, as fugas na rede de ar comprimido, a temperatura do ar, ou a manutenção. A figura 3.3 ilustra um exemplo de uma central de produção e tratamento de ar comprimido.

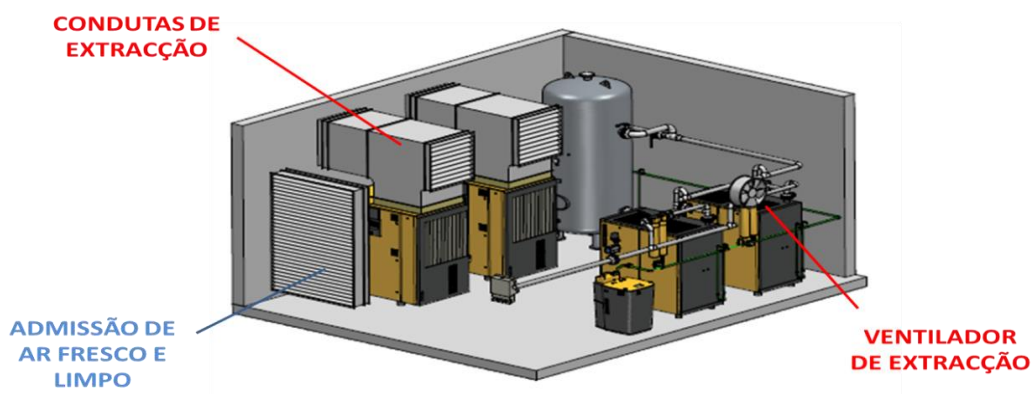


Figura 3.3 Central de Ar Comprimido [9].

### 3.2.1. Redução das Fugas

O ar comprimido é vítima das suas próprias características. Se por um lado lhe conferem vantagem relativamente a outras formas de energia, por outro, também o penalizam. É o caso das fugas de ar que são ignoradas porque não são visíveis, não têm odor e nem põem em risco a segurança de uma instalação fabril. Como consequência, as fugas serão, provavelmente, a maior fonte de ineficiência num SAC. Segundo Radgen [7] a redução das fugas é a medida de economia com maior impacto, pela sua aplicabilidade e pelas poupanças alcançadas. Para uma instalação sem qualquer tipo de vigilância, o caudal de fugas representa normalmente 25-30% do caudal de ar produzido. Face a esta realidade é importante que os Programas de Manutenção incluam um Plano de Detecção e Reparação de Fugas. Tipicamente, uma instalação com um nível de 30% de fugas, uma redução para metade deste valor, significa uma redução directa do consumo de energia de 15%. A tabela 3.2<sup>4</sup> dá uma ideia dos valores de caudal de fugas em função do diâmetro do orifício e faz a correspondência em termos de custos.

Tabela 3.2 – Caudais de Fuga em Função do Diâmetro vs Custos Fonte – Kaeser Compressores.

Diâmetro	Consumo de Ar @ 6 bar(g) m <sup>3</sup> /min	Desperdício	
		Pot. Mecânica kW	€/ano (*)
● 1 mm	0,065	0,46	492
● 2 mm	0,257	1,80	1.945
● 4 mm	1,03	7,21	7.796
● 6 mm	2,31	16,17	17.484

\* Custo Específico: 0.0144 €/m<sup>3</sup>



<sup>4</sup> Custos calculados para um regime de funcionamento de 8.760 h/ano e um custo de energia de 0,0144 €/kwh.

Períodos de não laboração, tipicamente período nocturno e fim-de-semana, é boa prática desligar a produção de ar ou isolar a alimentação aos consumidores de ar de forma a evitar o desperdício associado às fugas. Não sendo uma fuga propriamente dita, a purga de condensados feita através de electroválvulas, corresponde na prática a um desperdício de ar. A electroválvula funciona com um determinado tempo de abertura e com um intervalo de tempo entre aberturas, propondo-se deste modo a purgar os condensados. Portanto, é comum haver perda de ar associada a este tipo de purgas, sendo recomendável a troca por purgas sensíveis ao nível de condensados sem perda de ar com sensores capacitivos por exemplo EWD da Atlas Copco ou equivalente. O método mais simples para estimar o caudal de fugas é o teste de esvaziamento do reservatório. É um teste simples e bastante esclarecedor. Consiste em deixar esvaziar o reservatório e todo o volume da rede a jusante, durante um determinado período de tempo. Importa que todos os pontos de consumo estejam desligados, bem como o compressor. Assim, o decréscimo da pressão ( $p_{inicial} - p_{final}$ ) no determinado intervalo de tempo corresponderá ao caudal de fugas, através da seguinte relação:

$$Fugas = \frac{V \times (p_{inicial} - p_{final})}{t_{TM}} \quad (3.1)$$

onde:

$Fugas$  – Fugas [ $m^3/min$ ];

$V$  – Volume de Ar [ $m^3$ ];

$p_{inicial}$  – Pressão Inicial [bar];

$p_{final}$  – Pressão Final [bar];

$t_{TM}$  – Tempo Total de Medição [min].

Quando estamos perante compressores de carga/vazio poder-se-á fazer o procedimento inverso, ou seja, o teste de carga. Este método resume-se à colocação do compressor em funcionamento quando não existe qualquer tipo de consumo na instalação. O regime de funcionamento do compressor oscilará entre o modo de carga e o modo de vazio, devido exactamente à existência de fugas e à necessidade em repor a pressão da rede. Assim, será contabilizado o somatório dos vários tempos de carga e o tempo total de medição, obtendo o valor das fugas respeitando à seguinte expressão:

$$F = \frac{Q \times \sum t_c}{t_{TM}} \quad (3.2)$$

onde:

$F$  – Fugas [ $\text{m}^3/\text{min}$ ];

$Q$  – Caudal [ $\text{m}^3/\text{min}$ ];

$t_c$  – Tempo Carga [min];

$t_{TM}$  – Tempo Total de Medição [min].

Apurado o caudal de fugas (p.e. 4  $\text{m}^3/\text{min}$ ), recorre-se ao consumo específico da instalação (p.e. 7  $\text{kW}/(\text{m}^3/\text{min})$ , o tempo de carga (p.e. 8400 horas) e um custo energia (p.e. 0.1€/kWh) para calcular o custo incorrido com o desperdício de ar comprimido:

$$Custo_T = C_E \times Q_f \times t_c \times Custo_E \quad (3.3)$$

onde:

$Custo_T$  – Custo Total [€];

$C_E$  – Consumo Epecifico [ $\text{kWh}/\text{m}^3$ ];

$Q_f$  – Caudal de Fugas [ $\text{m}^3/\text{min}$ ];

$t_c$  – Tempo Carga [horas];

$Custo_E$  – Custo Energia [€/kWh].

o que, neste caso significa um custo de 23.520 €.

### 3.2.2. Sobre-pressurização da Rede

A sobre pressurização corresponde a trabalhar a níveis de pressão superiores aos estritamente necessários. Estes casos são frequentemente encontrados, porque é a solução mais “facilmente disponível” para resolver problemas de excessiva perda de carga da rede e compensar flutuações negativas de pressão. Porém, é importante ter a consciência que o consumo aumenta quando um compressor trabalha em níveis de pressão superiores. Segundo a British Compressed Air Society [8], o incremento de 1 bar significa um aumento da potência em cerca de 9%. Cálculos tendo por base valores reais de compressores, indicam um decréscimo em torno dos 6% da potência

consumida para 1 bar de redução. Deve-se ainda acrescentar a este primeiro aspecto, uma redução do caudal de fugas e do caudal desregulado, em cerca de 4%, admitindo valores normais para ambos. Assim, considerando o efeito combinado destes dois factores, para uma redução de 1 bar, teremos uma diminuição de 10% do consumo energético em todo o sistema.

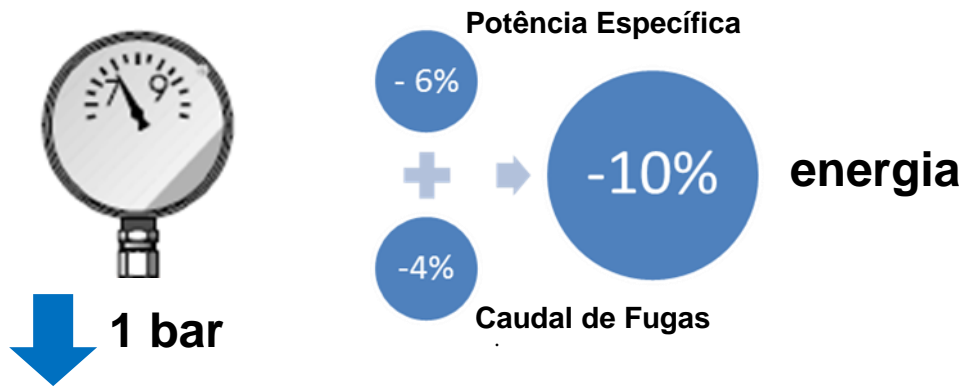


Figura 3.4 – Sistema de Ar Comprimido [1].

### 3.3. Recuperação de Energia

Cerca de 94% da potência necessária ao veio do elemento compressor, é dissipada no seu sistema de arrefecimento de óleo, que utilizado em sistemas de recuperação de energia, possibilita a obtenção de água quente para uso industrial e/ou ar quente para aquecimento de espaços.

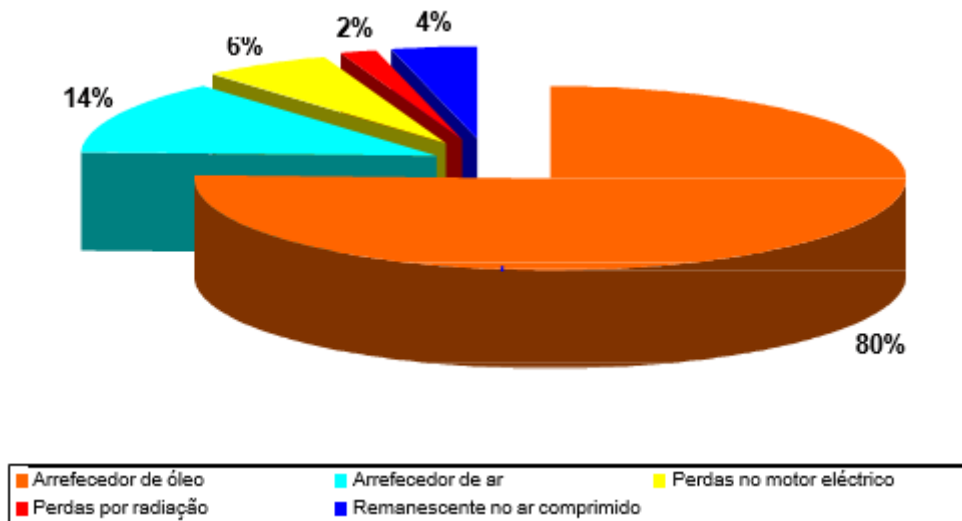


Figura 3.5 – Balanço Térmico de um Compressor Lubrificado - % Potência requerida ao veio [10].

A maior parte da energia eléctrica fornecida ao compressor é rejeitada sob a forma de calor. Existe, portanto, um enorme potencial de recuperação de energia, que poderá ser utilizada para aquecer ar ou água. Valores entre 70 a 96% da energia consumida, função do tipo de compressor (parafuso lubrificado ou parafuso não lubrificado) e do tipo de aproveitamento que se pretende (aquecimento de ar ou de água), são perfeitamente praticáveis. Um compressor de parafuso lubrificado, utiliza o óleo como meio privilegiado de arrefecimento, sendo portanto, o meio preferencial de transferência de calor. Quando estamos perante compressores não lubrificados, a não existência de óleo no interior do elemento compressor, faz do próprio ar comprimido o meio de excelência para a transferência de calor.

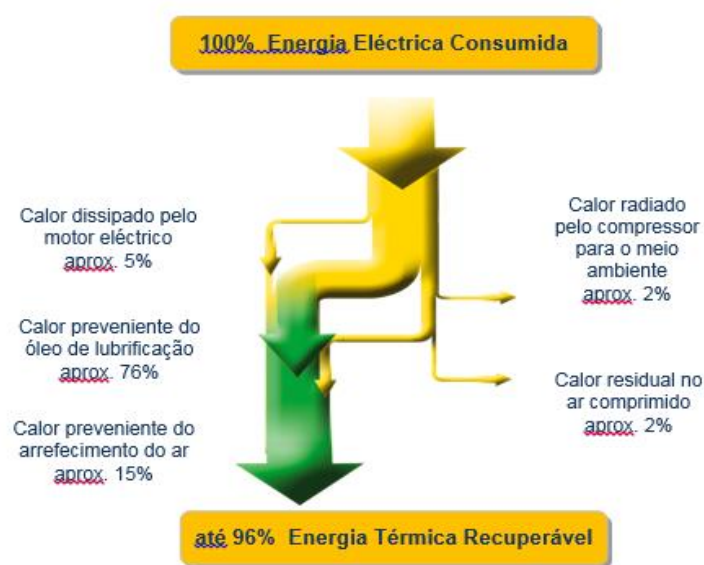


Figura 3.6 – Diagrama de Calor [9].

Relativamente aos compressores lubrificados, com arrefecimento a ar, existe a possibilidade de recuperar a energia térmica do caudal de arrefecimento para aquecer espaços contíguos, fazer secagem de materiais, utilizar ar de combustão pré-aquecido ou qualquer outra aplicação que necessite de ar quente. Para a sua aplicação será necessário condutas de encaminhamento do ar quente, para zonas contíguas. O potencial de recuperação é de 96% da potência eléctrica instalada.

Dentro do mesmo tipo de compressores, mas com arrefecimento a água, é possível recuperar cerca de 70% da potência instalada via circuito de óleo, intercalando um permutador óleo/água no circuito. Deste modo, é possível obter água quente (a maior parte dos sistemas de recuperação disponibiliza água até 70°C) podendo ser utilizada para águas sanitárias ou/e água pré-aquecida para processo.

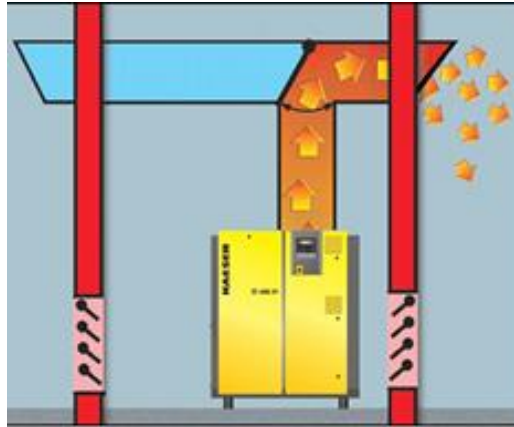


Figura 3.7 – Sistema de Recuperação de Calor para produção de água quente com canal de saída de ar e válvula giratória integrada [9].

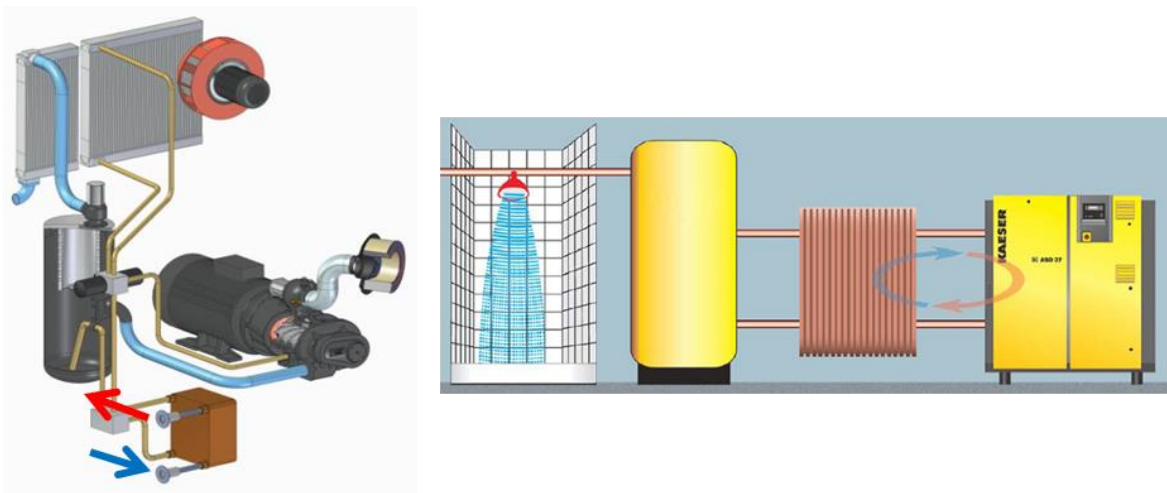


Figura 3.8 – Sistema de Recuperação de Calor para produção de água quente [9].

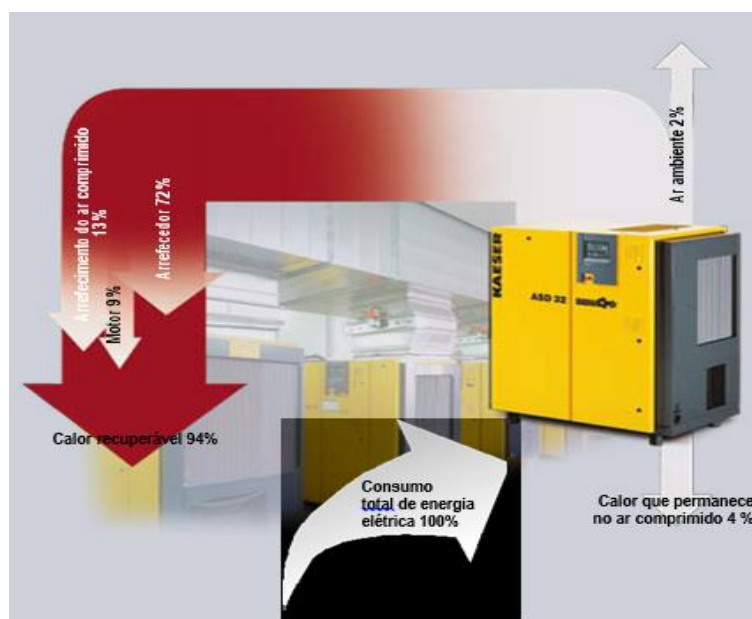


Figura 3.9 – Diagrama de Fluxo de Calor [9].

Tabela 3.3 – Energia Recuperável (Tipo de Compressor/Meio de Arrefecimento/Meio a Aquecer).

		Parafuso Lubrificado		Parafuso Isento	
		Meio de arrefecimento		Meio de arrefecimento	
		Ar	Água	Ar	Água
Meio a aquecer	Ar	<b>96%</b> Arrefecedor Óleo Arrefecedor Ar Motor Eléctrico	----	<b>95%</b> Arrefecedor Óleo Arref. Intermédio Arref. Final Motor Eléctrico	-----
	Água	<b>76%</b> Arrefecedor Óleo	<b>91%</b> Arrefecedor Óleo Arrefecedor Ar	-----	<b>90%</b> Arrefecedor Óleo Arref. Intermédio Arref. Final

### 3.3.1. Controlo

O dimensionamento de uma central de ar comprimido e respectiva rede de distribuição terá que, obrigatoriamente, respeitar os requisitos máximos do consumo. Porém, esta condição de consumo máximo corresponde na prática aos picos máximos que, por norma, acontecem muito esporadicamente. Este facto leva-nos a uma condição de sobredimensionamento por inerência face ao que serão as necessidades médias da instalação.

Por outro lado ainda, temos a variabilidade típica que caracteriza o consumo que tem inúmeros utilizadores, com padrões de consumo distintos e uma grande aleatoriedade no consumo de ar. Acrescem os diferentes níveis de consumo diários em função dos turnos de laboração, ao que por vezes se acrescenta o fim-de-semana com necessidades de ar mínimas. Importa então, que a produção tenha capacidade para se ajustar aos diferentes patamares de consumo e responda às flutuações de consumo dentro de cada patamar. Este mecanismo de ajuste de caudal a diferentes níveis de procura, denomina-se controlo ou regulação de caudal.

Os sistemas de controlo procuram cumprir com dois princípios básicos: equilibrar o caudal produzido com o caudal requerido pela rede e consumir o mínimo de energia. Para o efeito, os compressores de carga/vazio recorrem ao regime de funcionamento a plena carga e ao regime de funcionamento em vazio. Aos compressores de velocidade variável acresce o regime de funcionamento em carga parcial.

Tabela 3.4 – Regime de Funcionamento (Caudal vs Potência).

Regime de Funcionamento	Caudal	Potência
Plena Carga	100%	100%
Carga Parcial	25-100%	25-100%
Vazio	0%	30%
Arranque Automático	0%	0%

Importa previamente, fazer uma consideração energética associada a cada um dos regimes de funcionamento, recorrendo, para tal, à curva de potência específica em função do caudal. É tipicamente uma curva em forma de “U assimétrico”, sendo que a zona intermédia corresponde ao intervalo de rotação no qual se consegue o menor consumo específico, portanto, a zona que mais beneficia o consumo energético.

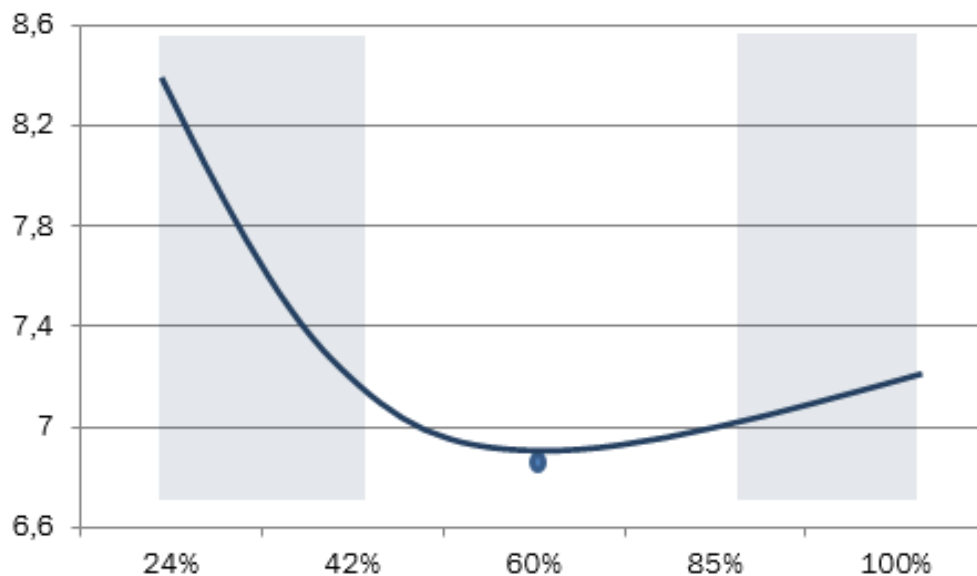


Figura 3.10 – Curva de Potência Específica [1].

A zona inferior da curva corresponde à zona de melhor eficiência, onde se encontra o ponto mínimo, denominado ponto óptimo para o qual se obtém o melhor consumo específico. Quando a rotação diminui ou aumenta aquém ou além desse ponto, o consumo específico piora, prejudicando a eficiência do compressor, pelo decréscimo do rendimento volumétrico. Daqui resulta que um compressor de carga/vazio no regime de plena carga é a opção mais eficiente, porque o seu único ponto de funcionamento coincide com o ponto óptimo da curva.

---

Contrariamente, um compressor de velocidade variável tem o seu ponto óptimo no intervalo 60-70% do seu caudal máximo, em pleno regime de carga parcial.

Nestas circunstâncias, um compressor de velocidade variável que funcione predominantemente na zona inferior da curva, sensivelmente a 40%-85% da carga, alia a eficiência energética à flexibilidade do controlo. Fora deste intervalo de rotação, caímos nos extremos da curva, que são zonas bastante ineficientes e penalizam o comportamento energético da instalação.

Por último, o regime de vazio, ele é sem dúvida um regime de funcionamento energeticamente penoso, porque corresponde a um caudal nulo para um consumo em torno dos 30% da potência instalada.

Uma análise baseada no regime de funcionamento da máquina será, porventura, o primeiro indicador a retirar numa central, através do factor de carga do compressor. No fundo, corresponde ao quociente entre as horas em carga e as horas totais trabalhadas. Nos compressores de velocidade variável para além do factor de carga propriamente dito, existe a hipótese de retirar os factores de carga parcelares a vários intervalos de caudal. Valores desejáveis e sinónimo de uma correcta utilização, para compressores de carga/vazio será um factor de carga acima dos 75% e para compressores de velocidade variável, um valor acima de 95%.

Em síntese, perfis de consumo estáveis, por patamares, aceitam sistemas de controlo rígidos, como o controlo por carga/vazio, ao passo que perfis com grandes flutuações justificam um controlo mais flexível, tipicamente o controlo por velocidade variável. Quanto ao funcionamento em vazio, será de evitar todo e qualquer desperdício energético associado a este regime.

Quanto às centrais multi-compressores, estamos perante uma solução que recorre a mais do que um compressor em simultâneo, para satisfazer as necessidades de ar. Esta opção deve-se à incapacidade de satisfazer o caudal com um único compressor, porque estamos face a um diagrama de consumo composto por vários patamares de carga com grandes amplitudes, e portanto, impróprio para ser preenchido por um único compressor. Esta solução permite também redundância inferior a 100% sem pôr em perigo o fornecimento de ar.

Uma solução deste tipo pressupõe que o caudal resultante das combinações disponíveis de compressores encaixe nos diferentes patamares de consumo. Pressupõem igualmente, que a zona baixa e intermédia do perfil sejam obrigatoriamente preenchidas por compressores de carga/vazio e a zona superior do perfil, se recartilhada, seja coberta por um compressor de velocidade variável, caso contrário, por um compressor de carga/vazio. Por último, pressupõe que não existam *gaps* de controlo no intervalo de caudal fornecido ou, pelo menos, que o consumo não caia nestas zonas.

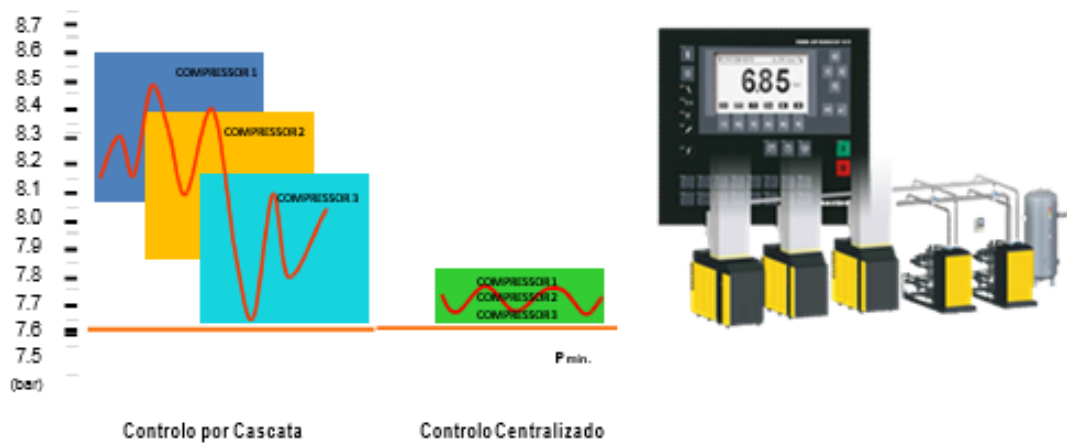


Figura 3.11 – Controlo por Cascata e Controlo Centralizado [9].

Em centrais de ar comprimido é usual encontrar-se o tradicional controlo por cascata. O sistema de regulação por cascata procura combinar o funcionamento dos diferentes compressores, em resposta aos vários patamares de consumo, porém, fá-lo de uma forma muito básica e, conseqüentemente, pouco eficiente. Os dois pontos fracos apontados a este sistema são o facto dos compressores responsáveis pela base do perfil de consumo, trabalharem num nível de pressão muito superior ao mínimo requerido e a seqüência de entrada/saída dos compressores ser fixa.

Quando optamos por um sistema centralizado de controlo, os compressores perdem a faculdade de se controlarem individualmente entregando a sua gestão a um controlador “maestro”, responsável pela gestão de todo o conjunto.

O sistema beneficia da capacidade de se regular em níveis de pressão mais baixos e de se permitir a seqüências de entrada/saída de compressores, previamente estabelecidas numa base horária.

Actualmente, o estado da arte deste tipo de controladores recorre a algoritmos dinâmicos que respondem em função do estado real das variáveis, conjuntamente, com algoritmos preditivos que recorrem à memória comportamental do sistema. Esta capacidade que o controlador tem em gerir os acontecimentos, aliada à aprendizagem do comportamento do sistema – produção e consumo - assegura que o ar comprimido está a ser produzido ao mais baixo custo, beneficiando da combinação de compressores mais eficientes e minimizando tempos de vazio.

O nível de poupança depende muito do ponto de partida, se estamos perante uma central “desarrumada”, isto é, máquinas sobredimensionadas e/ou parametrizações incorrectas, depende igualmente da potência instalada, das horas de funcionamento anuais e do tipo de perfil em questão. Contudo, valores de poupança de 4% são normalmente o ponto de partida.

Estes sistemas constituem também uma excelente ferramenta de gestão pela forma como comunicam, via web ou cartão de memória, e pela informação que disponibilizam. A monitorização do sistema recai sobre as principais variáveis: caudal de ar produzido, consumo, custos energéticos e pressão, permitindo a sua leitura através de tabelas e de gráficos, bem como a construção de indicadores de desempenho.

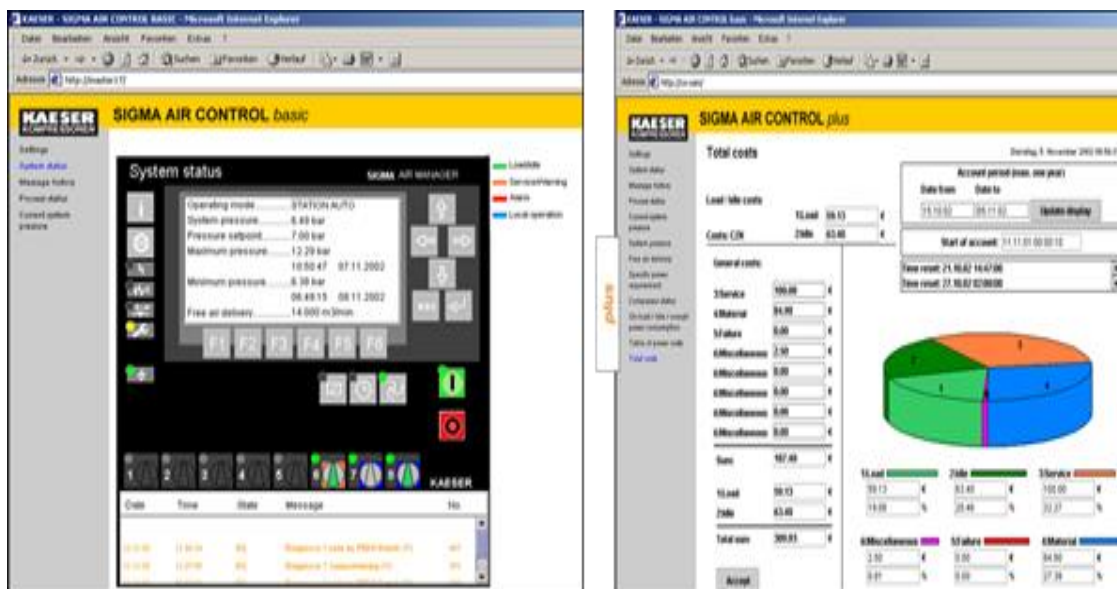


Figura 3.12 – Monitorização do Sistema [9].

Em centrais com mais do que um compressor, torna-se importante a utilização de sistemas de controlo e optimização dos compressores. Com base no perfil de consumos da fábrica, estes sistemas possibilitam a optimização da exploração da central de compressores, através da selecção óptima dos equipamentos disponíveis na central, colocação dos compressores em operação na sua zona de máxima eficiência e redução da banda de pressão de regulação dos equipamentos.

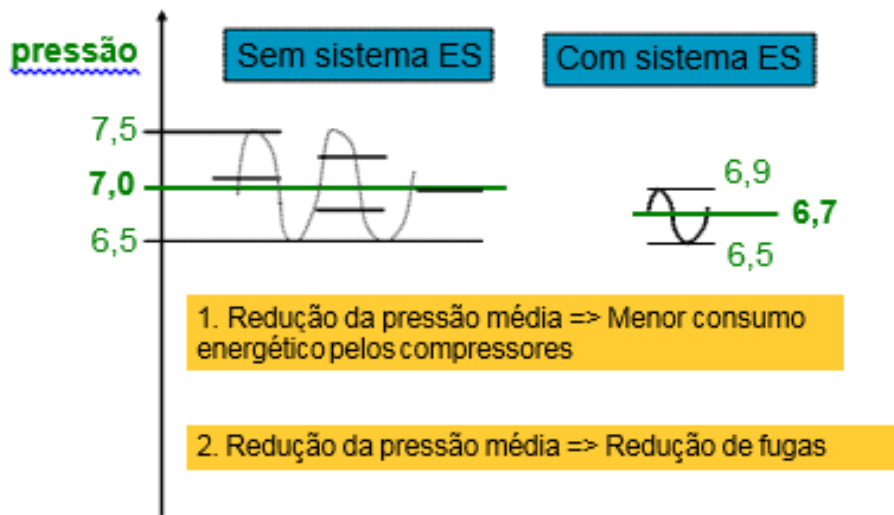


Figura 3.13 – Optimização da Exploração da Central de Compressores [11].

### 3.3.2. Rede de Distribuição

A rede de distribuição tem um papel relevante, sendo responsável pela ligação entre os diferentes elementos do sistema e encaminhar o ar comprimido desde a produção até aos pontos de consumo. É-lhe pedido que o faça com a menor perda de carga possível, com o mínimo de fugas e que não seja um foco de contaminação do ar.

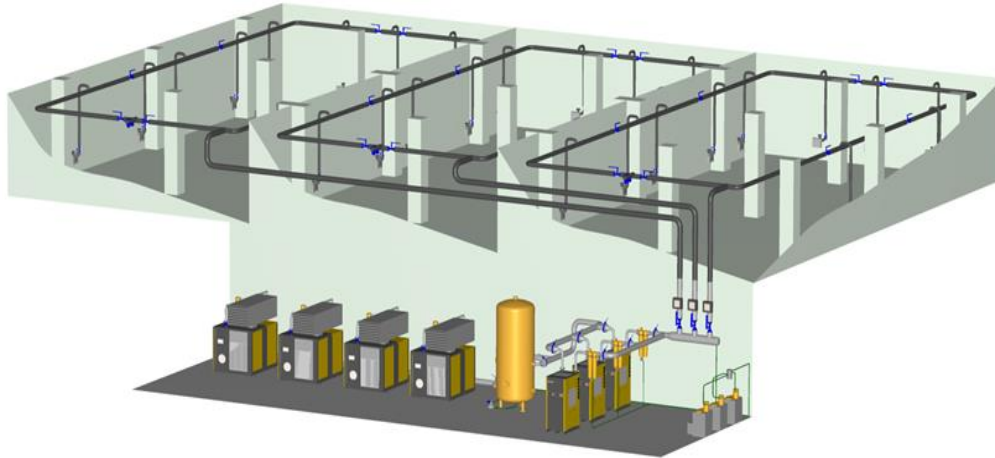


Figura 3.14 – Rede de Distribuição [9].

No dimensionamento de redes de ar comprimido, o principal cuidado a ter é a obtenção de uma perda de carga reduzida, na ordem dos 0,1bar.

- Perda de carga na rede – Aumento da pressão de trabalho em 1 bar (g) representa um acréscimo de 6% na potência consumida pelos compressores.

Durante a vida útil da rede de ar comprimido, devem ser feitas operações de manutenção substituindo troços de tubagem em mau estado e eliminando fugas existentes.

- Fugas de ar comprimido – Um orifício de 1mm corresponde a uma fuga de 1,2 l/s @ 7 bar (g) => 0,42kW desperdiçados.

A perda de carga é o termo utilizado para caracterizar o decréscimo de pressão que ocorre entre a boca de descarga do compressor e o ponto de consumo. Esta diminuição de pressão deve-se ao atrito imposto pelo desenvolvimento linear da tubagem, na parede do tubo e localmente, nos acessórios a fenómenos de turbulência impostos pelas restrições e obstruções. Fenómenos de turbulência associados a estas últimas singularidades também induzem perda de carga no escoamento.

---

O tratamento intercalado, secador e filtros, também oferecem resistência à passagem do ar, pelo que são uma parcela significativa da perda de carga.

A perda de carga é um indicador de eficiência da instalação, pois expressa a maior ou menor dificuldade que o ar tem em chegar ao ponto de consumo e que no fundo corresponde a uma parcela de energia que é dissipada.

Quanto ao traçado principal recomenda-se uma rede em anel, e daqui poderá seguir para um outro anel, lateral ou concêntrico, ou alimentar uma espinha. Contudo, o traçado e o diâmetro da linha é função da localização dos diferentes pontos a servir e do consumo de cada ponto. É boa prática considerar uma perda de carga máxima, linha e baixadas, até 1.5% da pressão de descarga do compressor, sendo o máximo admissível inferior a 0,2 bar. O traçado e a secção da rede resulta do compromisso entre considerações técnicas e considerações económicas. A rede de distribuição por norma, é tecnicamente separada em partes distintas, devido às diferentes preocupações que exigem. A tubagem de interligação, a tubagem principal e secundária, baixadas e linha de alimentação do ponto de consumo.

A tubagem de interligação corresponde à linha que faz a ligação dos diferentes equipamentos dentro da central de ar comprimido e caracteriza-se por troços rectos curtos, um grande número de curvas, “tês”, válvulas, by-pass e por vezes colectores de entrada/saída. Estas condicionantes provocam, porventura, caso não sejam acauteladas, fenómenos de contrapressão e de turbulência.

A linha principal liga a central de ar comprimido a uma grande área de consumidores, a linha secundária ramifica-se a partir da linha principal e cobre uma determinada zona de trabalho, as baixadas partem da linha secundária e fazem a ligação à linha de alimentação dos pontos de consumo.

O traçado das linhas poderá ser em anel, ramificado ou combinação de ambos, porém, deverá ter em conta a menor distância possível, o menor número de acessórios e um diâmetro suficientemente capaz que garanta a cabal alimentação dos pontos de utilização, em termos de pressão e caudal. Deverá também existir uma preocupação acrescida quanto aos três aspectos seguintes: sobre dimensionamento da linha, o seu correcto seccionamento e uma pendente com pontos de recolha de condensados.

A seguinte fórmula permite determinar a perda de carga ao longo de um determinado troço [8]:

$$\Delta p = 1,6 \times 10^8 \times \frac{Q^{1,85} \times L}{d^5 \times p} \quad (3.4)$$

onde:

$\Delta p$  – Queda de Pressão [bar];

$Q$  – Caudal [%];

$L$  – Comprimento equivalente [m];

$d$  – Diâmetro interno da Tubagem [mm];

$p$  – Pressão do Sistema [bar].

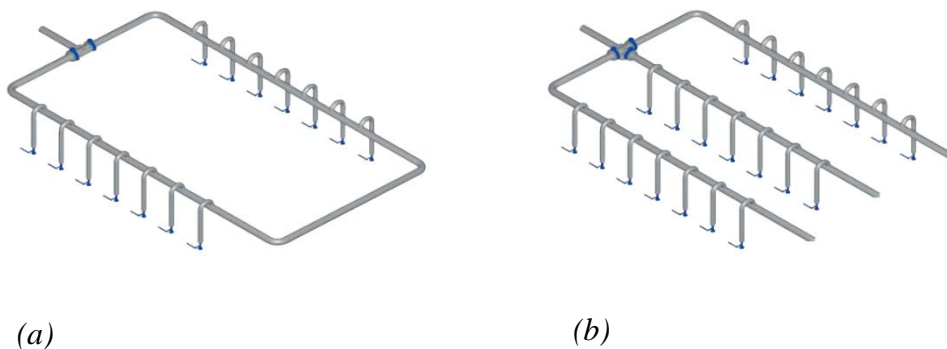


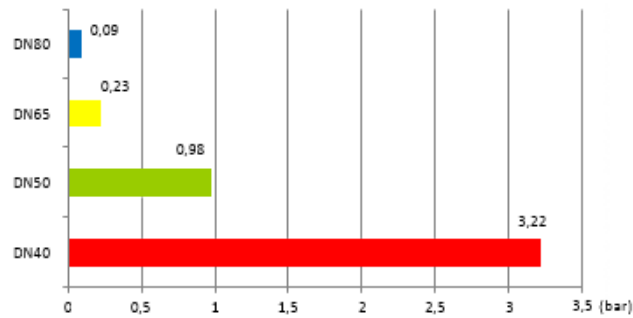
Figura 3.15 - Redes de Distribuição: (a) Anel aberto (b) Aberto ou antena [8].

Relativamente às baixadas, estas terão que ser picadas pela parte superior ou lateral da tubagem, em função dos diâmetros em jogo, por forma a evitar que eventuais condensados possam chegar até aos pontos de consumo.

É uma prática recomendável considerar uma perda de carga na linha principal, secundária e baixadas no máximo até 7% da pressão de descarga do compressor, sendo que o máximo admissível é 0,2 bar.

Tabela 3.5 – Perda de Carga.

Diâmetro		1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
		DN 40	DN 50	DN 65	DN 80
Perda de Carga	(bar)	3,22	0,98	0,23	0,09
	(€)	5.460	1.662	390	153



Quanto às singularidades da rede devem-se evitar joelhos e “tês” devido à excessiva perda de carga. No que se refere às curvas, deve-se optar sempre por curvas de raio longo, por exemplo, para o diâmetro DN50 o comprimento equivalente de um joelho é 400% superior ao de uma curva de raio longo.

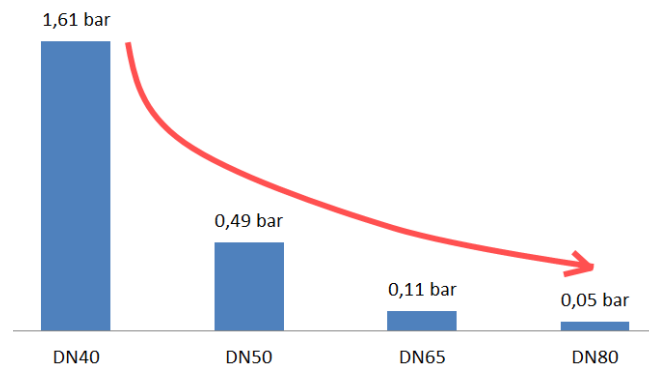


Figura 3.16 – Perda de Carga em Tubagens [10].

Relativamente aos acessórios, vulgo singularidades, há todo o interesse em limitar o seu número e escolher aqueles que induzam menos perturbação/obstrução ao escoamento, por exemplo joelhos e “tês”.

No caso seguinte, para diâmetro DN50, considerando uma curva de raio longo comparativamente a um joelho, temos que o comprimento equivalente do joelho é 5 vezes superior ao da uma curva de raio longo, no caso, 3 contra 0,6 metros.



Figura 3.17 – Acessórios de Ar Comprimido.

A alimentação aos pontos de consumo é sempre um troço penoso em termos de perda de carga. Vulgarmente este troço desenvolve-se através de uma linha flexível, vulgo mangueira, em que a sua ligação é feita através de duas uniões rápidas, uma em cada extremidade, e tem no final um conjunto FRL. Todos estes elementos, se não forem tidos em conta os caudais máximos a escoar, correm o risco de serem incorrectamente dimensionados e imporem uma severa perda de carga.

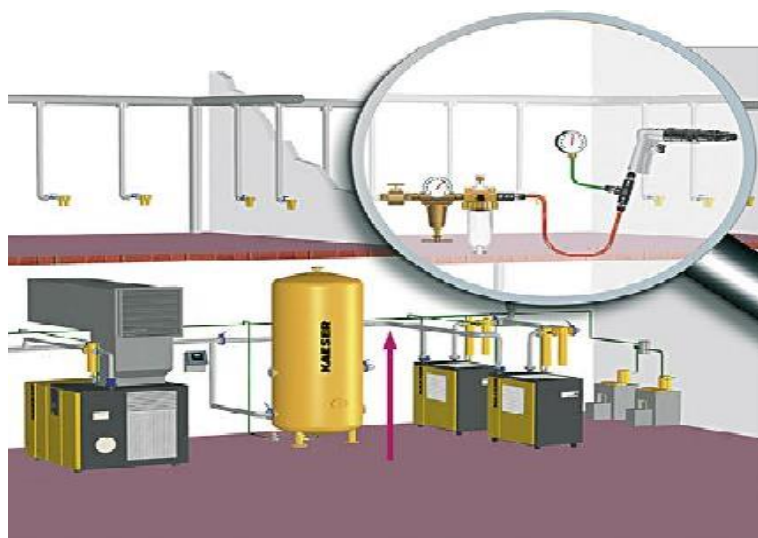


Figura 3.18 – Instalação de Ar Comprimido [4].

O quadro seguinte<sup>6</sup> dá uma ideia das perdas de carga recomendáveis desde a descarga do compressor até à entrada do ponto de consumo:

Tabela 3.6 - Perda de Carga Recomendáveis Compressor até Entrada do ponto de Consumo

Secador de refrigeração	: 0,2 bar
Filtro de linha 2	: 0,2 bar
Linha principal	: 0,03 bar
Linha secundária	: 0,03 bar
Baixadas	: 0,04 bar
Unidade FRL + uniões rápidas + mangueira	: 0,5 bar
<b>TOTAL</b>	<b>: 1,00 bar</b>

<sup>6</sup> A pressão diferencial de um filtro de linha coalescente com elemento novo é de 140g (0,14 bar). A troca do elemento é recomendável quando a perda de carga atingir os 0,3 - 0,4 bar, contudo os critérios de optimização energética da empresa prevalecem. O exemplo acima considera um valor intermédio de 0,2 bar.

---

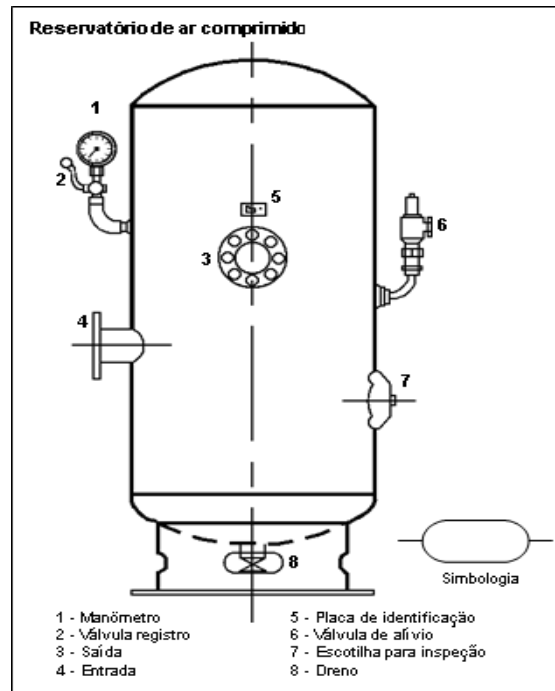
### 3.3.3. Armazenamento

Os reservatórios de ar comprimido são elementos essenciais num SAC, tendo como principal função o armazenamento de ar comprimido e a compensação das variações de pressão em toda a rede de distribuição. Um reservatório deverá respeitar sempre a pressão máxima de serviço admissível do SAC. Deve ser projetado, fabricado e testado conforme as normas em vigor e possuir no mínimo, um manómetro e uma válvula de segurança com a capacidade para escoar o caudal produzido pelos compressores que alimentam esse reservatório.

A instalação deverá respeitar a legislação em vigor, nomeadamente a Instrução Técnica Complementar para Recipientes Sob Pressão de Ar Comprimido, publicada em Diário da Republica, como anexo ao Despacho 1859/2003 (2ª série).

A armazenagem de ar tem um papel importante num SAC, pois surge como um elemento regularizador e simultaneamente como um dispositivo de armazenamento, sendo capaz de estabelecer equilíbrios desejáveis entre a produção e o consumo. Quando a capacidade de armazenamento é insuficiente estamos perante sistemas desregulados. Este comportamento é visível pelas grandes variações de pressão na rede e pelas quedas excessivas de pressão em alguns pontos. Nota-se também nos compressores de carga/vazio com ciclos de funcionamento carga/vazio muito frequentes e agudos. Nos compressores de velocidade variável o motor eléctrico está em constantes acelerações e desacelerações. Obviamente que um sistema nestas condições, sacrifica mecanicamente os compressores com um regime de trabalho muito severo, e penaliza a eficiência global do sistema. O facto do ar comprimido ser uma forma de energia que se deixa armazenar facilmente, representa uma grande vantagem em termos da gestão do equilíbrio entre a oferta e a procura.

O armazenamento, via rede de distribuição e/ou reservatório, assume-se como um elemento determinante na eficiência do sistema. Todavia, o reservatório é muitas vezes tido como um elemento não-funcional e passivo, sendo o seu papel frequentemente desvalorizado e a sua importância subestimada. Neste sentido, a publicação Druckluft Effizient [11] considera o armazenamento como um pilar fundamental na eficiência energética de um SAC.



*Figura 3.19 – Reservatório de Ar Comprimido [8].*

De facto, sistemas estabilizados registam valores médios de pressão mais baixos e menores amplitudes de variação de pressão, requerem menores níveis de energia e preservam a mecânica dos seus elementos. Historicamente, quando os compressores de pistão tinham uma presença quase generalizada na nossa indústria, os reservatórios acompanhavam qualquer instalação e não havia a mínima dúvida quanto ao seu propósito. Perante uma produção de ar pulsada, havia a necessidade imperiosa de estabilizar caudal e pressão à saída destas máquinas.

Posteriormente, com o aparecimento dos compressores de parafuso, à época compressores de carga/vazio, foi-se construindo a ideia de que os reservatórios poderiam ser menores, pois a produção de ar nestes compressores tem um carácter mais constante. Admitia-se ainda, que o volume da rede teria capacidade suficiente para equilibrar o sistema. Em seguida, deu-se a passagem dos sistemas electro-mecânicos de controlo para os sistemas electrónicos de aquisição e controlo de dados, conferindo uma elevada precisão e rapidez ao processo de controlo.

Actualmente, a preocupação energética e a tecnologia de controlo disponível, relançaram a discussão sobre a utilização do reservatório nas instalações de ar comprimido, atribuindo-lhe um papel imprescindível e incontornável na eficiência do sistema.

## 3.4. Redução dos Custos de Exploração de Centrais de Ar Comprimido

### 3.4.1. Optimização da Selecção de Compressores

Cada indústria tem o seu perfil típico de consumo de ar comprimido ao longo de uma semana. Consoante o sector industrial em que uma fábrica se insere, ciclo de trabalho e ritmo de produção, difere o seu perfil de consumos.

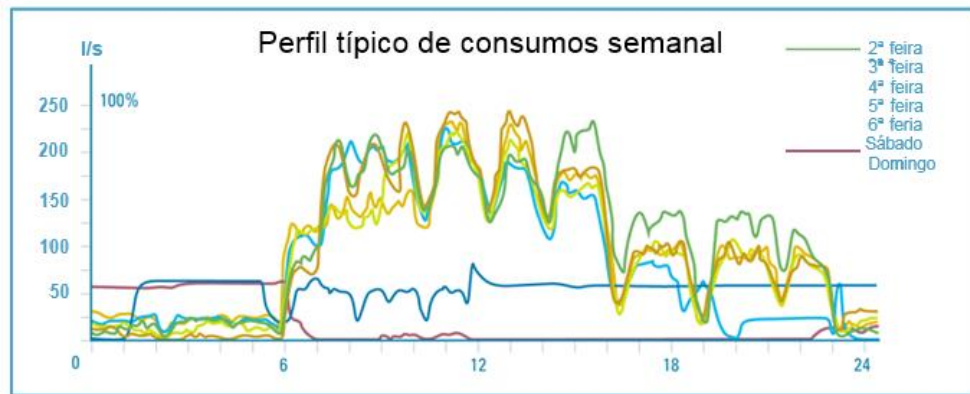


Figura 3.20 – Perfil típico de Consumo Semanal [11].

Em perfis cujo consumo apresente alguma irregularidade e intermitência, a aplicação de compressores de velocidade variável trás grandes benefícios. Deste modo o compressor irá produzir a quantidade de ar necessária em cada instante, ajustando-se ao perfil de consumos e mantendo a pressão da rede estável. Para o mesmo perfil de consumos, quando comparado com um compressor de regulação carga / vazio, um compressor de velocidade variável poderá representar uma redução até 30% dos consumos de energia. Esta redução é obtida através da anulação do tempo de funcionamento em vazio. Quanto maior a gama de variação do compressor, maior a sua capacidade de se ajustar às flutuações de consumo, sendo o compressor de velocidade variável ideal, aquele que se permite uma gama de variação de 0-100%, objectivo esse ainda não alcançado.

Os compressores correctamente desenhados para velocidade variável, apresentam-se com gamas de variação máximas na ordem dos 70 a 80%. A utilização de compressores de velocidade variável com uma gama de variação inferior a 40%, reduz significativamente a poupança energética, visto que se perde muita capacidade de ajuste do débito, ao consumo da instalação. Deste modo, o compressor será forçado a efectuar arranques e paragens sucessivos em situações de baixo consumo de ar comprimido, comprometendo a estabilidade de pressão na rede. Em perfis de consumo bastante estabilizados devem utilizar-se compressores de velocidade fixa. Estes compressores

---

podem ser de parafuso lubrificado, isentos de óleo ou centrífugos isentos de óleo, depende dos caudais e pressões envolvidas. Nestas condições estes compressores apresentam um consumo específico mais baixo, visto que quando comparados com um compressor de velocidade variável, apenas são afectados pela eficiência do motor eléctrico, ao passo que os de velocidade variável são afectados pela eficiência combinada do variador de frequência e motor.

Para pressões de trabalho na ordem dos 7 bar (g), a zona de transição dos compressores de parafuso para os compressores centrífugos poderá verifica-se em potências de 500kW, consoante o perfil de consumos da instalação. Os compressores centrífugos são mais eficientes em perfis constantes, demonstrando os compressores de parafuso maior eficiência em perfis intermitentes.

### **3.5. Aspectos a Considerar na Selecção de Compressores de Parafuso**

#### **3.5.1. Performance dos Equipamentos**

A norma ISO 1217 anexo C ed. 3 de 1996 foi criada com o objectivo de estabelecer regras precisas para o teste de compressores de ar, definindo métodos para medição, especificação e publicação de dados relativos à performance dos equipamentos. Nesse sentido, foi criado o conceito de compressor “package”:

- Conceito Compressor “Package” – A norma ISO 1217 define que um compressor de ar é constituído pelo elemento compressor e todos os acessórios necessários para o seu funcionamento, desde o filtro de admissão ao ponto de entrega de ar comprimido, vindo do arrefecedor final, e o respectivo circuito eléctrico de potência e comando.

$$P_{total} = \frac{P_{veio}}{\eta_{motor} \times \eta_{variador}} + \frac{P_{ventilador}}{\eta_{motorventilador} \times \eta_{variador}} \quad (3.5)$$

onde:

$P_{total}$  – Potência Total [kW];

$P_{veio}$  – Potência Veio [kW];

$P_{ventilador}$  – Potência Ventilador [kW];

$\eta_{motor}$  – Rendimento do Motor [%];

$\eta_{variador}$  – Rendimento do Variador [%];

$\eta_{motor\ ventilador}$  – Rendimento do Motor do Ventilador [%]

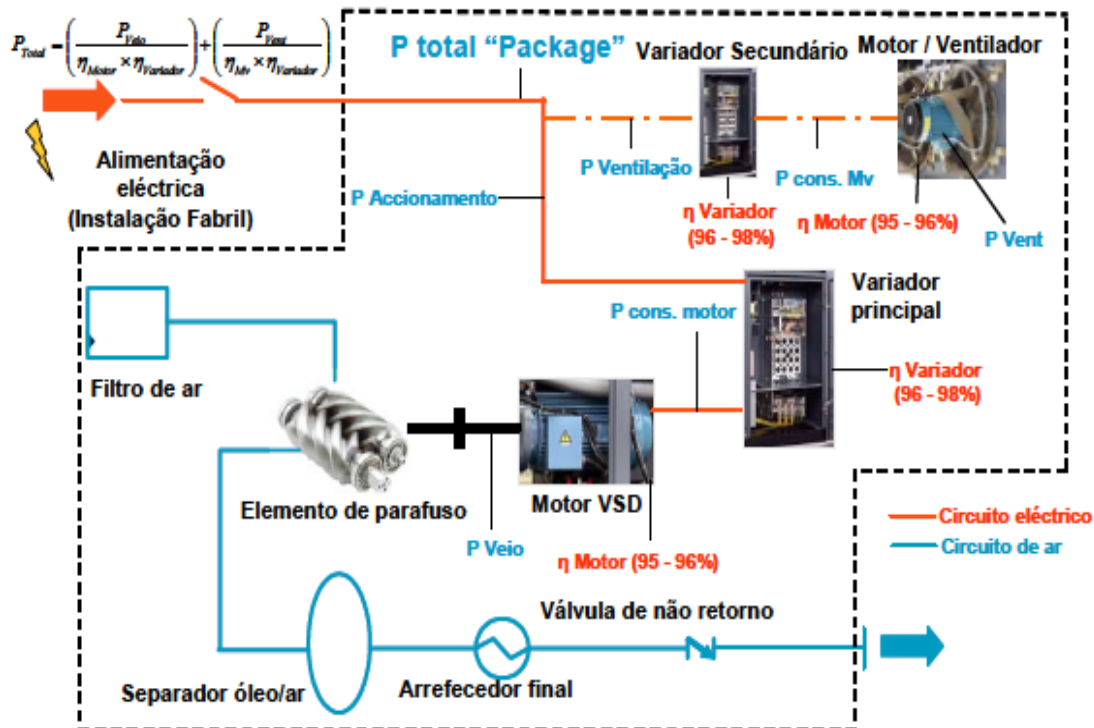


Figura 3.21 – Rotação do Compressor vs Capacidade de Armazenamento [8].

- Medição de potência consumida de compressores “package” – A ISO 1217 anexo C ed.3, define que os fabricantes devem medir e especificar a potência total consumida pelo compressor “package”. Assim, a medição efectuada terá que incluir a potência necessária para a compressão, e a potência necessária para o arrefecimento do compressor, ambas afectadas pela eficiência dos respectivos motores eléctricos e variadores de frequência.
- Medição de capacidade/especificação de compressores “package”- Relativamente à medição de capacidade, a norma define que os fabricantes

devem medir e especificar a capacidade de um compressor nas condições de referência FAD “Free Air Delivery” (Pressão na admissão 1bar (a), temperatura de admissão 20°C, Humidade relativa 0% e temperatura do meio de arrefecimento 20°C). Deste modo, o ar produzido pelo compressor “package” deve ser expandido na sua válvula de entrega e efectuada a medição de caudal. Os valores medidos devem ser convertidos para as condições de referência FAD.

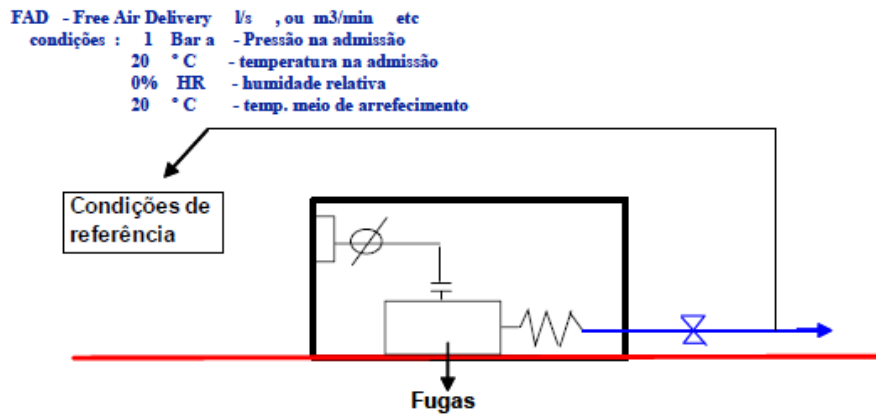


Figura 3.22 – Rotação do Compressor vs Capacidade de Armazenamento [8].

### 3.5.2. Consumo Específico de Compressores “package” SER “Specific Energy Requirement “

O consumo específico, normalmente apresentado em joule por litro, é a razão entre a energia e o caudal de ar comprimido produzido. Assim, o consumo específico define a eficiência de um compressor, sendo este mais eficiente quanto mais baixo for o seu valor. De acordo com a ISO 1217 anexo C ed.3, a eficiência de um compressor é traduzida pelo conjunto, elemento compressor e equipamentos auxiliares (conceito “package”). Assim, os fabricantes devem apresentar o consumo específico total do compressor “package”, e não o consumo específico ao veio do seu elemento compressor.

- Curva de SER típica de um elemento de parafuso – Percorrendo a gama de variação de um elemento de parafuso, importa analisar o tipo de perdas envolvidas e o modo como evoluem. Da conjugação dos vários tipos de perdas obtém-se a curva de SER típica para um elemento de parafuso.

$$SER = \frac{P_{total} \text{ "Package" }}{FAD} \times 1000 \quad (3.5)$$

onde:

$SER$  – Specific Energy Requirement [J/ℓ];

$P_{Total}$  "Package" – Potência Total Package [kW];

$FAD$  – Free Air Delivery [ℓ/s];

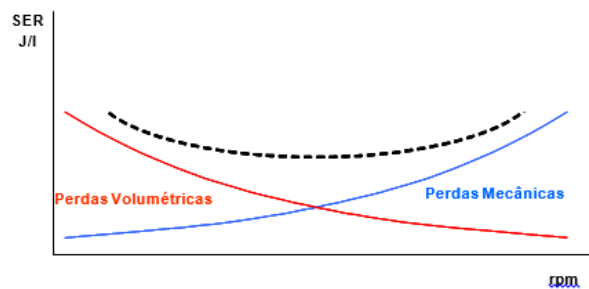


Figura 3.23 – Curva de um Elemento Compressor de Parafuso [8].

Num elemento de parafuso existem dois tipos de perdas que impedem que o valor do consumo específico seja constante, perdas de origem mecânica e perdas volumétricas. No design de elementos compressores de parafuso de elevada eficiência, são utilizadas tolerâncias muito apertadas entre a carcaça do elemento e os rotores macho e fêmea, minimizando o efeito de recuo de ar da porta de saída do elemento para a porta de admissão, causado pelo diferencial de pressões. Quanto mais lento for o processo de compressão maiores serão as perdas volumétricas. No que respeita a perdas mecânicas, como qualquer sistema rotativo, quanto maior for a velocidade de rotação maiores são as perdas nos rolamento, engrenagens.

De acordo com a filosofia de um compressor de velocidade variável, os valores de potência total consumida, a capacidade e o consumo específico total, devem ser apresentados a várias pressões de trabalho e em toda a sua gama de variação, caso contrário, não será possível ao utilizador verificar qual a capacidade do equipamento de se adaptar ao seu perfil de consumos, e qual a sua eficiência nas mais variadas situações. Caso os valores de performance dos equipamentos não sejam apresentados para a unidade total, compressor "package", para que se possam efectuar de forma correcta estudos comparativos, devem ser solicitados aos fabricantes todos os valores necessários ao cálculo do consumo específico "package", para várias pressões de trabalho e pontos da gama de variação.

---

## 4. Caso de Estudo

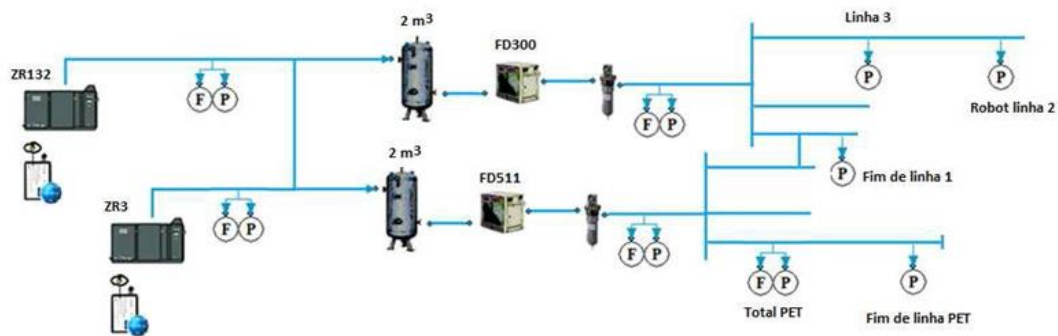
### 4.1. Descrição Sumaria do Sistema Ar Comprimido

A rede geral de ar comprimido de baixa pressão da unidade fabril que produz produtos alimentares, quer para o mercado interno quer para exportação, localizada num complexo industrial nos arredores de Lisboa, é constituída actualmente por 2 compressores de ar de parafuso isentos de óleo da marca Atlas Copco, ambos de tecnologia de velocidade fixa e controlo carga/vazio. Os compressores são comandados individualmente através do respetivo módulo de controlo, estando parametrizados em cascata, isto é, o compressor ZR132 de base e o compressor ZR3 a compensar, segundo o seguinte esquema de pressões:

- ZR132 -> pressão de carga 6,9 bar e pressão de vazio 7,5 bar.
- ZR3 -> pressão de carga 6,9 bar e pressão de vazio 7,3 bar.

Não existe qualquer interligação de comando entre os dois compressores, pelo que a regulação dos módulos, as variações de consumo da rede e a operação de cada compressor pode originar flutuações no valor da pressão, o que provoca arranques intempestivos no compressor de reserva e conseqüentemente um elevado número de arranques associados a perdas energéticas significativas. Cada compressor comprime para um reservatório de ar comprimido de 2 m<sup>3</sup>. Os dois reservatórios estão interligados entre si. O ar proveniente de cada reservatório é tratado através de dois secadores de ar de refrigeração do tipo FD511 e FD300, equipados na saída com um filtro de partículas do tipo PD375, da marca Atlas Copco e da marca Walker, respetivamente. O PDP nestas unidades estará compreendido entre os +1 e +10°C. Cada secador alimenta duas linhas distintas da rede, embora essas linhas se interliguem no interior da unidade fabril. Os condensados são encaminhados para o esgoto através de um sistema de purga mecânica accionada por boiador, (secadores, filtros, compressores e um dos reservatórios). O segundo reservatório está equipado com um purgador eficiente. Estes condensados não requerem qualquer tipo de tratamento pelo facto de se tratar de uma tecnologia de compressão isenta de óleo. O estudo incidiu sobre a rede geral da fábrica, em particular, para determinar a eficiência dos compressores, as perdas de carga ao longo dos coletores principais, as

fugas e a utilização final do ar comprimido. Para tal foram efetuados vários registos de pressão (P), caudal (F) e potência consumida pelos compressores.

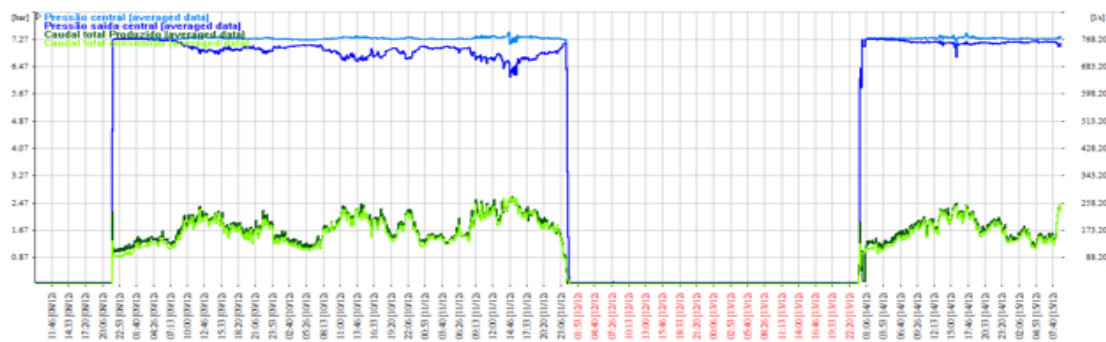


Designação	Nº Série
COMPRESSOR	ZR132
COMPRESSOR	ZR3
SECADOR	FD300
SECADOR	FD511

Figura 4.1 – Esquema Simplificado da Rede e Medições Efectuadas.

#### 4.2. Perfil Consumo de Ar Semanal /Produção

Devido à paragem da produção no feriado dia 8 de Dezembro, e por forma a garantir ao máximo uma semana típica de produção, o período de registo será considerado entre as 09h00 do dia 08 de Dezembro às 09h00 do dia 15 de Dezembro. O perfil de consumo de ar comprimido no período analisado é apresentado na Figura 4.2. Pretende-se nesta figura caracterizar a pressão na central e o caudal consumido.



	Mínimo	Máximo	Médio no período	Média em produção
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	4,7	7,3
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	4,4	6,9
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0,0	465	117	185
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0,0	330	110	176

Figura 4.2 – Caudal e pressão.

---

#### **4.2.1. Análise do Perfil de Consumo Semanal**

A análise do perfil de consumo de ar comprimido teve como base a semana de 08 a 15 de Dezembro.

##### **a) Pressão de Ar**

###### **a1) Pressão de Ar na Central**

A amplitude da pressão oscilou entre 0,0 e 7,6 bar sendo o valor médio registado de 4,7 bar, apresentando algumas oscilações que serão analisadas em pormenor nos pontos seguintes. O valor médio registado no período de 7 dias não é representativo do valor médio em produção, uma vez que este é afectado pelos períodos de paragem da central. Em produção normal, o valor médio situa-se em 7,3 bar.

###### **a2) Pressão de Ar à Saída da Central**

A amplitude da pressão oscilou entre 0,0 e 7,6 bar sendo o valor médio registado de 4,5 bar. Apesar do valor médio ser muito idêntico antes e após, as unidades de tratamento da central têm um desvio médio registado, em dia de produção, de cerca de 400 mbar. No entanto esse desvio acentua-se em determinados períodos, o que pode evidenciar uma oportunidade de melhoria e uma poupança energética relativa à eliminação de parte dessa perda de carga. Nos pontos seguintes será apresentado um estudo mais aprofundado sobre este factor.

##### **b) Caudal**

O caudal produzido na rede de ar comprimido apresenta um ligeiro desvio relativamente ao valor do consumo na rede. Este facto deve-se não só a erro normal entre os vários sensores usados na medição, mas também devido ao consumo de ar de purga nos reservatórios e secadores, assim como a fugas internas na central.

###### **b1) Caudal Produzido**

Registou-se uma produção de ar comprimido compreendido entre os 0 l/s e os 465 l/s, sendo o valor médio em 7 dias de produção de 117 l/s. O caudal médio registado entre as 00h00 do dia 09 e as 23h59 do dia 11 foi de 185 l/s, correspondendo a 3 dias de produção continua.

---

## **b2) Caudal Consumido**

Relativamente ao caudal consumido, este está compreendido entre os 0 l/s e os 330 l/s, sendo o valor médio em 7 dias de produção de 110 l/s. No entanto o valor médio não será representativo do perfil de consumo, visto existirem períodos de produção distintos com paragens inclusive. Deste modo torna-se interessante identificar o valor médio de consumo em alguns dos períodos distintos em dia de produção:

- Entre as 00h00 e as 08h00 do dia 11, correspondendo a um período de consumo baixo, o valor médio de caudal registado situa-se nos 160 l/s.
- Entre as 08h00 e as 13h30 do dia 11, o valor médio sobe para os 235 l/s.
- Entre as 13h30 e as 16h30 do dia 11, o valor médio assume o valor máximo do dia de produção, situando-se nos 260 l/s.

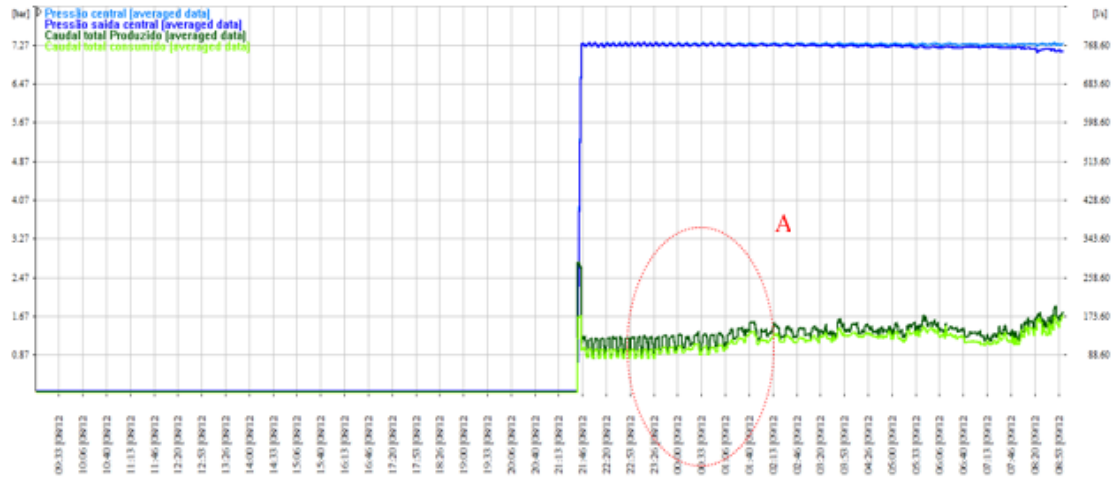
O caudal médio registado entre as 00h00 do dia 09 e as 23h59 do dia 11 foi de 176 l/s, correspondendo a 3 dias de produção continua.

### **4.2.2. Análise do Perfil de Consumo Diário**

Em seguida será apresentado o perfil diário de produção com base nas horas de trabalho semanais (168 horas / semana). As medições poderão apresentar um desvio relativamente a uma semana típica de consumo, visto ter-se efetuado o início do registo na semana do feriado de 08 de Dezembro. Para minimizar esse efeito, foi considerado o período entre as 09h00 do dia 08 de Dezembro às 09h00 do dia 15 como semana de referência, contrariamente ao que tipicamente se efectua, uma vez que o início dos registos são considerados a partir das 00h00.

#### **i) Análise do 1º dia – 09 horas de 3ª feira às 09 horas de 4ª feira**

A figura 4.3 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal produzido e pressão no 1º dia de registo.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	3,5
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	3,4
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0,0	278	68
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0,0	227	59

Figura 4.3 – Caudal e Pressão no 1º dia de registo.

Pode-se verificar através da análise do gráfico que o arranque da instalação, após o feriado, aconteceu às 21h38 do dia 08 de Dezembro, sendo possível observar um pico de consumo relativo à pressurização da rede. O consumo de ar estará compreendido entre os 90 e os 170 l/s, apresentando um aumento mais significativo a partir das 00h00 do dia 09-Dezembro. Através do registo “A” pretende-se verificar em pormenor o perfil de operação dos compressores para garantir o consumo de ar referido.

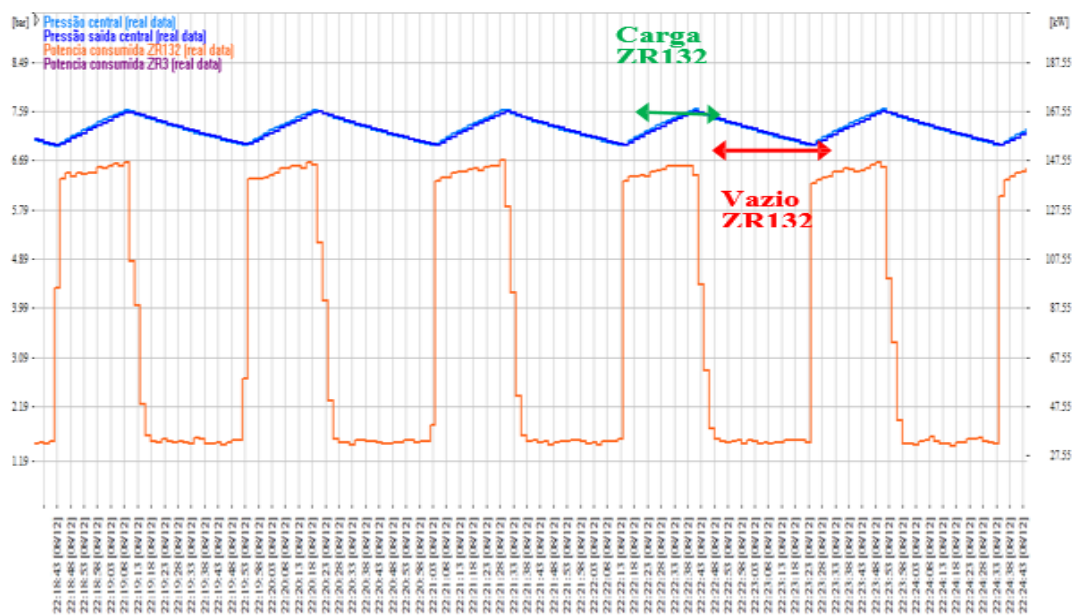
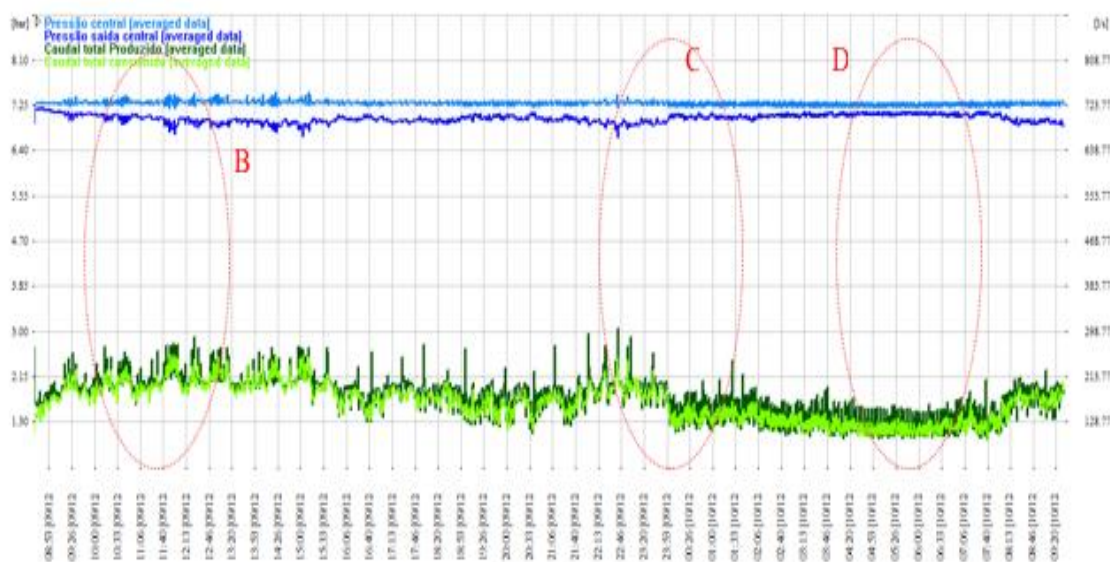


Figura 4.4 – Registo A – Perfil de Operação de Arranque da Instalação.

Pode-se verificar que para o caudal requerido na instalação, o compressor em operação está muito sobre-dimensionado, originando períodos cujos tempos de vazio correspondem a mais de 50% da totalidade das horas de operação. Este factor origina perdas energéticas significativas. O compressor ZR132, equipamento em operação de base, apresenta um consumo energético em vazio de cerca de 30 KW. Mesmo com a utilização do ZR3, equipamento de menor capacidade, obter-se-ia um melhor rácio de horas de carga/horas de operação, mas com um elevado número de horas de vazio. Outro factor observado foram os ciclos de carga/vazio com uma frequência praticamente constante até às 00h00, cujo valor médio de ar produzido é de cerca de 100 l/s podendo evidenciar caudal de fugas, ou processos que ficam permanentemente interligados à rede, mesmo que em determinados períodos da produção estejam parados, podendo o seccionamento desses processos da rede permitir uma redução do consumo de ar e consequentemente uma redução do consumo energético.

#### ii) Análise do 2º dia – 09 horas de 4ªfeira às 09 horas de 5ªfeira

A figura 4.5 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 2º dia de registo.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	6,9	7,6	7,3
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	6,6	7,4	7,0
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	7	277	175
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	50	266	165

Figura 4.5 – Caudal e Pressão no 2º dia de registo.

Pode-se verificar através do gráfico do segundo dia de registo e comparando com o dia anterior, que o perfil de consumo de ar na rede é muito variável, sendo possível identificar quatro períodos distintos:

- Das 08h00 às 16h00 correspondendo ao período de maior consumo, o consumo medio será de 220 l/s.
- Das 16h00 às 21h30 o consumo diminui ligeiramente para cerca de 185 l/s de valor médio.
- Das 21h30 às 23h59 verifica-se novamente um aumento no consumo para um valor médio que ronda os 205 l/s.

Entre as 00h00 irá diminuir novamente para o valor médio de 115 l/s.

Foram seleccionados três períodos distintos para uma análise mais aprofundada do perfil de operação dos compressores.

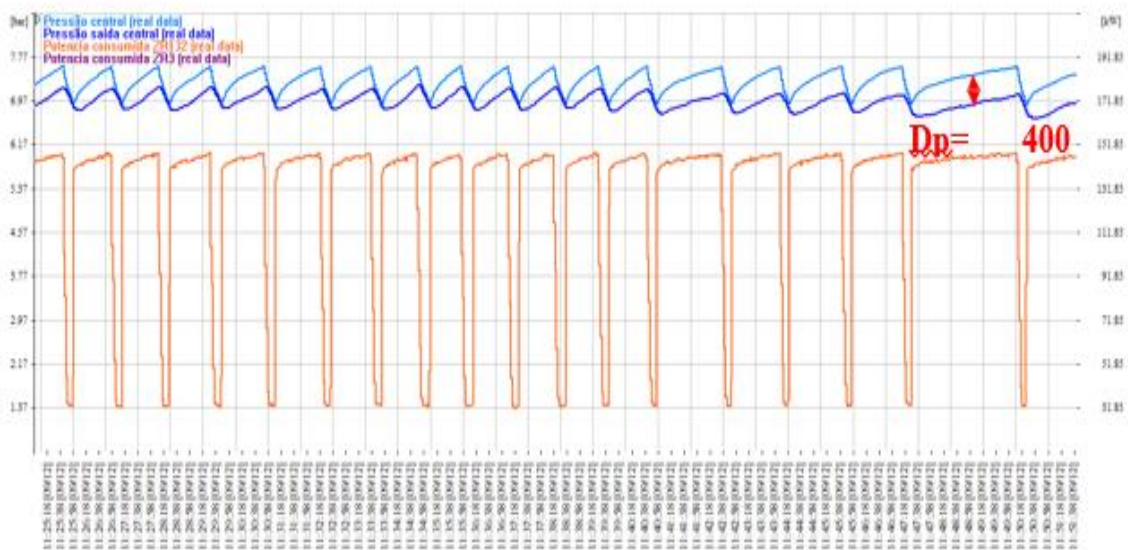


Figura 4.6 – Registo B – Perfil de Operação entre as 09h00 e as 16h00.

Pode-se verificar que apesar do consumo na rede neste período ter aumentado significativamente, o equipamento ZR132 continua a apresentar ciclos de vazio repetitivos, o que significa que mesmo nestes casos continua sobredimensionado para as necessidades, não sendo no entanto tão ineficiente quando comparado com o período anteriormente analisado. A perda de carga registada (400 mbar) corresponde a um valor aceitável para a tecnologia de secagem e filtragem instalados. No entanto utilizando outra tecnologia de secagem, em que a perda de carga seria desprezível, iria obter-se poupanças superiores a 2%.

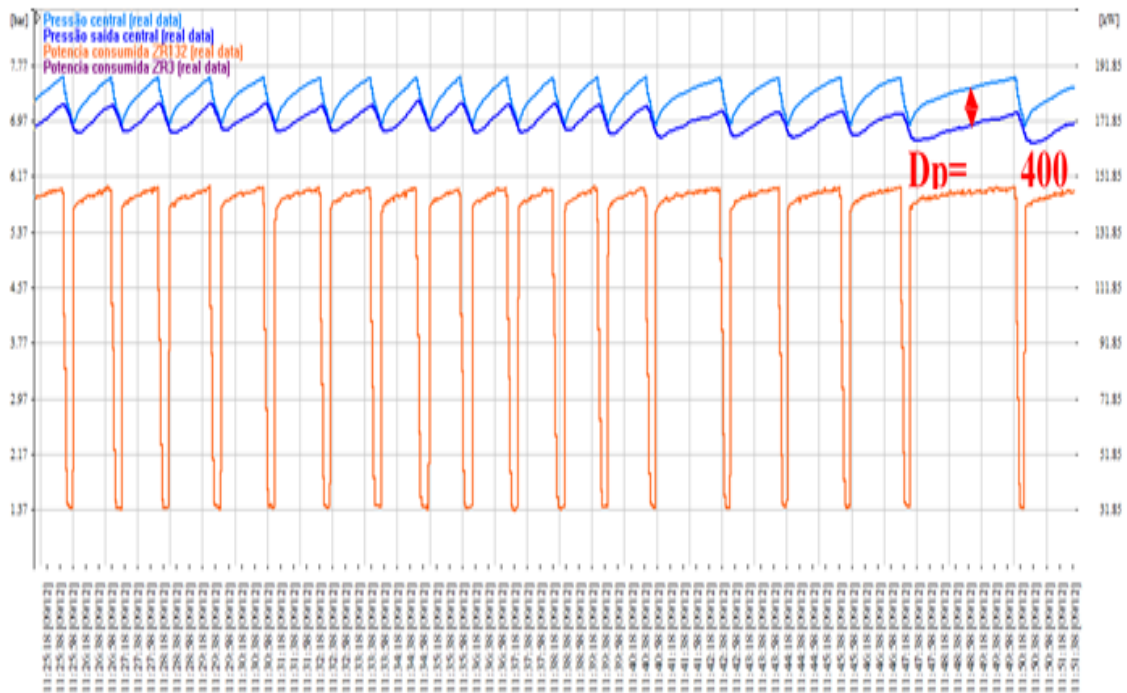


Figura 4.7 – Registo C – Perfil de Operação na transição entre dia 09 e 10 de Dezembro.

Pode-se observar que a partir das 23h50 o perfil de operação do compressor apresenta uma tendência de alteração, em particular, o tempo de carga tende a diminuir comparativamente ao tempo de vazio, evidenciando que o compressor estará novamente sobredimensionado para o consumo requerido. A tendência caminha para que as horas de vazio representem 50% das horas de operação.

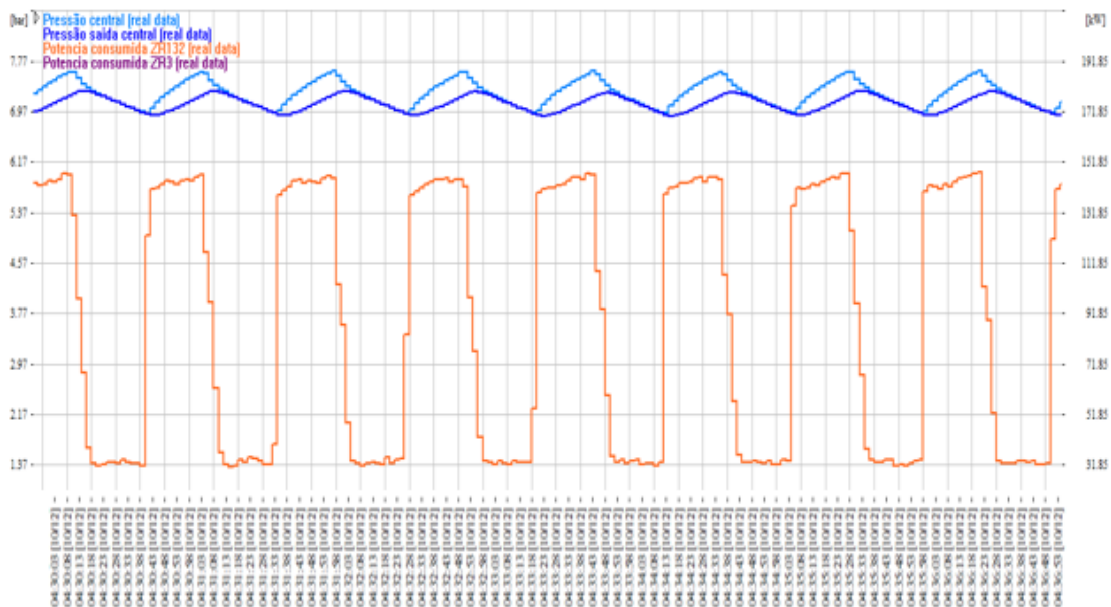


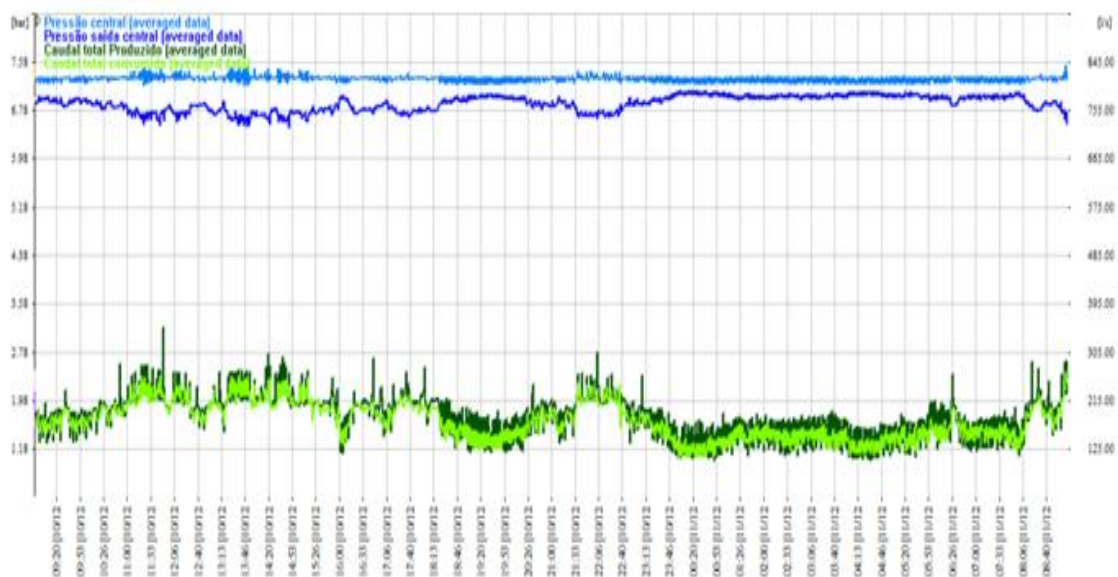
Figura 4.8 – Registo D – Perfil de Operação entre as 00h00 e as 08h00.

Pode-se observar que no período entre as 00h00 e as 08h00, o consumo de ar diminui progressivamente, atingindo valores em que o compressor ZR132 irá apresentar horas de vazio superiores a 50% das horas de carga.

Estes períodos têm uma duração de 8 horas diárias, que originam mais de 4 horas em vazio (ignorando outros pequenos períodos que também apresentam um perfil semelhante).

### iii) Análise do 3º dia – 09 horas de 5ªfeira às 09 horas de 6ªfeira

A figura 4.9 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 3º dia de registo.



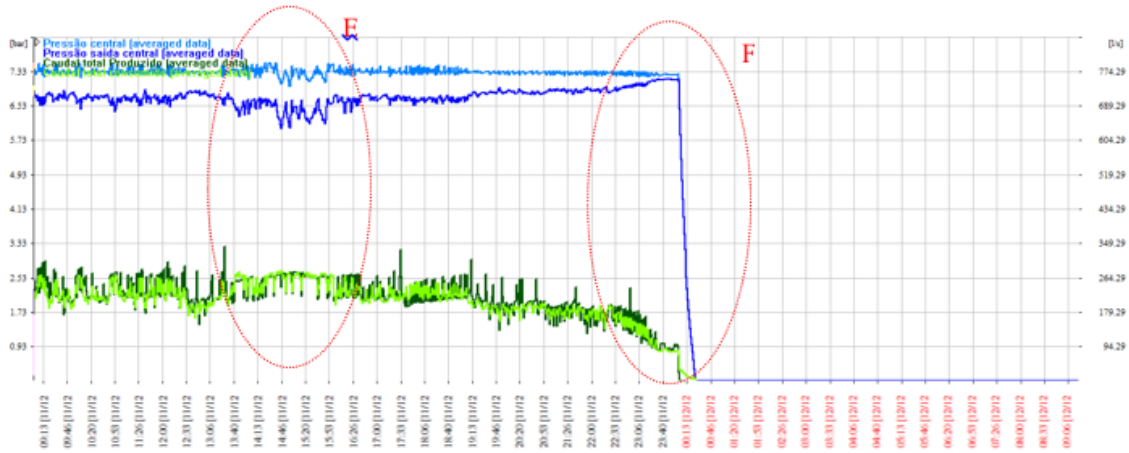
	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	6,9	7,6	7,3
<b>PRESSÃO SAIDA CENTRAL (bar)</b>	6,4	7,4	6,9
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	7	278	186
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	57	268	177

Figura 4.9 – Caudal e Pressão no 3º dia de registo.

Comparativamente com o dia anterior, a variação do perfil de consumo de ar é muito semelhante, tendo-se verificado um ligeiro aumento no consumo médio na rede (superior a 10 l/s). Verifica-se também a perda de carga de 400 mbar nos períodos de maior consumo.

#### iv) Análise do 4º dia – 09 horas de 6ªfeira às 09 horas de Sábado

A figura 4.10 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 4º dia de registo.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	6,7
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,4	4,3
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0,0	465	138
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0,0	330	133

Figura 4.10 – Caudal e Pressão no 4º dia de registo.

A análise do gráfico, permite-nos concluir que a produção parou às 00h00 de sábado, tendo os compressores sido desligados e a rede totalmente despressurizada.

Pode-se também verificar que a produção apresentou um acréscimo no consumo comparativamente com os dias anteriores, o que originou um aumento na perda de carga e a respetiva oscilação na pressão da rede.

Os registos “E” e “F” permitem uma análise mais pormenorizada desses dois períodos.

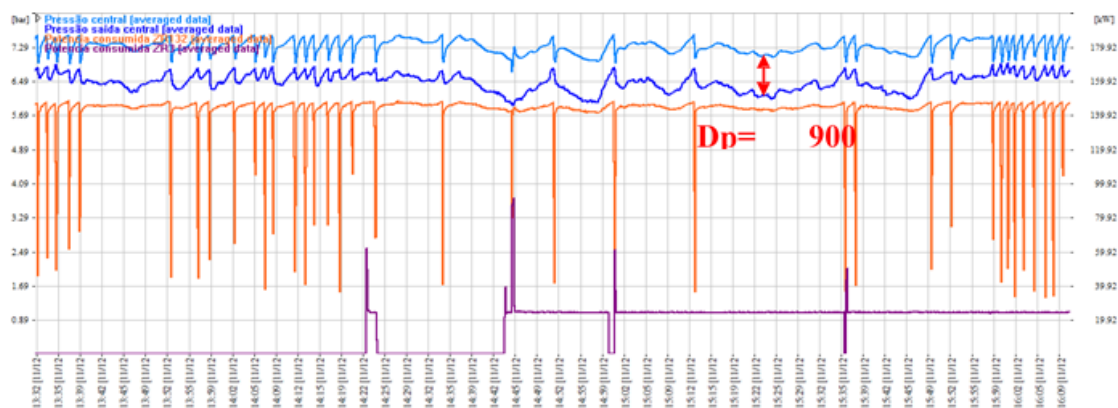


Figura 4.11 – Registo E – Período de Maior Consumo.

Pode-se observar alguns períodos onde o consumo de ar na rede, em média, correspondeu à capacidade máxima do ZR132, originando não só oscilações atípicas da pressão da rede, assim como, uma maior perda de carga nas unidades de tratamento de ar da central, tendo o valor dessa perda de carga aumentado de 400 mbar para cerca de 900 mbar.

Verificou-se também que o compressor de reserva estaria parado manualmente, tendo sido colocado em operação no dia 11 às 11h22, permanecendo praticamente a totalidade do período em vazio. Constatou-se vários arranques na sua maioria intempestivos, originados pela regulação da pressão no respetivo módulo e influenciados pela perturbação na pressão, devido aos ciclos de vazio do compressor de base. Uma regulação em cascata devidamente parametrizada poderá reduzir estes arranques intempestivos e respetivas horas de vazio no compressor ZR3, no entanto, obrigaria a um aumento da pressão de regulação do compressor de base, dando origem a perdas que em média representariam cerca de 7% por cada bar.

Para a tecnologia de arranque e potência dos compressores envolvidas, a cascata na regulação teria que ter seguramente pelo menos 1 bar de diferença, para se assegurar que a reserva permanecia em standby. No início do período, estes arranques não ocorriam, o que nos leva a concluir que previsivelmente o compressor de reserva estaria desligado. Esta acção poderá evitar as perdas inerentes às horas de vazio deste compressor mas, por outro lado, não será possível garantir a continuidade de produção em caso de avaria do compressor de base.

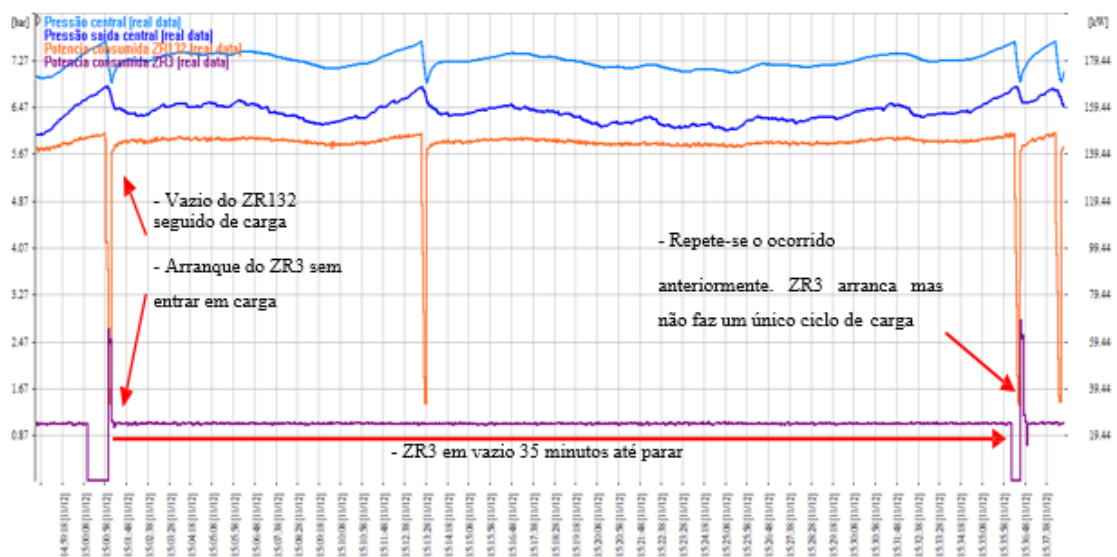


Figura 4.12 – Registo E - Período de Maior Consumo (zoom).

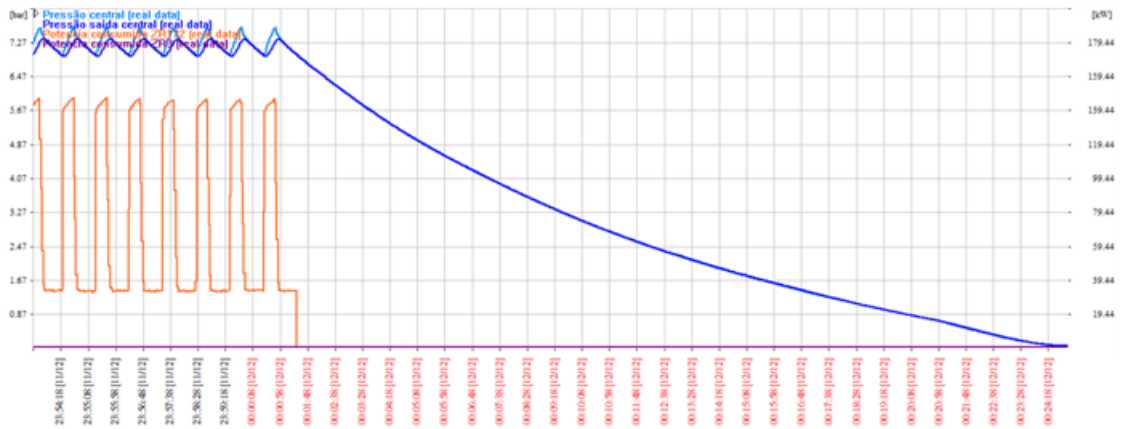
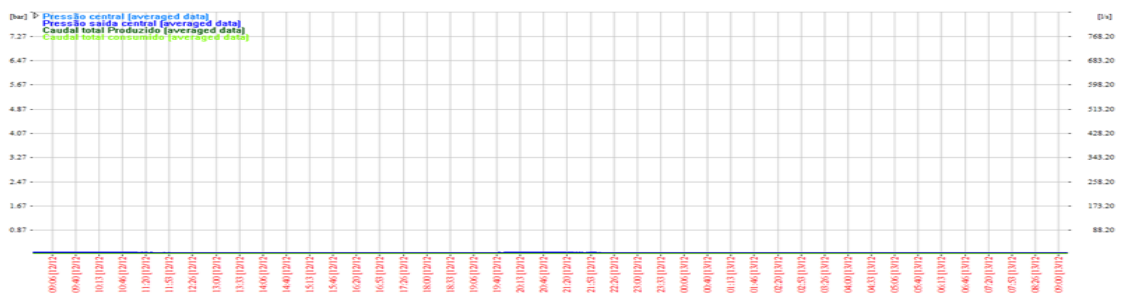


Figura 4.13 – Registo F – Paragem da Produção Semanal.

Através da análise do gráfico do registo F, podemos observar o instante em que os compressores são desligados, depressurizando a rede. O caudal imediatamente antes da paragem dos compressores seria em média próximo dos 85 l/s, esse valor é muito semelhante ao do registado no dia 7 de Dezembro às 16h35, período esse em que garantidamente toda a produção estava parada, tendo sido efectuado o teste de operação do compressor ZR3 imediatamente antes da paragem da central de refrigeração. Este valor reforça a ideia anteriormente mencionada, da possibilidade de fugas na instalação e/ou processos que consomem continuamente ar comprimido, mesmo quando parados ou em standby.

**v) Análise do 5º dia – 09 horas de Sábado às 09 horas de Domingo**

A figura 4.14 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 5º dia de registo.



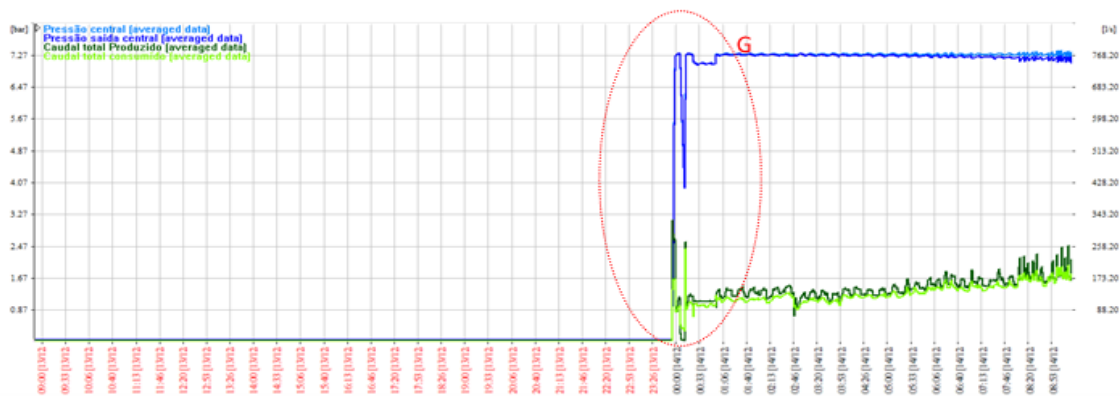
	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>PRESSÃO SAIDA CENTRAL (bar)</b>	0,0	0,0	0,0
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0	0	0
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0	0	0

Figura 4.14 – Caudal e Pressão no 5º dia de registo.

A instalação esteve parada na totalidade do período.

## vi) Análise do 6º dia – 09 horas de Domingo às 09 horas de 2ª feira

A figura 4.15 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 6º dia de registo.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	2,8
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	2,7
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0	463	60
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0	262	52

Figura 4.15 – Caudal e Pressão no 6º dia de registo.

Através da análise do gráfico da figura anterior, verifica-se o arranque da instalação às 23h53 de domingo. A tendência de consumo da rede é bastante semelhante ao verificado no arranque da instalação no dia 08 (perfil de transição de paragem para produção).

Durante o arranque da instalação, ocorreram duas avarias que provocaram a paragem do compressor ZR132, dando origem a perturbações na pressão da rede.

Através do registo “G” pretende-se demonstrar em pormenor o arranque da instalação e as perturbações ocorridas.

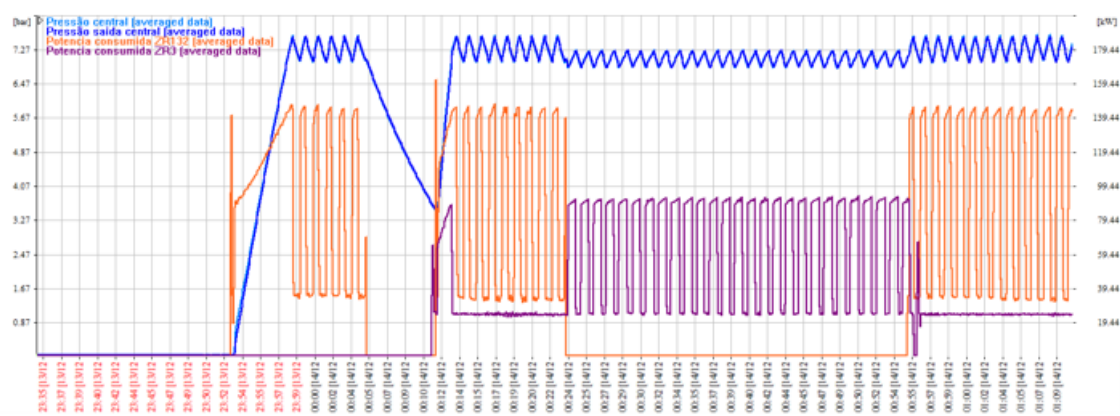


Figura 4.16 – Registo G – Arranque da Instalação.

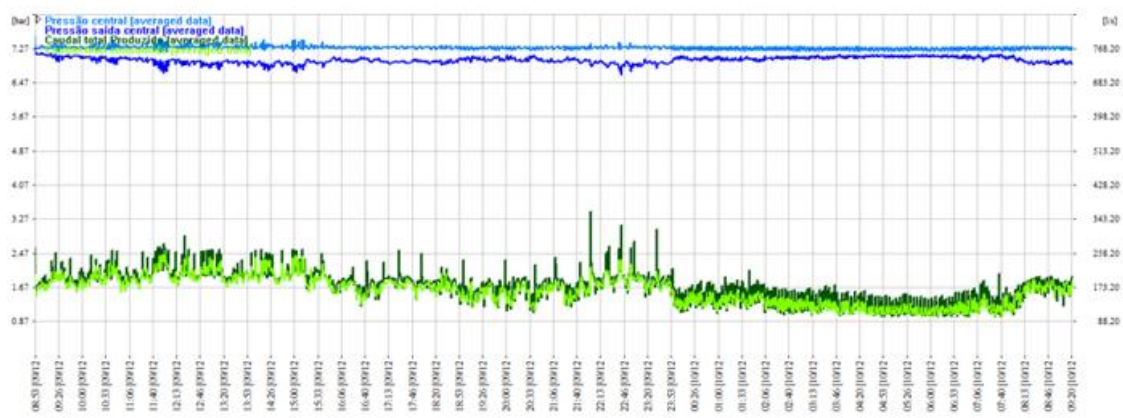
Através da análise do gráfico pode-se identificar claramente o arranque da central às 23h53, seguido de uma paragem intempestiva do compressor de base (ZR132) às 00h05. Como o compressor de reserva estava parado em manual, este não arranca levando a uma diminuição da pressão na rede de forma repentina. Em produção normal, o comando manual da reserva pode originar perdas de produção por diminuição da pressão na rede. A avaria foi rearmada e o compressor de reserva colocado também em operação cerca de 5 minutos após a paragem do ZR132. Para o perfil de consumo, o compressor de base ficou com ciclos de carga/vazio repetitivos e o compressor de reserva permanentemente em vazio.

Às 00h24 ocorreu nova paragem do compressor ZR132, ficando neste caso o compressor de reserva em operação.

Às 00h55 o compressor ZR132 foi rearmado, ficando o restante período em operação simultaneamente com o ZR3, originando perdas energéticas e um acumular de horas em vazio.

#### vii) Análise do 7º dia – 09 horas de 2ªfeira às 09 horas de 3ª feira

A figura 4.17 apresenta, em pormenor, o perfil do caudal total e pressão no 7º dia de registo.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	6,8	7,6	7,3
<b>PRESSÃO SAÍDA CENTRAL (bar)</b>	6,6	7,5	7,0
<b>CAUDAL TOTAL PRODUZIDO (l/s)</b>	0	464	187
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	53	265	179

Figura 4.17 – Caudal e Pressão no 7º dia de registo.

Pode-se observar que o consumo na rede, tendencialmente estará de acordo com o que havia sido registado anteriormente nos dias úteis, sendo possível identificar algumas semelhanças com os períodos de produção anteriormente identificados.

Relativamente a este dia, o compressor ZR3 esteve em operação, contrariamente ao que se havia registado anteriormente. Pode-se identificar tal comportamento através da análise do gráfico seguinte.

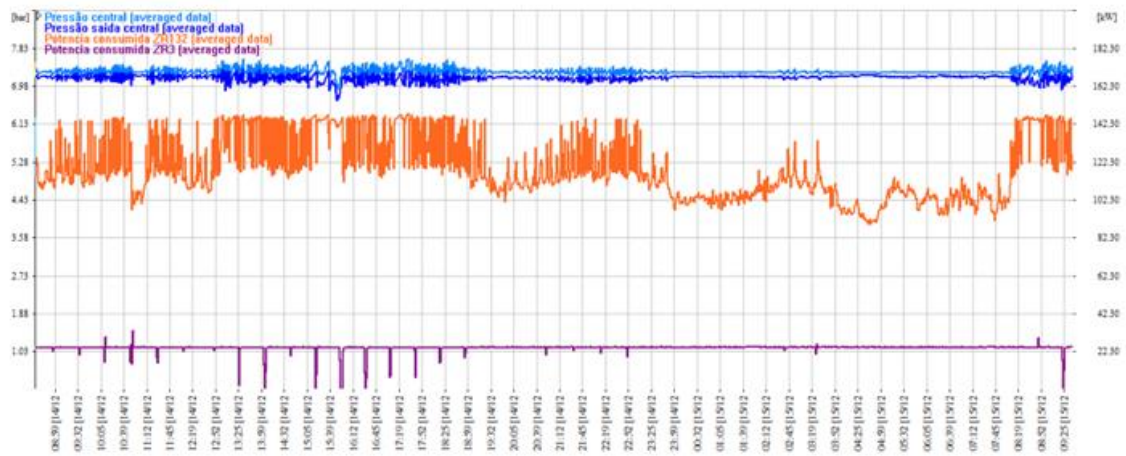


Figura 4.18 – Perfil de Operação dos Compressores 7º dia de registo.

O compressor de base (ZR132) está em operação com ciclos de carga/vazios repetitivos e o compressor ZR3 permanece em vazio praticamente a totalidade do período.

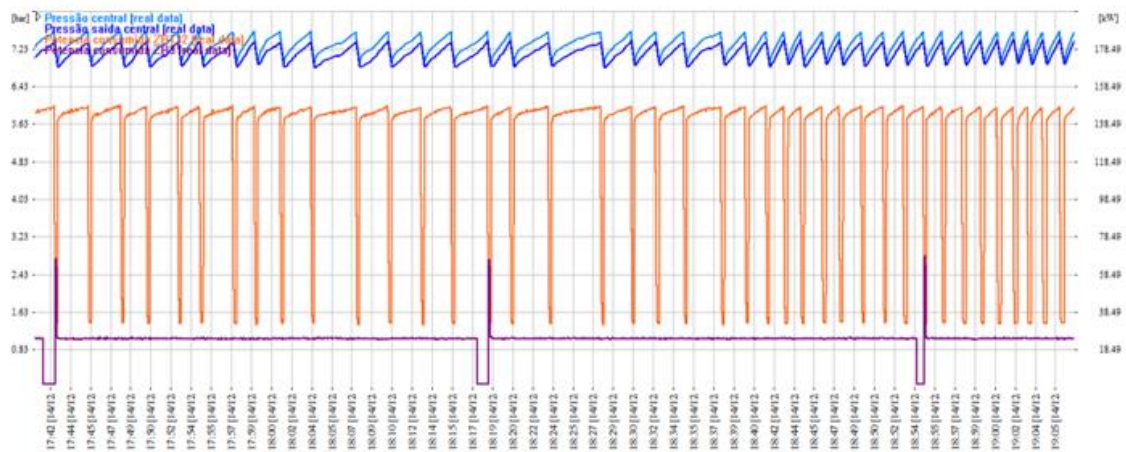


Figura 4.19 – Perfil de Operação dos Compressores 7º dia de registo (zoom).

Uma análise em pormenor, permite-nos observar que o comportamento de operação do compressor de reserva se mantém praticamente inalterado, relativamente ao registo efetuado na sexta-feira, em que este arrancava intempestivamente devido à perturbação na pressão da rede, devido aos ciclos de vazio do compressor de base, e permanecia a totalidade do período de operação em vazio, estado esse que origina elevadas perdas energéticas.

### 4.2.3. Análise de caudais relativos

Conforme descrito no início do presente estudo, a central de ar comprimido tem duas saídas distintas que alimentam a produção, estando cada linha equipada com o respetivo secador e filtro de linha. Deste modo, o caudal consumido será relativo ao somatório de ambas, sendo interessante para análise de perdas de carga, a sua possível análise individual.

Também foi efectuada uma medição local do caudal de alimentação à instalação do PET. Os pontos seguintes pretendem demonstrar individualmente o consumo em cada linha de saída da central e linha do PET, tecendo-se alguns comentários relativos aos seus comportamentos de consumo de ar.

#### i) Perfil de consumo linha relativa ao FD300 e FD511

A figura 4.20 apresenta, em pormenor, o perfil de consumo da linha de ar proveniente do secador de refrigeração do tipo FD300 e do tipo FD511.



	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,6	4,7
<b>PRESSÃO SAIDA LINHA FD300 (bar)</b>	0,0	7,6	4,4
<b>PRESSÃO SAIDA LINHA FD511(bar)</b>	0,0	7,6	4,5
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0	325	88
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0	126	22

Figura 4.20 – Perfil de Consumo por Linha.

Pode-se claramente verificar que o caudal consumido foi alimentado em períodos distintos, através das duas linhas ou somente através da linha do FD300, podendo-se verificar a influência desse facto na perda de carga na rede. Este factor indica a possibilidade de existirem problemas na unidade de secagem que estejam a provocar

o seu congelamento e tamponamento do permutador, causando a sua obstrução, pelo que, por questões de fiabilidade deve ser inspecionado.

Em termos de perda de carga, esta aumenta de forma acentuada quando se alimenta a rede de ar comprimido a partir de uma só linha.

Os dois gráficos que se seguem pretendem demonstrar esses dois perfis distintos, com a respetiva identificação das perdas de carga máximas registadas. No primeiro caso pode-se verificar a influência da avaria na unidade de secagem FD511 ou filtragem associada, que obrigou a que o secador FD300 e respetiva filtragem tratassem a totalidade do ar fornecido à rede.

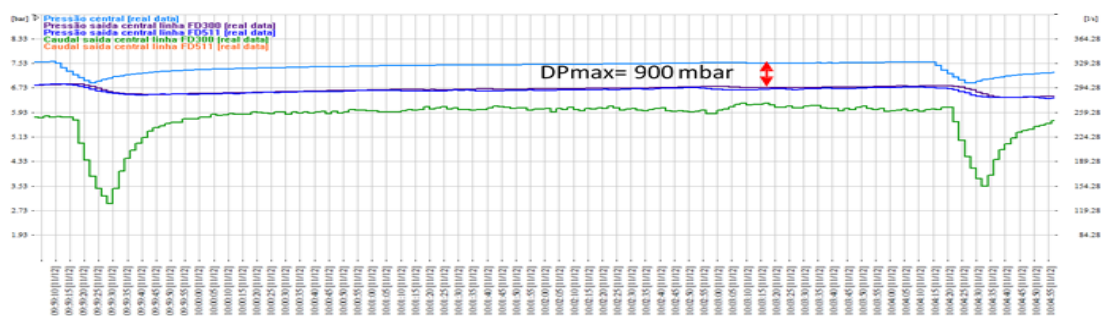


Figura 4.21 – Período somente com Linha do FD300.

Neste segundo gráfico, pode-se verificar a existência de caudal através da linha do secador FD511. Consequentemente a perda de carga da central para o colector principal diminui cerca de 500 mbar.

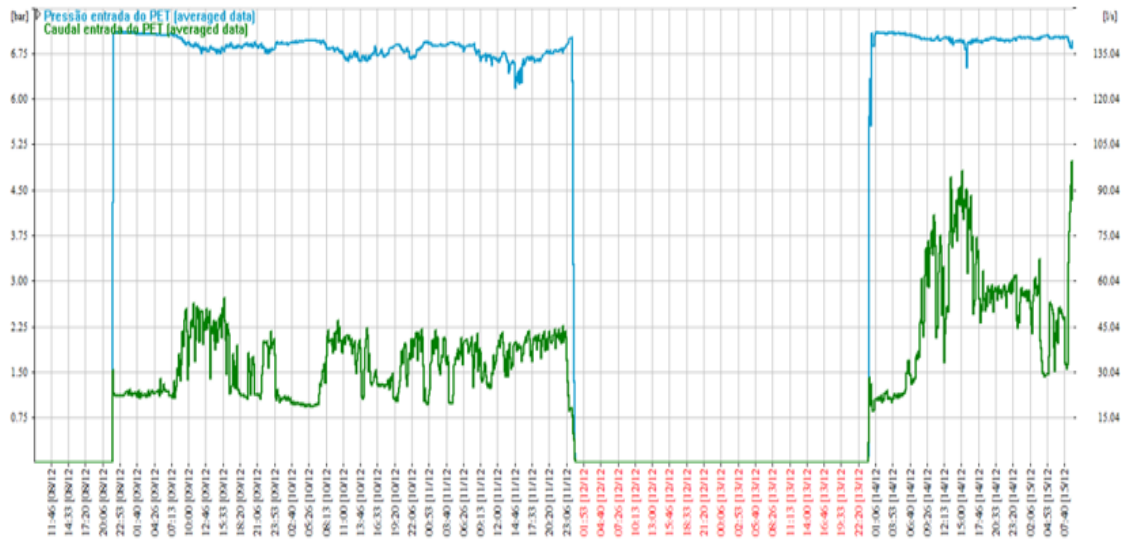
Existe uma outra questão interessante, à saída da central as pressões apresentam um ligeiro desvio entre ambas, o que também evidencia que a interligação entre redes no interior da fábrica esteja subdimensionada. Os consumidores alimentados pela rede do FD300 representam em média, nos períodos de maior consumo, cerca de 60 % do consumo, sendo os restantes 40 % tratados pela linha do FD511, podendo também contribuir para o desvio verificado.



Figura 4.22 – Período somente com Linha do FD511.

## ii) Perfil de Consumo Linha PET

A figura 4.23 apresenta, em pormenor, o perfil de consumo da linha de ar que alimenta o PET.



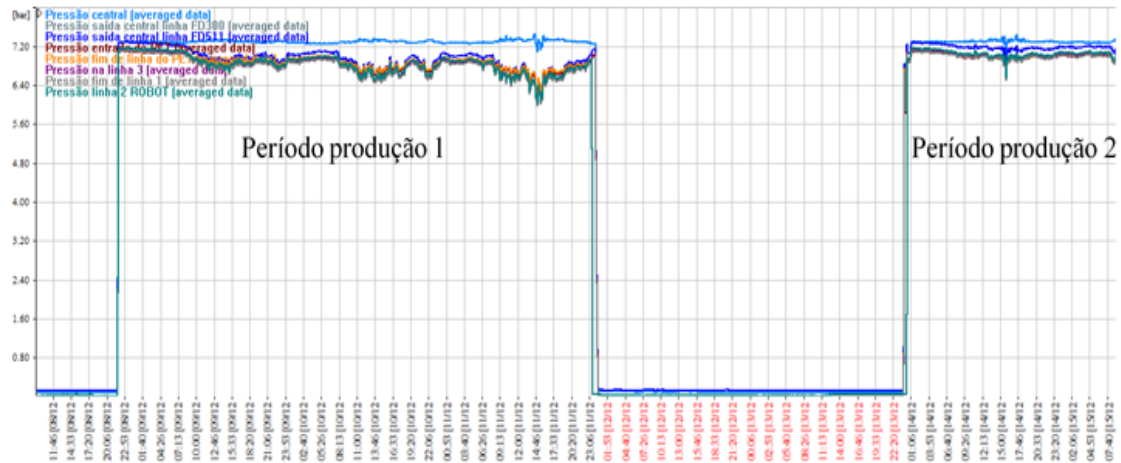
	Mínimo	Máximo	Médio
<b>PRESSÃO CENTRAL (bar)</b>	0,0	7,4	4,4
<b>CAUDAL TOTAL CONSUMIDO (l/s)</b>	0	126	24

Figura 4.23 – Perfis de Consumo Linha do PET.

O perfil de consumo de ar comprimido da rede do PET apresenta grandes oscilações ao longo da semana de produção, tendo-se registado valores médios que variam entre 20 l/s e os 90 l/s. Pode-se também verificar que o perfil de consumo aumentou significativamente na semana 51 quando comparado com os dias de produção na semana 50. Relativamente à pressão na rede, esta tendencialmente acompanha a pressão de saída da central, sendo a sua amplitude analisada mais pormenorizadamente no ponto seguinte.

#### 4.2.4. Análise de Pressões ao Longo da Rede

Foram efetuados 8 pontos de registo de pressão distintos ao longo da instalação, permitindo mapear as perdas de carga nos colectores principais.



	Médio	Período produção 1	Período produção 2
<b>PRESSÃO NA CENTRAL (bar)</b>	4,7	7,3	7,3
<b>PRESSÃO SAIDA CENTRAL LINHA FD300 (bar)</b>	4,4	6,9	7,0
<b>PRESSÃO SAIDA CENTRAL LINHA FD511 (bar)</b>	4,5	7,0	7,2
<b>PRESSÃO ENTRADA PET (bar)</b>	4,4	6,8	7,0
<b>PRESSÃO FIM DE LINHA DO PET (bar)</b>	4,4	6,9	7,0
<b>PRESSÃO LINHA 3 (bar)</b>	4,4	6,8	7,0
<b>PRESSÃO FINAL LINHA 1 (bar)</b>	4,4	6,8	7,0
<b>PRESSÃO LINHA 2 ROBOT (bar)</b>	4,4	6,8	7,0

Figura 4.24 – Pressões na Rede.

Através da análise do gráfico de pressões, podemos concluir que os valores de perda de carga variam, sendo de interesse o estudo particular dos dois períodos de produção assinalados no gráfico.

## i) Período de Produção 1

A figura 4.25 apresenta, em pormenor, as pressões na rede no período de produção 1 apresentado no gráfico.



Figura 4.25 – Pressões Período de Produção 1.

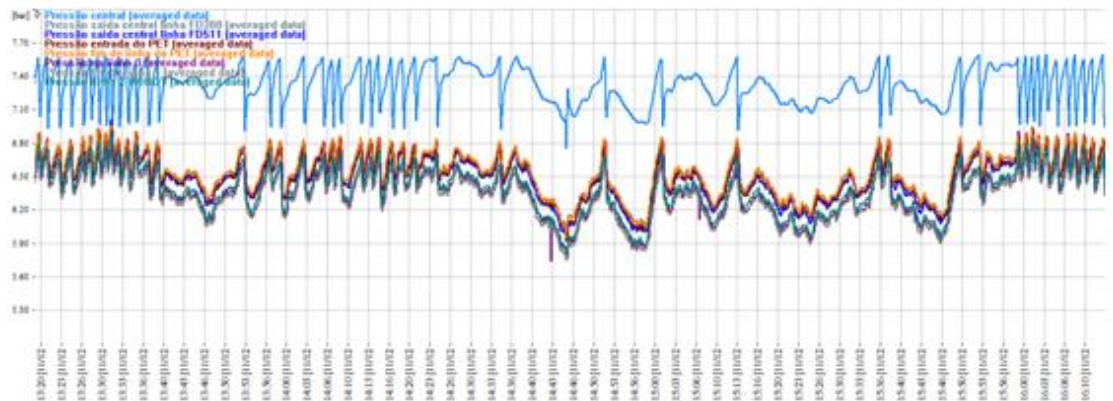


Figura 4.26 – Pressões Período de Produção 1 (zoom).

Pode-se observar através do gráfico pormenorizado, que as perdas de carga ao longo dos colectores principais não são significativas (cerca de 100 mbar), verificando-se sim um valor elevado de amplitude de queda de pressão nos secadores e unidades de filtragem instalados na central.

Existe um potencial de redução com a anulação dessas perdas de carga de cerca de 1bar, sendo que para isso será necessário ter ambos os secadores em operação normal, reformulando alguns troços de tubagem da central que apresentam restrições e sobredimensionamento das unidades de filtragem. No entanto, atendendo à idade dos equipamentos e ao tipo de gás de refrigeração (R22 em ambas), a solução tecnicamente mais vantajosa poderá passar por um sobredimensionamento das unidades de secagem e filtragem da linha, instalando equipamentos mais eficientes e que não contenham gases florados com efeito de estufa. O potencial poderá ser

superior, se for considerado que a regulação do compressor estará para uma pressão média de 7,4 bar e a instalação atinge mínimos cujo valor ronda os 6 bar, mas para isso, poderá ser também necessário a reformulação do controlo da reserva e da tecnologia de compressão instalada. As perdas de carga na central neste período são superiores quando comparadas com o segundo período, estando diretamente relacionado com a anomalia descrita na unidade de secagem/tratamento. A totalidade do ar estava a ser tratada somente na linha do FD300 conforme se pôde verificar nos registos de caudal efetuados à saída da central.

## ii) Período de Produção 2

A figura 4.27 apresenta, em pormenor, as pressões na rede no período de produção 2 apresentado no gráfico.

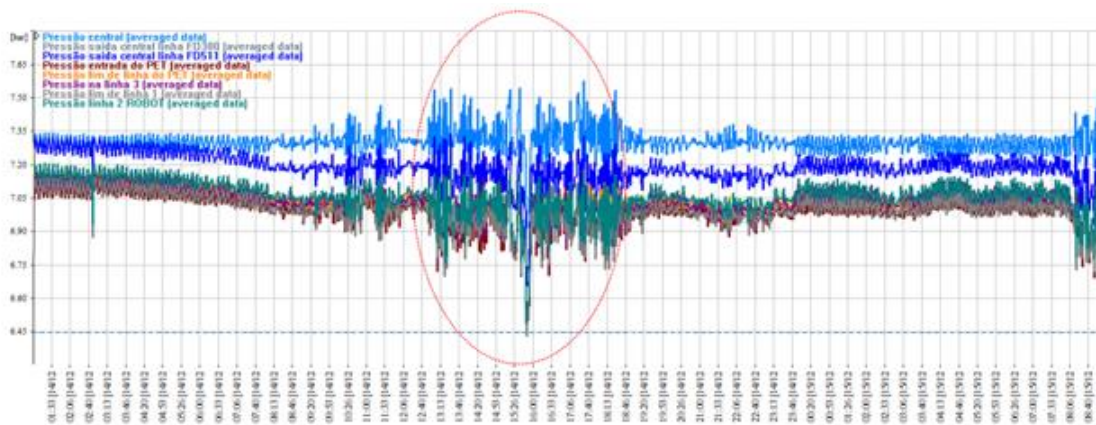


Figura 4.27 – Pressões Período de Produção 2.

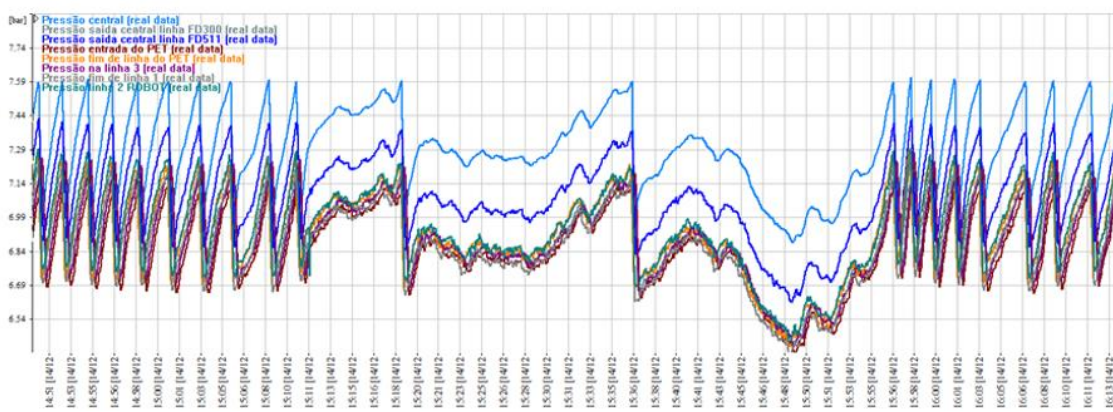


Figura 4.28 – Pressões Período de Produção 2 (zoom).

Pode-se observar através do gráfico pormenorizado, que as perdas de carga ao longo dos colectores principais não são significativas (inferior a 100 mbar), sendo que relativamente à central melhorou significativamente, tendo-se registado uma perda de carga máxima de cerca de 400 mbar.

Verificou-se também que para determinados instantes a pressão cai para cerca de 6,5 bar sem que tenham ocorrido paragens na produção, reforçando a ideia do potencial na redução da pressão da rede em cerca de 500 mbar e consequentemente uma redução do consumo energético.

### 4.3. Análise dos Equipamentos Instalados

#### 4.3.1. Análise dos Compressores

As unidades do tipo ZR são compressores de parafuso rotativo, isentos de óleo, de dois estágios de compressão, arrefecidos a água. O bloco compressor é constituído por dois estágios individuais de compressão, baixa e alta pressão, acionados por um motor eléctrico, através de uma roda dentada. Cada elemento compressor é constituído por um par de rotores do tipo parafuso, que através de um sistema composto por anéis vedantes, garante que o interior da câmara de compressão não entra em contacto com qualquer tipo de óleo proveniente do sistema de lubrificação, assegurando um ar de entrega à rede 100% isento de óleo. Os rotores macho e fêmea são sincronizados por engrenagens que evitam que se toquem mantendo uma folga calculada entre rotores, com o acumular dos anos de operação, esta folga tende a aumentar o que implica uma perda de eficiência do elemento compressor, então consome-se mais energia por litro de ar comprimido produzido. Quando a perda de eficiência ultrapassa os 10%, esse elemento deve ser substituído.



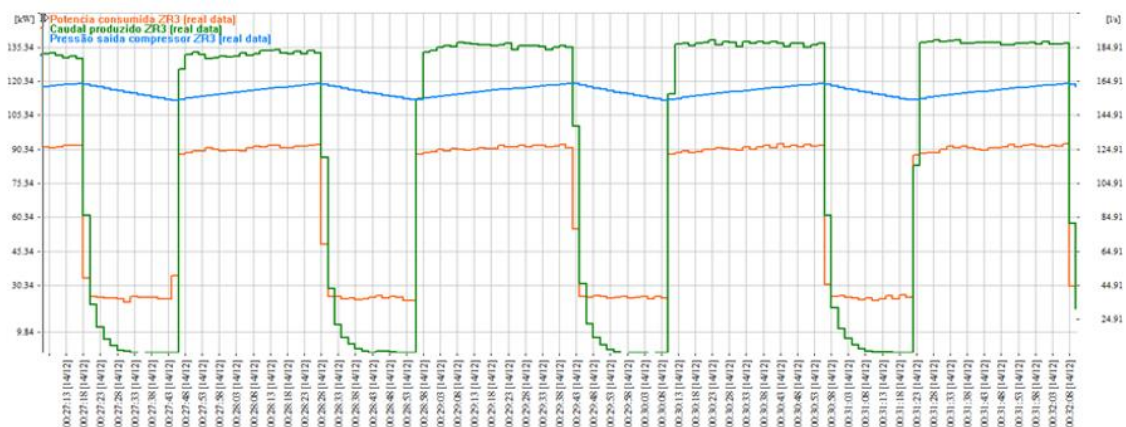
Figura 4.29 – Compressor ZR.

### i) Compressor ZR3

É uma máquina com cerca de 25 anos de operação e de comando eletrónico MK4 (alteração efectuada à posteriori). Tem um caudal máximo de 227 l/s a uma pressão de entrega efectiva de 7 bar. É composto por um sistema de refrigeração a água. O SER teórico ao veio deste equipamento seria 382 J/l a 7 bar.

O equipamento encontrou-se desligado manualmente num determinado período, tendo sido colocado em operação a partir do dia 11 de Dezembro às 14h20. À data do registo de dados, o equipamento tinha 127.038 horas totais de funcionamento, existindo relatórios técnicos a informar da necessidade de substituição de elementos de compressão, devido a perdas de eficiência acentuadas.

O gráfico seguinte apresenta os dados registados individualmente para o compressor ZR3, do qual se pode calcular o SER medido, e com base nesse dado determinar a eficiência do equipamento comparativamente com os dados de fábrica disponíveis.



	Carga	Vazio
Potencia Consumida (KW)	92	25
Caudal produzido (l/s)	185	0
Pressão média de teste (bar)	7,0	

Figura 4.30 – Gráfico de Eficiência do Compressor ZR3.

Verifica-se através dos dados recolhidos que o SER do equipamento rondará os 497 J/l, valor esse cerca de 30% acima do valor espectacular para este compressor. Este factor evidencia a necessidade de manutenção urgente, contemplando uma possível substituição de ambos os elementos de compressão.

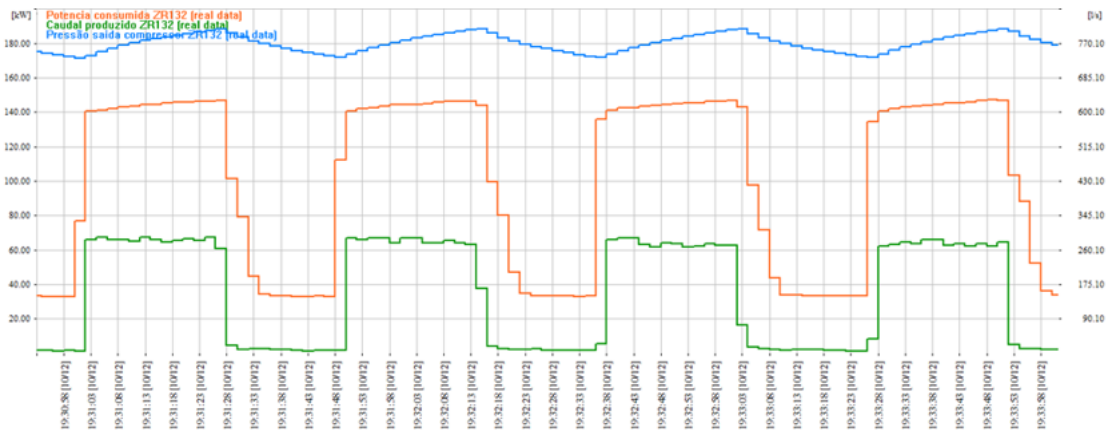
## ii) Compressor ZR132

É uma máquina com 20 anos de operação e de comando eletrónico MK4 (montado à posteriori). Tem um caudal máximo de 309 l/s a uma pressão de entrega efectiva de 7 bar. É composto por um sistema de refrigeração a água. O SER teórico ao veio deste equipamento seria 376 J/l a 7,4 bar.

Este equipamento encontra-se a operar de base.

À data do registo de dados, o equipamento tinha 118.890 horas totais de funcionamento, existindo relatórios técnicos a informar da necessidade de substituição de elementos de compressão, devido a perdas de eficiência acentuadas.

O gráfico seguinte apresenta os dados registados individualmente para o compressor ZR132, do qual se pode calcular o SER medido, e com base nesse dado determinar a eficiência do equipamento comparativamente com os dados de fábrica disponíveis.



	Carga	Vazio
Potencia Consumida (KW)	140	32
Caudal produzido (l/s)	275	0
Pressão média de teste (bar)	7,4	

Figura 4.31 – Gráfico de Eficiência do Compressor ZR132.

Verifica-se através dos dados recolhidos que o SER do equipamento rondará os 509 J/l, valor esse cerca de 35% acima do valor espectável para este compressor. Este factor evidencia a necessidade de manutenção urgente, contemplando uma possível substituição de ambos os elementos de compressão.

### 4.3.2. Horas de Operação no Período de Registo

As horas de operação em carga ou vazio e os tempos de paragem são valores importantes na avaliação do desgaste das máquinas, na distribuição de cargas entre máquinas e desperdícios de energia em horas de vazio. Estes valores são apresentados na Figura 4.32.

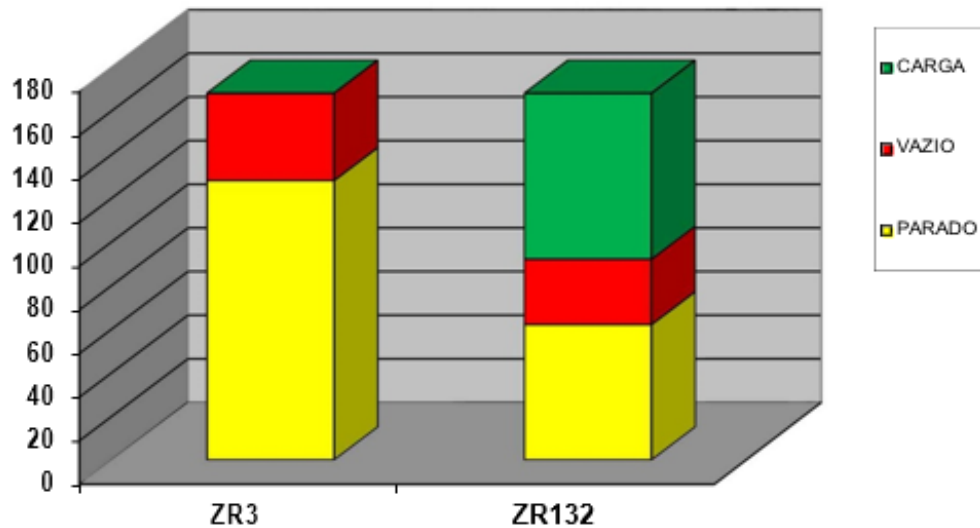


Figura 4.32 – Numero de horas dos Compressores.

Através da análise das horas de operação dos equipamentos, pode-se verificar que a totalidade do período em que o compressor ZR3 operou, esteve em vazio, correspondendo a uma perda energética que representará cerca de 48 MWh por ano. Este compressor está em reserva, o que evidência que possa estar mal dimensionado e que a gestão do mesmo não seja realizada de forma eficiente.

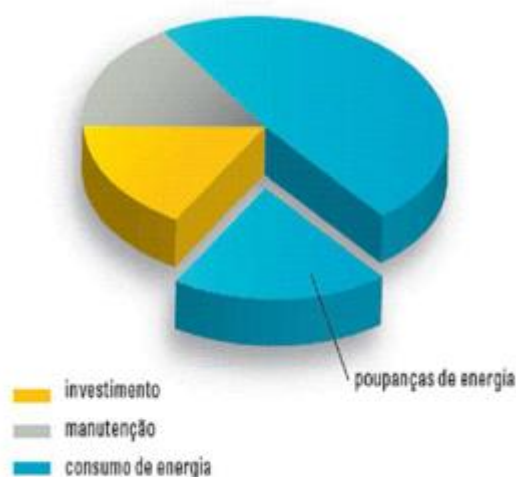
Igualmente o compressor que trabalha de base, apresenta um elevado número de horas em vazio, representando cerca de 28% das horas totais de operação. Também neste caso a poupança com a eliminação das horas de vazio poderá ascender a cerca de 46 MWh por ano.

### 4.3.3. Eficiência Global dos Compressores da Rede Geral

O desempenho energético dos compressores é medido pela quantidade de energia despendida para produzir uma unidade de volume de ar comprimido, que nesta análise será expresso em J/l. A unidade J/l será também designada por SER (Specific Energy Requirement). A análise de desempenho energético dos compressores, servirá como base de cálculo e comparação de melhorias a serem propostas, ou seja, qualquer melhoria energética proposta deverá traduzir-se necessariamente numa melhoria do rácio J/l.

Os custos aplicados durante a vida útil de um compressor estão divididos em três segmentos:

- O investimento**, que é o capital despendido no acto de aquisição do equipamento.
- A manutenção**, que é o capital despendido em peças e serviço, para garantir a operação e fiabilidade da máquina.
- O consumo energético**, que é o capital despendido em energia ou combustível para alimentar a máquina durante o seu ciclo de operação.



É no consumo energético que podemos reduzir os custos ao mínimo admissível, nas horas de vazio, no regime de operação dos compressores de velocidade variável e nos arranques das máquinas, se gerirmos eficazmente o parque de máquinas será possível economizar energia e preservar o meio ambiente.

Seguidamente apresenta-se na seguinte tabela, o SER da rede de ar geral:

<b>SER REGISTADO (J/l)</b>	<b>Médio</b>
	664

Atendendo ao valor registado de caudal e potência consumida, o SER para a produção de ar comprimido será de cerca 664 J/l, sendo este valor muito superior ao valor médio de 416 J/l, considerando uma ineficiência máxima admissível de 10%, para os compressores instalados.

---

#### 4.3.4. Consumos Anuais Estimados dos Compressores de Ar

Através da tabela seguinte, pretende-se demonstrar os valores anuais estimados, com base no registo semanal de caudal produzido e potência consumida, extrapolado para um ano de operação (48 semanas trabalho e 2 semanas de paragem).

	Valores Anuais
<b>ENERGIA CONSUMIDA</b>	<b>626.900,00 KWh</b>
<b>VALOR DO KWH</b>	<b>0,10 €/KWh</b>
<b>CUSTO ENERGÉTICO</b>	<b>62.690,00 €</b>
<b>VOLUME DE AR COMPRIMIDO</b>	<b>3.396.560,00 m<sup>3</sup></b>
<b>SER</b>	<b>664 J/l</b>

Estes valores são de extrema importância pois qualquer medida com vista a melhorar a eficiência energética da unidade fabril, terá consequentemente uma melhoria do rácio J/l. O SER elevado registado neste período, é não só influenciado por uma má gestão ou inadequação dos equipamentos instalados, como pela perda de eficiência verificada nos compressores, que será em média de cerca de 30 %. Tipicamente, para a tecnologia de compressão instalada, essa perda não deveria exceder os 10%, ponto no qual se deve efetuar uma substituição dos elementos de compressão.

Existem melhorias que podem não ter efeito no consumo energético dos compressores, mas terão grande influência na qualidade do produto final e na continuidade de produção (exemplo da reparação da unidade de secagem/filtragem que originou obstrução).

O ponto seguinte pretende enumerar as possibilidades de melhorias no sistema de ar comprimido desde a central até ao consumo final, sendo que para algumas delas irá estimar-se um potencial de poupança que se traduzirá na diminuição do consumo energético indicado na tabela anterior.

## 4.4. Análise dos Secadores

### 4.4.1. Secadores de Refrigeração

Realizando um ciclo frigorífico, estas unidades provocam um arrefecimento no ar comprimido, causando a condensação do vapor de água nele contido. Desta forma é garantido um ar seco de qualidade, com baixo ponto de orvalho, adequado aos níveis de cada indústria, evitando o risco de contaminação dos produtos e de danos no sistema. O ar comprimido de entrada é pré-arrefecido no permutador de calor ar/ar e, em seguida, passa pelo permutador de calor ar/gás de refrigeração onde é arrefecido para valores entre 2 a 4°C. Os condensados são separados do ar e automaticamente purgados pelo separador de água. Antes de ser entregue, o ar seco frio passa uma segunda vez pelo permutador de calor ar/ar para ser reaquecido.

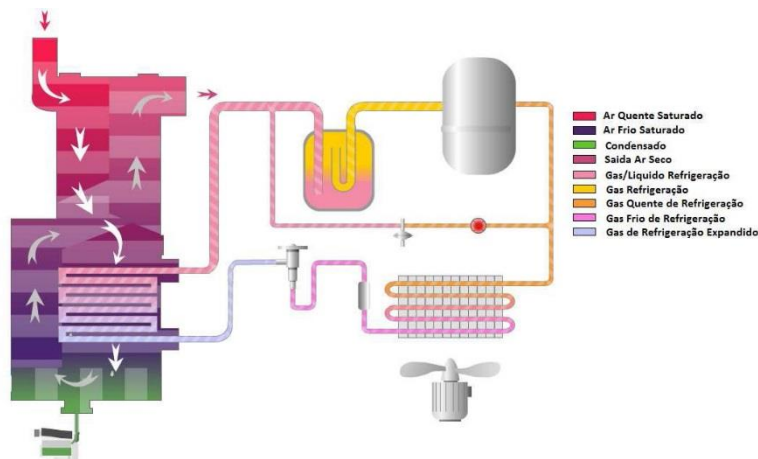


Figura 4.33 – Diagrama de Fluxo de um Secador de Refrigeração [10].

A partir do compressor do secador, o gás de refrigeração entra no condensador, onde é arrefecido pela água de refrigeração e torna-se liquefeito. Um tubo capilar ou uma válvula de expansão regula o caudal no permutador de calor ar/gás de refrigeração, onde o gás se expande, baixando a temperatura no evaporador que arrefece o ar comprimido. O gás de refrigeração é novamente comprimido no moto-compressor (F) e o ciclo é novamente iniciado. A rede de ar comprimido está equipada com dois secadores da marca Atlas Copco cujos modelos e descrição será apresentada nos pontos seguintes. Estes operam em paralelo para a rede, alimentando dois coletores distintos que se interligam no interior da unidade fabril. A alimentação às unidades de secagem é comum, sendo proveniente de dois reservatórios de 2 m<sup>3</sup> cada.

---

#### **4.4.2. Secador FD511**

Equipamento muito antigo e com bastante tempo de operação (26 anos). O circuito de refrigeração é composto por gás R22, cuja quantidade descrita nas características do equipamento é de 13,6 Kg. O caudal máximo admissível será de 271 l/s com uma perda de carga de 0,3 bar e um ponto de orvalho abaixo dos 10°C, tendo associado uma unidade de filtração à saída.

#### **4.4.3. Secador FD300**

Equipamento com cerca de 20 anos de operação. O circuito de refrigeração é composto por gás R22, cuja quantidade descrita nas características do equipamento é de 10 Kg. O caudal máximo admissível será de 314 l/s com uma perda de carga de 0,15 bar e um ponto de orvalho abaixo dos 10°C, tendo associado uma unidade de filtração à saída.

#### **4.4.4. Unidades de Filtração**

Relativamente às unidades de filtração, cada secador tem associado uma unidade, sendo um da marca Atlas Copco e um outro da marca Walker. Tipicamente os filtros não devem introduzir uma perda de carga superior a 0,35 bar. Através da análise efetuada anteriormente, verificou-se que devido a uma avaria (possível congelamento do secador), só um secador estava a tratar o ar, estando o outro a provocar obstrução. Nesses casos, e para um consumo médio na rede compreendido entre os 270 e os 300 l/s, o conjunto secador FD300 mais filtro teriam capacidade de secagem para a totalidade do ar com uma perda de carga máxima inferior a 0,6 bar.

Na prática, verificou-se que mesmo as condições de perda de carga foram superiores a 1 bar, o que pode evidenciar uma colmatção excessiva da unidade de filtração ou redução na tubagem de alimentação ao secador FD300, não sendo porém possível determinar, uma vez que se efectuou a medição somente do conjunto. Com ambas as unidades ligadas em paralelo, a perda de carga deveria ser praticamente nula, visto que a capacidade de secagem seria o dobro do consumo na rede. Mesmo nos períodos em que ambas trataram o fluxo de ar, em que relativamente ao caudal total foi cerca

---

de 60% para o FD300 e 40 % para o FD511, a perda de carga foi considerável, tendo-se situado no máximo em 400 mbar.

Deste modo, pode-se concluir que poderá existir uma obstrução originada pelos secadores, filtros ou restrições de diâmetro nas tubagens da central. Para se poder determinar onde possa estar essa perda de carga, será necessário efectuar um levantamento das perdas de carga, desde o colector de saída dos compressores até às duas linhas de saída da central.

## **4.5. Síntese**

### **4.5.1. Capacidade de Reserva**

A capacidade de reserva de uma central de ar comprimido é um fator determinante na garantia da continuidade do sistema produtivo, esta é uma questão importante por eventualmente comprometer o fornecimento de ar comprimido em períodos críticos do dia. Com base nos registos, considera-se que maioritariamente o compressor ZR132 garante a produção, tendo o compressor ZR3 estado em operação devido à má gestão da reserva e a perturbações na pressão provenientes dos ciclos de vazio do compressor de base. No entanto, existem determinados períodos onde o ciclo de carga do compressor de base é longo (superior a 15 minutos). Nestes períodos caso se verifique um pequeno acréscimo do consumo, será necessário recorrer à utilização do compressor de reserva.

O que poderá ser mais preocupante será a ausência de uma reserva total efectiva, isto é, nos dias úteis de produção entre as 08h00 e as 24h00 o compressor ZR3 não terá capacidade para garantir a produção na totalidade desse período, o que em caso de avaria do compressor ZR132, origina uma descida de pressão na rede para valores que podem comprometer a totalidade da produção. Em alternativa poderá haver a necessidade de recorrer aos compressores do PET, o que representará não só um custo administrativo avultado como energeticamente será bastante penalizador.

Deste modo, considera-se que o compressor ZR3 não pode ser considerado uma reserva segura e eficiente.

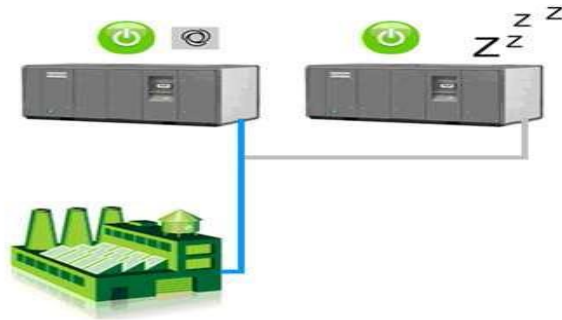


Figura 4.34 – Ilustração de um Sistema de um Compressor em espera [1].

## 4.5.2. Gestão Eficiente do Grupo de Máquinas

### i) Banda de Pressão

Atualmente para existir uma reserva operacional efetiva, o grupo de máquinas existente teria que estar regulado em escada, isto é, em todo o período a pressão na rede seria superior ao valor mínimo que garantisse a continuidade de produção. Essa pressão mínima admissível seria a que estaria parametrizada na máquina de reserva. O controlador garante que existe uma única referência de leitura, permitindo poupanças directas de 7% por cada bar na pressão da rede. Os arranques intempestivos serão colmatados através de um algoritmo avançado de controlo. No capítulo seguinte é apresentado uma proposta visando a optimização deste aspecto.

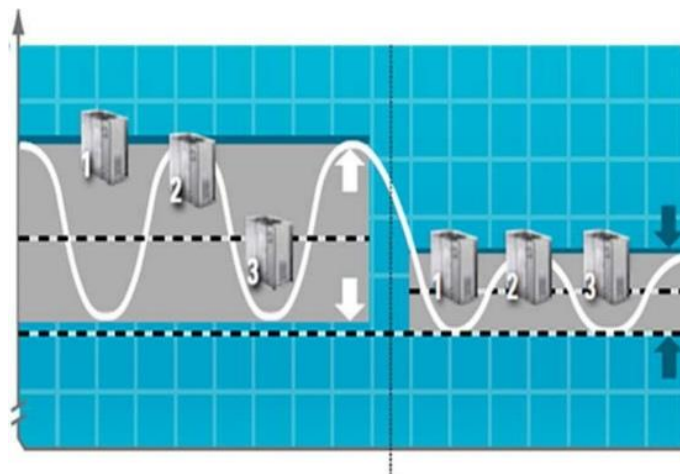


Figura 4.35 – Ilustração de um Sistema de Gestão [1].

### ii) Zona óptima de funcionamento dos VSD

Existindo equipamentos de velocidade variável, o sistema de gestão tenderá a colocá-los a operar na zona óptima de funcionamento, garantindo desta forma a eficiência máxima do grupo. Em particular, nos períodos de maior consumo em que ambos os

equipamentos de velocidade variável estejam em funcionamento, estes sejam geridos de modo a operarem na zona mais eficiente de ambos.

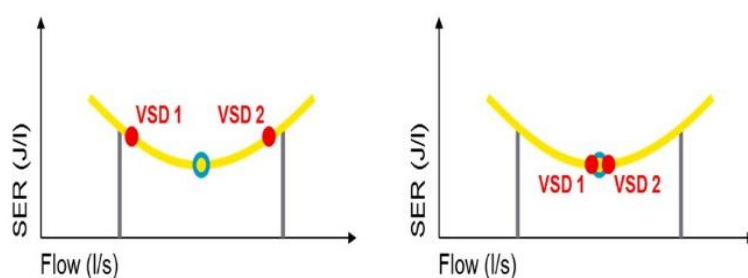


Figura 4.36 – Ilustração de zona óptima de funcionamento de compressores VSD [1].

### iii) Selecção do grupo de máquinas mais eficiente

A gestão é efetuada em tempo real, sendo o conjunto de máquinas em operação gerido de acordo com as necessidades do consumo, tendo sempre como objectivo o grupo energeticamente mais eficiente.

Todos os equipamentos disponíveis para operação, serão uma opção, para em determinado momento melhorar a eficiência energética da central. Actualmente considera-se que existem períodos onde será extremamente vantajoso operar somente com um dos compressores GA75VSD, ao contrário do que se verifica actualmente.



Figura 4.37 – Ilustração de Grupo de Máquinas mais Eficiente [1]

Existe um compressor de base com um elevado número de horas de vazio, que o gestor não conseguirá anular devido ao sobredimensionamento da máquina para o perfil real de consumo. No entanto, existe um forte potencial de economia com a anulação das horas de vazio no compressor de reserva, cujo os registos demonstraram que maioritariamente acontecem devido a arranques intempestivos, o compressor em muitos dos casos não chega a entrar em carga. Existe também a possibilidade da

---

comutação entre máquinas em determinados períodos do dia. Estima-se que uma poupança de cerca de 4% com a gestão eficiente dos compressores, o que representa uma economia energética anual de 25 MWh, considerando 48 semanas de produção.

### **4.5.3. Perdas de Carga na Central de Compressores**

Foi identificado, no decorrer dos registos, que terá existido uma anomalia na unidade de secagem FD511 e/ou filtragem associada, o que originou a obstrução total da linha alimentada por esse conjunto. Todo ar consumido na fábrica foi alimentado via secador FD300, tendo-se registado uma perda de carga acentuada, sendo esse valor em alguns casos superior a 1 bar. Quando ambos os equipamentos estão em operação, a perda de carga máxima diminui para os 400 mbar. Não sendo conhecida nenhuma queixa do lado da produção, considera-se que existe um potencial de redução da pressão de cerca de 500 mbar, desde que ambos os secadores e filtros estejam operacionais. Esta redução pode originar uma poupança adicional de 3,5%, o que representa um decréscimo do consumo de cerca de 22 MWh por ano.

No entanto, com base nos consumos registados e nas capacidades das unidades de secagem, ambos os equipamentos em paralelo teriam uma capacidade tal que a perda de carga seria mínima, isto é, existe uma capacidade de secagem de cerca de 584 l/s para um consumo médio nos períodos de maior produção inferior a 300 l/s, evidenciando existir uma má interligação das unidades no interior da fábrica, uma obstrução ou uma colmatação do filtro associado a cada uma das unidades secagem.

A anulação da perda de carga, pode significar uma redução da pressão em cerca de 1 bar, estimando-se deste modo poupanças que podem ascender aos 7%, representando uma economia energética de 43 MWh. As unidades de secagem instaladas apresentam uma idade avançada (idade igual ou superior a 20 anos), tendo como gás refrigerante o R22 (totalizando mais de 20 kg). Do ponto de vista de qualidade do ar, poderá ser mais eficiente a instalação de um único secador com capacidade para a secagem da totalidade do ar, devendo este, ser sobredimensionado para diminuir/anular a perda de carga, garantindo os 7% de poupança tangível.

#### 4.5.4. Configuração da Central de Ar Comprimido

Idealmente, as duas linhas de saída da central deverão estar interligadas logo após as unidades de secagem, garantindo uma melhor equalização das pressões nos colectores. Um dos factores que pode comprometer a qualidade do ar e aumentar as perdas de carga nas centrais, é o excesso de caudal (velocidades do ar excessivas) a atravessar secadores e filtros. Em muitos casos, apesar de em média estes estarem bem dimensionados, o facto de se instalarem após um reservatório (acumulador de ar) pode, para determinados perfis, dar origem a picos de consumo acima do valor nominal. Idealmente, apesar do reservatório originar uma pré-condensação, na maioria dos casos a instalação da unidade de secagem e filtragem antes do reservatório, com capacidade para a secagem do(s) compressor(es), garantirá que em caso algum se excede a sua capacidade. Será no entanto boa prática efectuar o sobredimensionamento do mesmo, para garantir uma perda de carga mínima.

No caso específico da unidade fabril, não se registaram picos de consumo de ar significativos, pelo que se conclui que a realocação dos secadores poderá não representar uma alteração significativa da eficiência de secagem e da eficiência energética.



Figura 4.38 – Exemplo de Secagem antes dos Reservatórios [16].

Existirá no entanto a necessidade de refazer os coletores principais para os diâmetros nominais de entrada de cada secador/filtro. Identificou-se pelo menos uma redução no colector de alimentação ao reservatório instalado, junto ao ZR132 e na saída para a unidade de secagem FD300, o que poderá originar algumas perdas de carga adicionais.

#### 4.5.5. Fugas na Instalação

No decorrer da instalação dos equipamentos de registo, testou-se o nível de fugas existentes na unidade fabril. Esta variável pode ser difícil de contabilizar pois depende

diretamente do processo e do estado de operação em que se encontram as linhas de produção.

Os equipamentos de medição de potência utilizados, necessitam de ser calibrados on site e com o compressor em operação. No dia 7 de Dezembro, para ser possível efetuar tal calibração, foi necessário manter os compressores em operação para os referidos testes. A esta hora já toda a produção estava parada e havia indicação para a paragem do sistema de regeneração e dos compressores. No entanto, verificou-se que o compressor ZR132 apresentava ciclos de carga/vazio repetitivos, cujo caudal médio estimado se situaria nos 95 l/s, valor esse bastante aproximado ao valor registado, por exemplo, na última meia hora do dia 11 (sexta-feira) antes da paragem para fim-de-semana (93 l/s).

São apresentados de seguida precisamente os gráficos de consumo nos dois períodos. No primeiro caso, como ainda só o registo de corrente estava activo, foi efetuada uma estimativa com base no perfil de carga/vazio.

No segundo gráfico podemos observar o caudal efetivamente medido antes da paragem do fim- de-semana, quando já não estavam em período de produção.

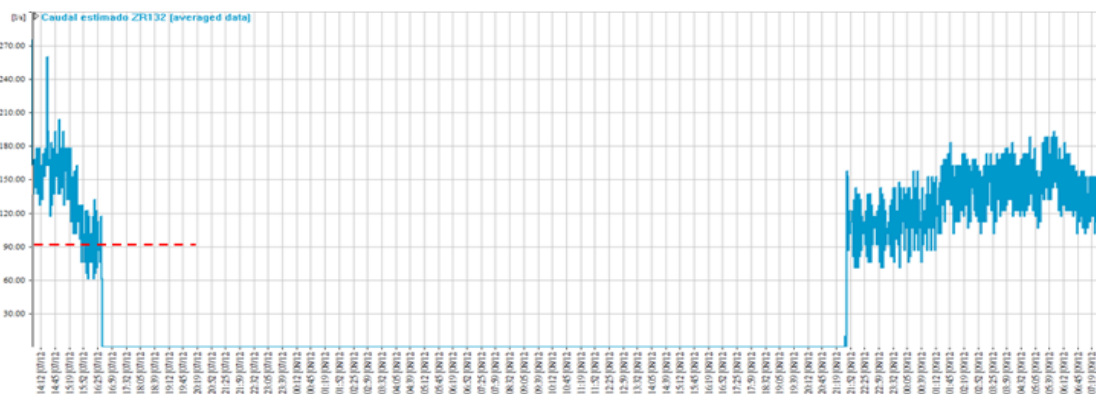


Figura 4.39 – Caudal estimado no dia 7 antes da paragem dos compressores e respetivo circuito de refrigeração



Figura 4.40 – Caudal medido antes da paragem de fim-de-semana

---

Se considerar que pelo menos 50 % desse valor é de fugas, e considerando 107 horas com a rede pressurizada, o consumo de ar de fuga poderá rondar os 859.766,00 m<sup>3</sup>. Com base no SER de 664 J/l, calculado com base nos registos, o desperdício energético estimado poderá representar cerca de 158 MWh por ano.

Poderão existir consumidores fixos que podem influenciar esta estimativa. No entanto, mesmo tratando-se desse factor, este consumo constitui um custo elevado na factura do ar comprimido, podendo existir alternativas a essa utilização. Destacam-se alguns dos exemplos de consumidores fixos que poderão eventualmente ser substituídos por sistemas alternativos:

- Arrefecimento, limpezas e remoção de água por sopro poderá ser substituído por sistema de facas calibradas e blower.
- Vácuo por venturi apresenta normalmente um consumo elevado de ar comprimido, podendo ser substituído por bombas de vácuo de potência reduzida localmente instaladas.
- Controlo dos equipamentos de produção que possam ficar parados em standby com os sistemas de consumo fixo ativos.
- Os equipamentos parados que contenham fugas, deverão ser seccionados da rede sempre que possível, desde que no período de imobilização se evite esse consumo.

#### **4.5.6. Substituição dos Equipamentos Existentes**

Atendendo à ineficiência dos compressores registada e ao facto de actualmente os compressores não se adaptarem ao perfil de consumo de ar comprimido, existe um potencial elevado na substituição do parque de máquinas existente. Estima-se que a substituição dos dois compressores por um de velocidade variável de 132 KW (ou um arranjo de dois equipamentos que perfaça essa potência, por exemplo, duas unidades de 75 KW de velocidade variável), permita obter poupanças compreendidas entre os 35 e 40%. A poupança energética estimada nestes casos estará compreendida entre 219 MWh a 250 MWh por ano.

Constitui portanto, uma das medidas mais urgentes a implementar para garantir uma produção eficiente. Os valores de poupança apresentados contemplam também a instalação simultânea de um sistema de gestão, o qual será necessário não só para

---

controlar de forma eficiente os equipamentos que operam, assim como para garantir um controlo e gestão adequada das reservas. Não esquecer que qualquer alteração da central deverá contemplar e garantir uma reserva eficiente.

A instalação de compressores com secagem integrada de adsorção de alta eficiência, permitiria uma qualidade do ar elevada a um ponto de orvalho negativo inferior a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  com um menor consumo energético, contrariamente aos valores actuais compreendidos entre  $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e os  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os secadores de refrigeração actualmente instalados seriam desativados, anulando-se deste modo a perda de carga nos mesmos e o consumo associado a cada um. Estima-se que com esta alteração da secagem poder-se-á originar poupanças superiores a 17 MWh, as quais não foram contabilizadas na estimativa de consumo anual relativa aos compressores, sendo estas poupanças somente referentes à operação dos dois secadores de ar instalados na central.

Poderá continuar a ser necessário por questões de qualidade do produto, um sistema de filtragem do ar na linha à semelhança do que já existe, sendo aconselhado, conforme descrito nos pontos anteriores, o seu sobredimensionamento.

#### **4.5.7. Sistema de Recuperação de Energia Térmica**

Cerca de 94% da energia eléctrica consumida num compressor industrial é convertida em calor, a qual normalmente é dissipada nos sistemas de refrigeração dos equipamentos. Dos 6% restantes, parte é perdida por radiação e uma outra parte (4%) permanece no ar comprimido. Os equipamentos de ar comprimido, são dos principais consumidores de energia eléctrica no processo de fabrico, os compressores são utilizados na maioria dos processos industriais, por isso, torna-se muito importante otimizar o seu funcionamento. Com a unidade de recuperação de Energia Térmica (Energy Recovery), poder-se-á recuperar de 50 a 94% dessa energia dissipada no sistema de refrigeração. A energia recuperada poderá ser utilizada para aquecer água até  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4.41 – Compressor com Unidade de Recuperação Térmica [1].

Com a instalação de sistemas de recuperação de energia, poder-se-á obter uma redução significativa nos custos energéticos e reduzir significativamente os custos de produção, aumentando assim a competitividade da sua empresa no mercado. Cerca de 70% dos processos industriais incluem o uso de água quente, se o processo requer o uso de fontes de combustível externo para aquecimento, com as unidades de recuperação de energia (Energy Recovery), poder-se-á reduzir o consumo de combustível, proporcionando uma redução substancial nos custos. Em simultâneo podemos obter economias no processo indireto, com a redução dos custos de manutenção dos equipamentos auxiliares associados (fornos, ventiladores, queimadores etc.), que produzem gases de escape.

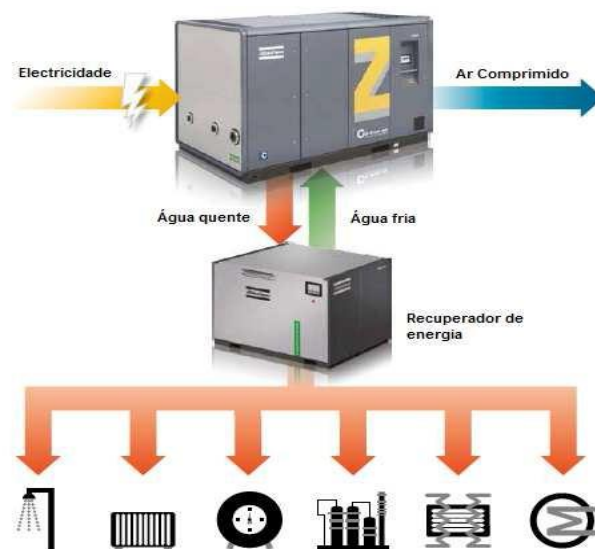


Figura 4.42 – Ilustração de um Esquema de Recuperação Térmica [1].

---

Ao recuperar a energia desperdiçada e ao reintroduzi-la no seu processo de fabrico, poder-se-á reduzir a sua dependência de combustíveis fósseis (carvão, gás natural, derivados de petróleo). Recuperando a energia térmica obtida na compressão, poderá contribuir para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>, de forma a cumprir com a legislação ambiental cada vez mais rigorosa e a preservar o meio ambiente.

Com base no perfil de operação estimado, e considerando a solução de substituição dos compressores por tecnologias mais eficientes, estima-se que cerca de 75% da energia consumida pelos compressores possa vir a ser recuperada sobre a forma de calor. Deste modo, estima-se um potencial de recuperação de 305 MWh, podendo este ser utilizado para aquecimento de águas para a caldeira, balneários, áreas administrativas, lavagens, entre outras aplicações.

#### 4.5.8. Tabela Resumo de Poupanças

É apresentado a tabela 4.1 com o resumo das poupanças anuais estimadas, tendo sido considerado 48 semanas de trabalho por ano e um preço do KWh medio de 0,10 €:

Tabela 4.1 – Poupanças Anuais Estimadas

Poupanças 48 semanas operação				
Medidas	%	KWH	€	Observação
<b>Gestão eficiente</b>	4%	25.075,00	2.507,50	Atenuar os arranques intempestivos do compressor de reserva. Diminuir o número de horas de vazio do compressor de reserva. Garantir uma pressão média mais constante.
<b>Redução de pressão media 0,5 bar</b>	3,5%	21.941,00	2.194,10	Reduzir a pressão média na rede de 500 mbar com uma gestão eficiente da reserva e estabilidade da pressão.
<b>Redução de pressão media 1 bar</b>	7%	43.882,00	4.388,20	Reduzir a pressão média na rede de 1 bar com uma gestão eficiente da reserva e estabilidade da pressão. Diminuição/anulação da perda de carga nos secadores e filtros. Poderá existir a substituição dos secadores e filtros assim como reconfiguração de algumas tubagens da central, não tendo sido possível determinar se uma acção de manutenção nos equipamentos existentes possa anular esta perda.
<b>Redução de fugas</b>	-	158.685,00	15.866,50	Foram identificados períodos, imediatamente antes das paragens da central, onde o consumo médio ronda os 93 l/s. Foi considerado uma fuga relativa a 50% desse valor e o SER médio do grupo.
<b>Substituição dos equipamentos de compressão*</b>	35 a 40%	219.413,00 250.758,00	21.941.30 25.075.80	Introdução de compressor de tecnologia de variação de velocidade de 132 KW ou eventualmente três unidade de 75 KW. Os equipamentos atuais não estão adaptados ao perfil de consumo de ar comprimido e encontram-se com uma eficiência muito baixa, evidenciando a necessidade de substituição de elementos de compressão com urgência. Valor de poupança contempla a gestão eficiente do(s) equipamento(s) em operação e reserva.
<b>Mudança na tecnologia de secagem</b>	-	17.655,00	1.765,50	Os compressores de parafuso isento de óleo podem vir equipados com sistemas de secagem por adsorção de alta eficiência, cujo consumo elétrico é mínimo e garantindo um PDP médio negativo inferior a -20°C. Poupança com a desactivação dos secadores de refrigeração..
<b>Recuperação de energia térmica</b>	-	305.611,00	**	Recuperação de energia térmica considerando com base no novo grupo de máquinas a instalar e no perfil estimado de operação para esse mesmo grupo.
<b>Anular perdas de produção por pressão baixa no sistema</b>	-	-		Sem dados disponíveis para estimar valores.

\*Os compressores instalados actualmente necessitam urgentemente de manutenção geral, que contemple a substituição de elementos de compressão, com custos superiores a 65.000,00 € por compressor.

\*\*Depende do valor da energia primária usada no aquecimento (GN, Fuel, Electricidade...), e na capacidade de consumo da energia térmica disponível.

Existem poupanças indirectas que não foram consideradas tais como a influência da redução do caudal de fugas, alteração dos regimes de operação, entre outras, sendo estas um complemento aos valores anteriormente apresentados.

#### 4.5.9. Investimentos

Tabela 4.2 – Investimentos

	Medidas	Economia de Energia (kWh/ano)	Economia de custos (EUR/ano)	Investimento (EUR)	PRI (anos)
1	Gestão eficiente e Redução de pressão média de 0,5 bar	47.016,00	4.700,00	6.230,00	<1.4
2	Substituição dos equipamentos de compressão, mudança da tecnologia de secagem com redução da pressão média em 1 bar	280.950,00	28.095,00	252.888,00	9*
3	Recuperação de energia térmica	305.611,00	**		
4	Redução de fugas	158.685,00	***		

\*Considerou-se a aquisição de três compressores de velocidade variável de 75KW com secagem integrada do tipo IMD. Não foram contabilizados nos valores de poupança obtidos os custos da manutenção das duas unidades de secagem existentes ou até mesmo a substituição.

**Se forem considerados os custos das revisões gerais necessárias para garantir o bom funcionamento dos compressores actualmente instalados, o PRI poderá diminuir para um período inferior a 2,5 anos.**

\*\* Representará uma redução do consumo de energia primária usada no aquecimento de um determinado fluido. É uma poupança tangível, sendo clara a sua existência somente se existir um ponto de utilização.

\*\*\*Requer análise cuidada da instalação fabril para aferir o potencial identificado.

## 5. Nova Abordagem de Controlo

### 5.1. Escolha do Autómato

Os Sistemas de Supervisão e Controlo Industrial (mais conhecidos por SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition) são, de uma maneira geral, sistemas integrados numa arquitectura complexa unindo hardware (controladores e instrumentação) a software (aquisição e gestão de dados), disponibilizando detalhes e operações de controlo de processos localizados.

O controlo do processo e dos seus produtos é geralmente obtido por meio da implementação de sistemas de controlo de re-alimentação (feedback control) ou directos (feed-forward control) em que as condições do processo se mantêm automaticamente em torno de um ponto de ajuste especificado (set-point). Para que se consiga esta tolerância, são utilizados controladores lógicos programáveis (do inglês, Programmable Logical Controllers - PLC's), devidamente configurados para exercerem acções de controlo Proporcional, Integral e/ou Diferencial, que proporcionam as devidas correcções ao processo mediante as perturbações induzidas, assegurando a maior estabilidade possível.

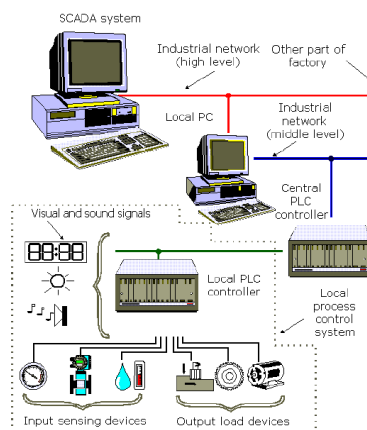


Figura 5.1 Exemplo de um sistema de supervisão e controlo (SCADA) usando Controladores PLC [21].

Estes PLC's para além da sua acção de controlo localizada, normalmente estão em comunicação permanente com o sistema SCADA através de uma rede de área local (LAN) disponibilizando, em tempo real, toda a informação relativa às variáveis de processo, permitindo uma monitorização real, com a possibilidade de serem gerados alarmes e, posteriormente, a criação de relatórios e disponibilização dos dados recolhidos para sistemas de gestão mais avançados.

Para o desenvolvimento deste sistema, foi escolhido um autômato da Siemens, mais especificamente o modelo S7-1200 1214C DC/DC/DC.

A escolha deste PLC derivou essencialmente dos seguintes aspectos:

- Número de entradas e saídas (analógicas e digitais) ideais para a implementação do sistema em causa;
- Elevada compatibilidade com diversos componentes, tais como consolas HMI;
- Elevada capacidade de expansão e conectividade, permitindo assim a constante evolução e melhoria do sistema;
- Possibilidade de criação de página na web sem necessidade de módulos adicionais;
- Elevada robustez, flexibilidade e preço economicamente acessível.

Este PLC combina um microprocessador, circuitos de entrada e saída, comunicação PROFINET (comunicação TCP/IP – ethernet) incorporada, I/O de controlo de alta velocidade e entradas analógicas incorporadas.

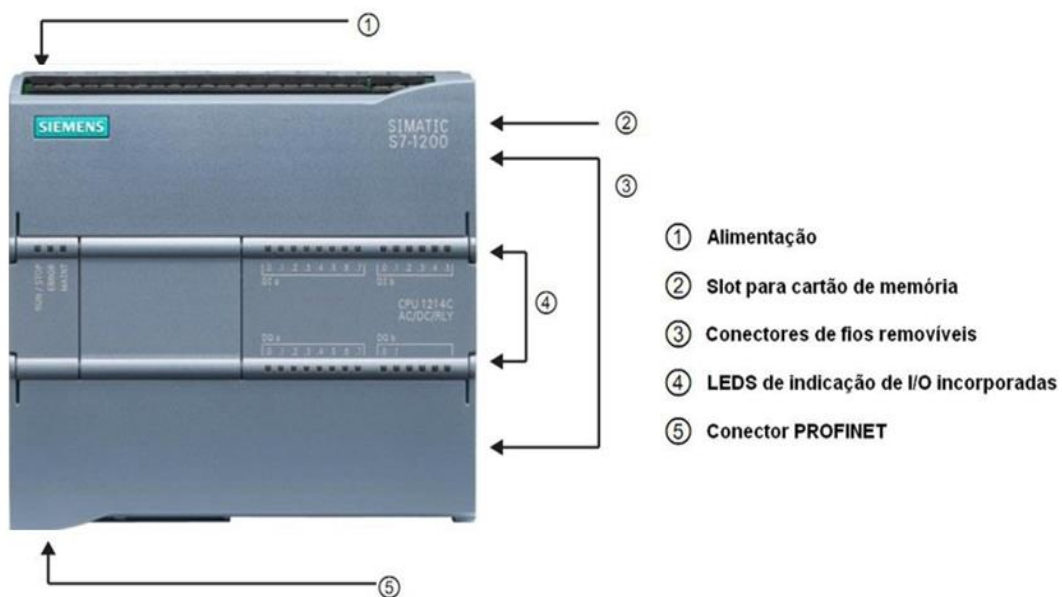


Figura 5.2 - Constituição básica do S7-1200 [17].

## 5.2. Descrição do Controlo

Os compressores quando em funcionamento, têm dois modos de operação distintos: o modo carga (em que é efectuado o aquecimento e a compressão do ar) e o modo vazio (em que apenas é efectuado o aquecimento do ar, mantendo o compressor operacional para uma futura necessidade de compressão, evitando paragens e arranques excessivos). Todos os compressores possuem um módulo com transdutores de caudal e pressão na linha de ar, determinando assim o seu arranque.

O objetivo no controlo de centrais de ar comprimido com múltiplos compressores é manter automaticamente a pressão mais baixa e mais constante, através de todas as condições de caudal, garantindo todos os compressores em funcionamento. Os restantes compressores devem ser capazes de funcionar de forma eficiente em cargas parciais.

Para atingir os objetivos, os sistemas com múltiplos compressores requerem controlos ou estratégias de controlo mais avançadas (bandas de pressão em cascata, controlos mestre de rede ou do sistema) para coordenar o funcionamento do compressor e a entrega de ar no sistema.

É necessária uma coordenação adequada para manter caudais e pressões adequadas do sistema e aumentar a eficiência sempre que for necessário mais do que um compressor para funcionar num sistema de ar comprimido. Como os sistemas de compressores geralmente são dimensionados para as necessidades máximas de consumo de uma instalação, funcionando normalmente em cargas parciais, é necessário um método de controlo para garantir que os compressores em funcionamento tenham a eficiência máxima.

Um exemplo de um passível perfil de caudal simplificado é mostrado abaixo na figura 5.3. O gráfico representa o caudal total em função do tempo.

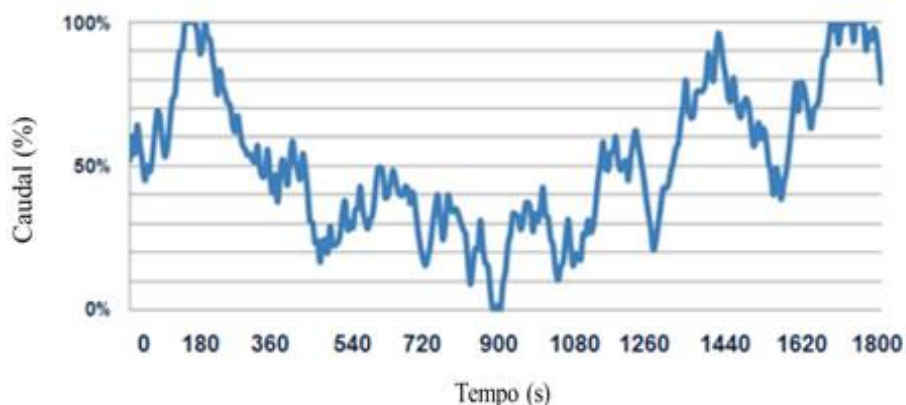


Figura 5.3 – Exemplo de perfil de Caudal [9].

Este capítulo estuda uma nova abordagem e alternativa ao do controlo e monitorização de uma central de ar comprimido com multi-compressores. A figura 5.4 mostra como um controlador principal deve operar com compressores individuais (neste exemplo, dois compressores de velocidade fixa e um compressor de velocidade variável) para as franjas com um mínimo de flutuações de caudal e pressão.

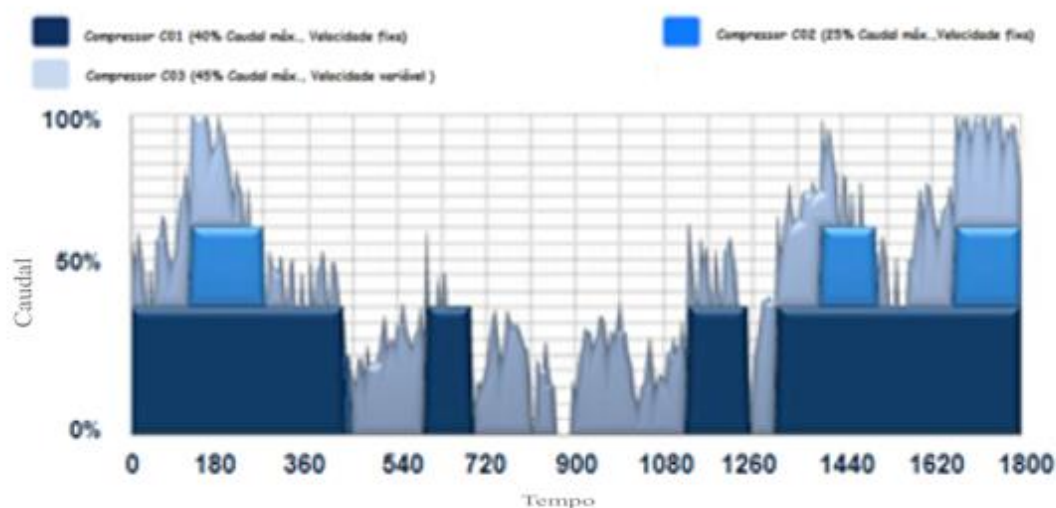


Figura 5.4 – Sistema de vários Compressores comandado por um Controlador principal [9].

O dimensionamento de uma central de ar comprimido terá que, obrigatoriamente, respeitar os requisitos máximos do consumo. Porém, esta condição de consumo máximo é muito esporádica e corresponde na prática a picos de consumo. Este facto, leva-nos para uma condição de sobredimensionamento, face ao que serão as necessidades médias da instalação, tendo em conta ainda a variabilidade típica que caracteriza o consumo de ar comprimido. O consumo caracteriza-se por inúmeros utilizadores, com padrões de consumo distintos e uma grande aleatoriedade na chamada de ar. Acrescem os diferentes níveis de consumo diários em função dos turnos de laboração, ao que por vezes se acrescenta o fim-de-semana com necessidades de ar mínimas. Importa então, que a produção tenha capacidade para se ajustar aos diferentes patamares de consumo e responda depois às flutuações de consumo dentro de cada patamar. Este mecanismo de ajuste de caudal a diferentes níveis de procura, denomina-se controlo ou regulação.

Os sistemas de controlo procuram cumprir com dois princípios básicos: equilibrar o caudal produzido com o caudal requerido pela rede e consumir o mínimo de energia. Quando se adiciona um compressor de velocidade variável em cima de compressores de velocidade fixa proporciona-se uma economia significativa de energia. A banda de

controlo de um compressor de velocidade variável é fundamental para evitar a “lacuna” do controlo. Quando um ou mais compressores de velocidade fixa são dimensionados dentro do compressor de velocidade variável, a lacuna do controlo pode ser evitada.

A figura 5.5 e a tabela 5.1 mostram as combinações do sistema com um compressor de velocidade variável C01 e de C02 e C03 compressores de velocidade fixa. O caudal do compressor de velocidade variável é C1 e os compressores de velocidade fixa C02=2C1 e C03= 4C1.

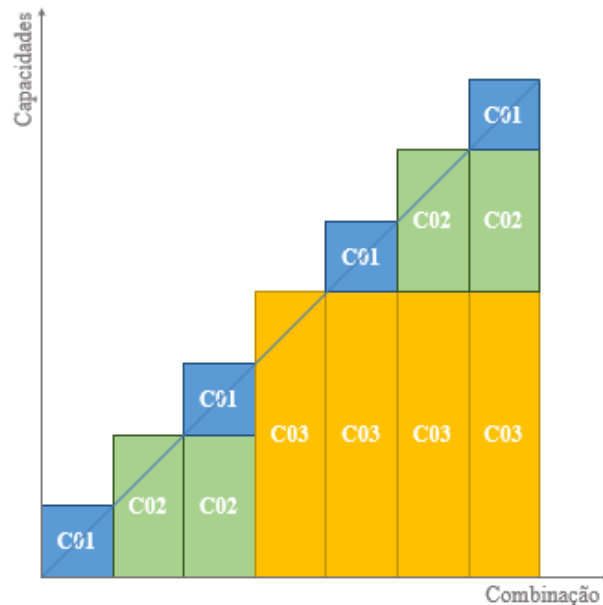


Figura 5.5 – Representação das Combinações dos Compressores.

Esta proposta de combinações de compressores em cascata cuja relação de caudais é aproximadamente C02=2 x C1; C03= 4 x C1 é retirada da hidráulica digital [19].

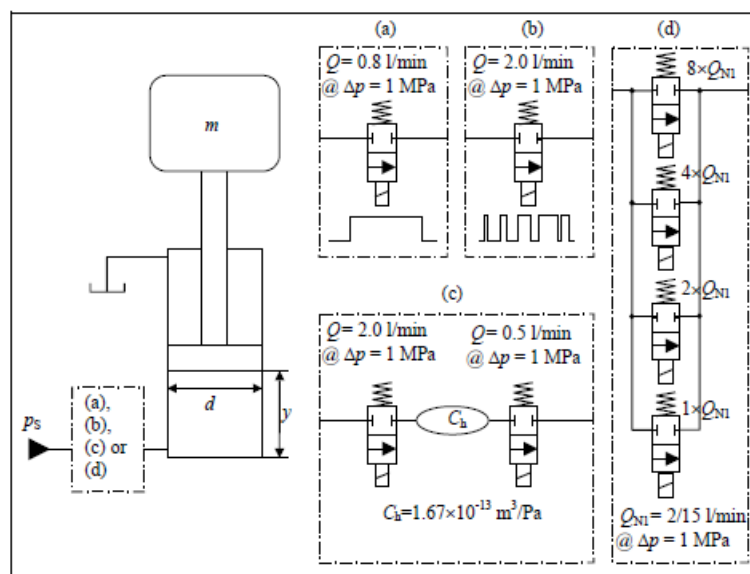


Figura 5.6 – Sistemas de Controlo On/Off. [19].

Pretende-se com o conjunto de três compressores com esta relação de caudais conseguir uma resposta linear de variação de caudal inspirado num sistema digital de três bits conseguindo ( $2^n - 1$ ) combinações possíveis (ver tabela 5.1).

Tabela 5.1: Combinações ordenadas de Compressores de base e a capacidade de incremento entre combinações.

COMBINAÇÕES ORDENADAS E INCREMENTOS		
Combinações	Capacidade	Incremento
----	0	0
C01	C1	C1
C02	2 C1	C1
C01+C02	3 C1	C1
C03	4 C1	C1
C01+C03	5 C1	C1
C02+C03	6 C1	C1
C01+C02+C03	7 C1	C1

Com a inclusão de um compressor de débito variável pode fazer frente às franjas de consumo existentes, conseguimos assim uma optimização do processo de controlo de caudal. O perfil adequado da unidade fabril, o dimensionamento e a selecção correcta dos equipamentos, mantêm o caudal a uma pressão operacional estável ao longo dos níveis de solicitações, permitindo uma potência eficiente durante o tempo de funcionamento. A figura 5.7 mostra um sistema bem dimensionado com base no perfil de consumos com os compressores de carga/vazio totalmente carregados e o compressor de velocidade variável na franja do perfil de consumo.

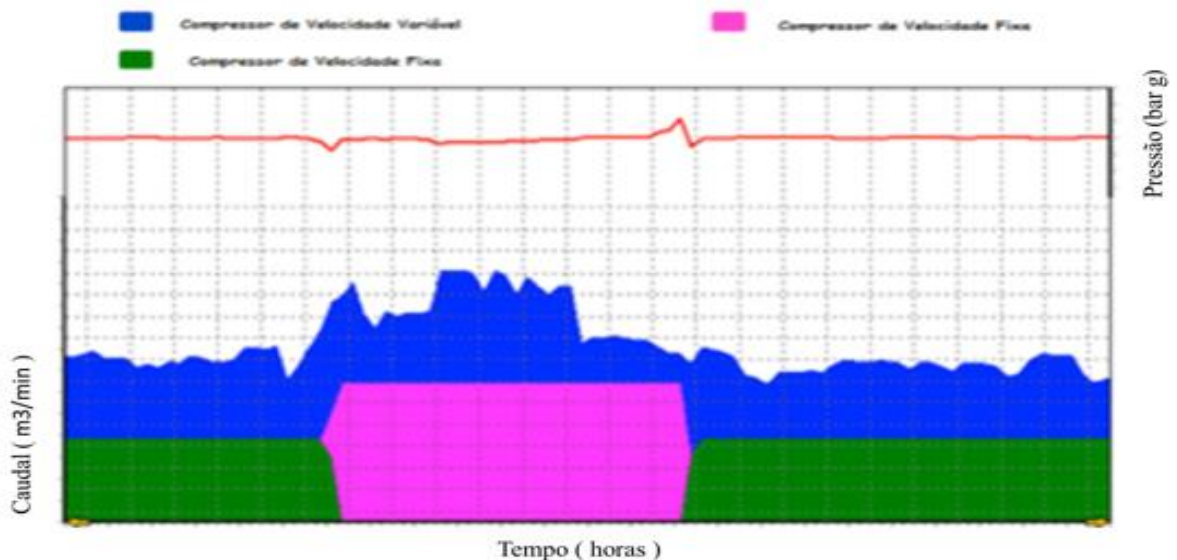


Figura 5.7 – Sistema de Controlo bem dimensionado [9].

A figura 5.8 evidencia a potência específica constante ao longo do perfil de consumo.

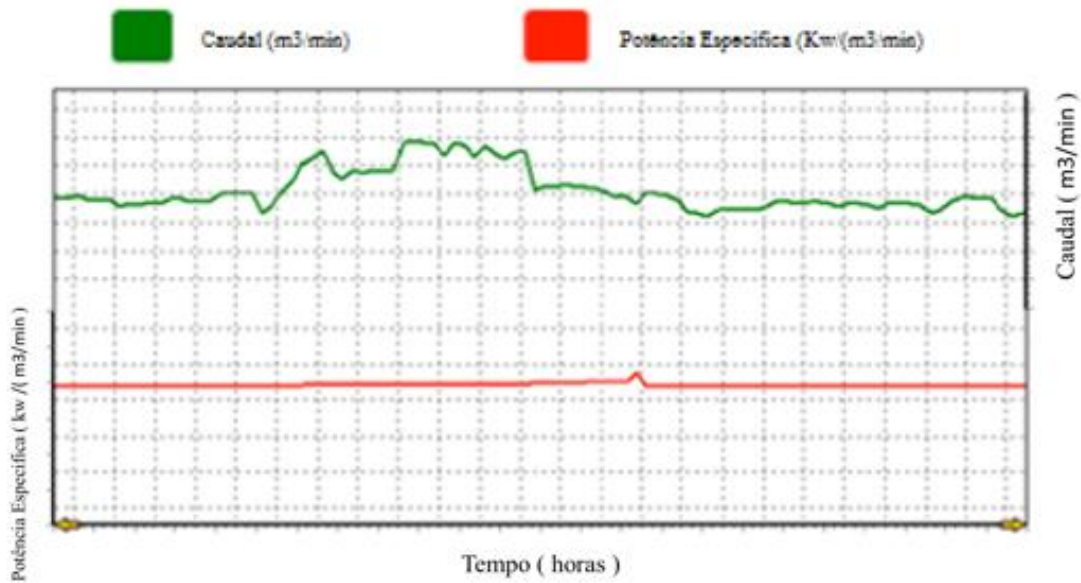


Figura 5.8 – Caudal e Eficiência de um Sistema de Controle bem dimensionado [9].

Este tipo de operação resulta numa baixa potência específica e num baixo custo de energia, uma vez que os compressores passam pouco tempo a alternar entre carga/vazio. O benefício será um menor custo de manutenção para os componentes dos compressores, bem como uma pressão estável.

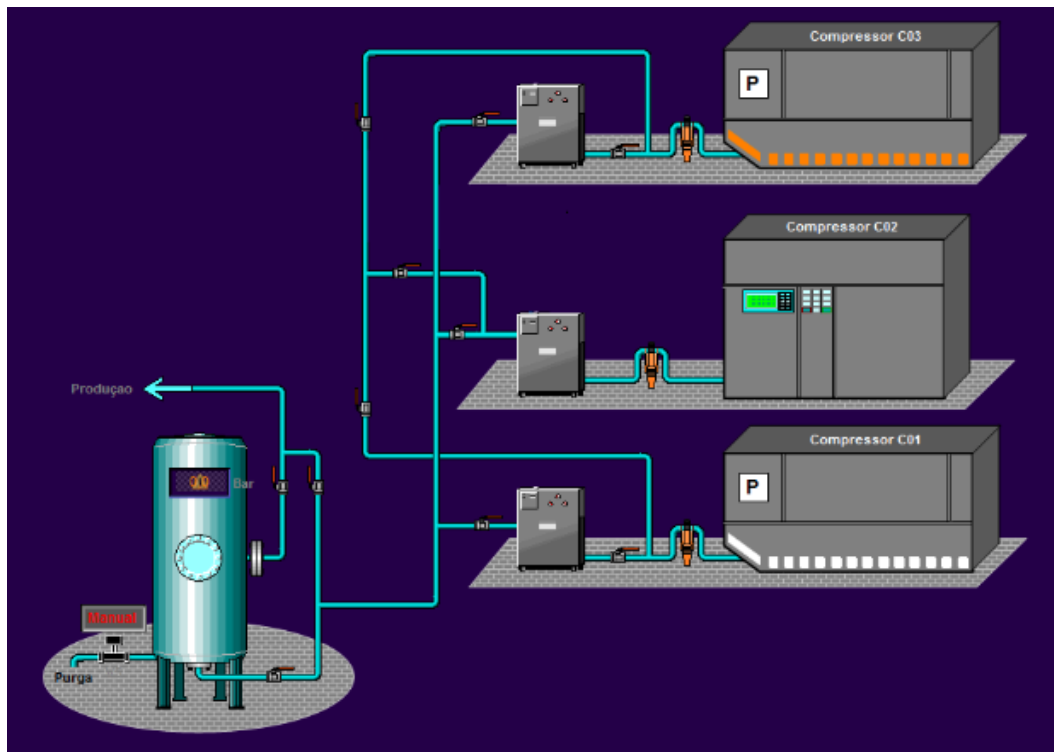


Figura 5.9 – Representação Esquemática da Central de Ar Comprimido.

---

O sistema de gestão que se apresenta tem como objectivo a optimização do funcionamento de uma central de ar comprimido.

A implementação deste controlo alternativo apresentado nesta dissertação possui bastantes vantagens face a um controlo manual:

- Controlo autónomo do funcionamento dos compressores;
- Controlo e monitorização geral de toda a central (consola HMI);
- Possibilidade de controlar e monitorizar todo o sistema à distância (via página web);
- Maior facilidade na detecção de avarias dos diversos componentes constituintes do sistema de ar comprimido (compressor, secador, pressóstato, caudalímetro);
- Sistema de alarme visível aquando de alguma falha no funcionamento do sistema;
- Melhor controlo dos gastos e maior poupança energética;
- Possibilidade de criar bases de dados com informação recolhida periodicamente, para eventuais comparações estatísticas;

O sistema possui diversos sensores que recolhem informações referentes à pressão e caudal, valor de consumos energéticos, entre outros, que posteriormente são enviadas e analisadas pelo PLC.

Com instalação do sistema de gestão de energia será possível ter uma monitorização dos consumos e resultados obtidos após a implementação das outras melhorias. Através da instalação do sistema de visualização, composto por um ecrã que mostrará em tempo real o consumo por unidade de produção, todos colaboradores poderão conhecer o consumo energético instantaneamente, sendo assim possível obter-se um maior engajamento dos colaboradores nas acções de redução de energia e no alcance dos objectivos.

A implementação de um sistema de gestão e monitorização de energia vai ser muito importante na verificação de consumos e controlo, tanto antes quanto depois da implementação de medidas de redução de energia. A tendência é que os ganhos na optimização e reduções energéticas se percam com o passar do tempo, causados por falta de manutenção, equipamentos obsoletos ou o factor humano. Segundo a Schneider Electric essas perdas em eficiência podem chegar a 8% ao ano [20]. Se a causa desse aumento for detectada e reparada logo ao início do aumento, as melhorias podem ser mantidas a longo prazo. Se a empresa já tivesse um sistema de

monitorização, o aumento no consumo ocorrido entre os dois últimos anos fiscais teria sido verificado a tempo de ser revertido.

A importância da utilização de um sistema de monitorização e controlo pode ser observado na figura 5.10.

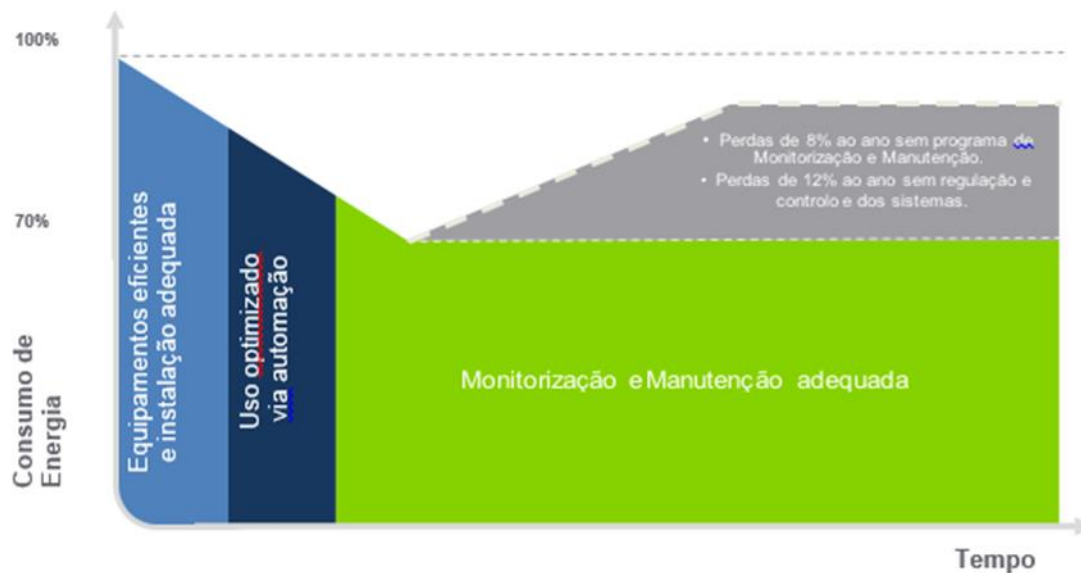


Figura 5.10 - Comportamento do Consumo na utilização ou não de um Sistema de Monitorização [20].

Cada vez mais se justifica o processo de Gestão Energética no sistema produtivo, em função do papel estratégico dos insumos energéticos na produção, com implicação directa na melhoria do desempenho da organização por meio: da optimização do consumo de energia por produto acabado; da gestão de contratos com fornecedores de energia e sistema tarifário; de tecnologias energeticamente eficientes; do monitoramento de perdas energéticas e do uso e qualidade da energia, sobretudo eléctrica.

O sistema, como referido anteriormente, permite o controlo e monitorização, quer local, quer remota, de um sistema de gestão garantido pelas 3 condições de funcionamento:

**1ª Condição:**

Se  $Q < Q_{C01}$  ou  $Q > Q_{C02}$  e  $Q \leq Q_{C02} + Q_{C01}$  ou  $Q > Q_{C03}$  e  $Q \leq Q_{C03} + Q_{C01}$  ou  $Q > Q_{C03} + Q_{C02}$   
 logo Start  $Q_{C01}$

**2ª Condição:**

Se  $Q > Q_{C01}$  e  $Q \leq Q_{C02} + Q_{C01}$  ou  $Q \leq Q_{C03} + Q_{C01}$  logo Start  $Q_{C02}$

**3ª Condição:**

Se  $Q > Q_{C02} + Q_{C01}$  logo Start  $Q_{C03}$

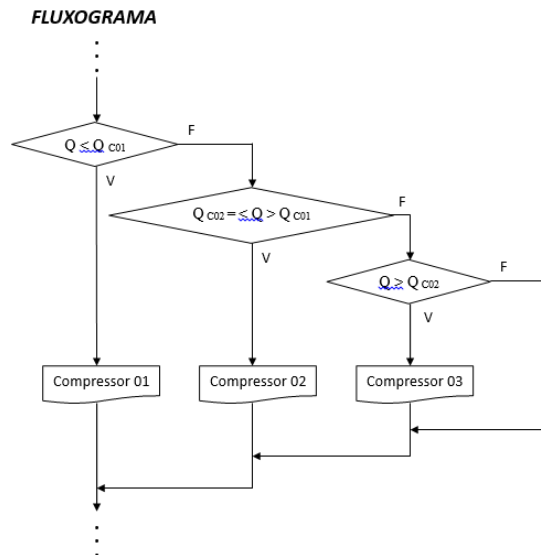


Figura 5.11 – Fluxograma das condições de Funcionamento

Para o efeito recorreu-se a um autómato programável Simatic S7-1200 da Siemens para realizar as regras de controlo que permitirão por em prática o enunciado no presente capítulo. O controlo, monitorização e implementação do sistema, foi desenvolvido um programa com recurso ao software STEP 7 V11.

Este programa é responsável por todas as decisões tomadas pelo PLC; envia comandos de controlo (através das saídas digitais analógicas e digitais) aos diversos componentes do sistema de acordo com os dados e informações que recebe dos transmissores e caudalímetros (entradas analógicas e digitais). Programa encontra-se no anexo A.

- **CONTROLO COMPRESSOR 1 (C01)**

CONDIÇÕES ARRANQUE: ( %M2.0)

O arranque e paragem do compressor é efectuado de acordo com as seguintes Condições:

- Arranque do compressor C01

$$Q_{consumo} \leq C1$$

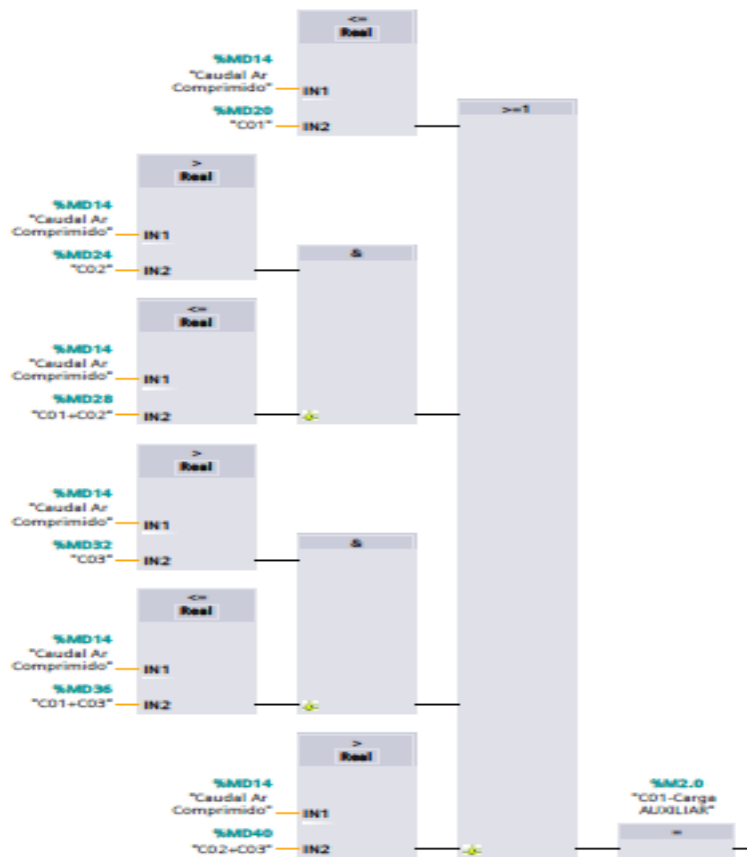
$$Q_{consumo} > 2 \times C1 \text{ e } Q_{consumo} \leq 3 \times C1$$

$$Q_{consumo} > 4 \times C1 \text{ e } Q_{consumo} \leq 5 \times C1$$

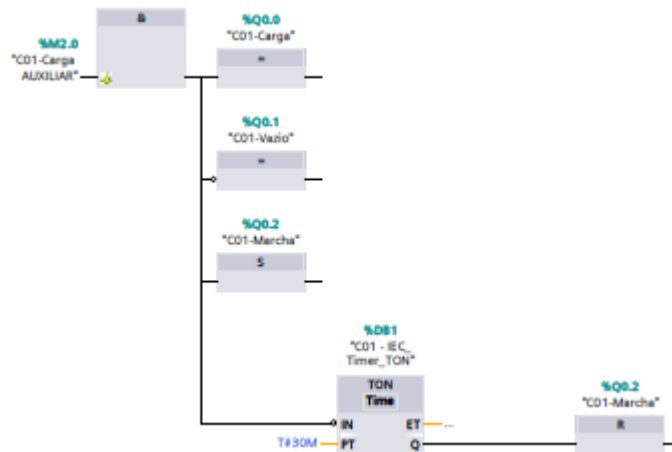
$$Q_{consumo} > 6 \times C1$$

- Paragem do compressor 1

Não ter condição de Marcha há mais de 30 min.



CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C01 - AUXILIAR PATAMARES



CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C01

Com ordem de funcionamento do compressor %M2.0

1. Ligar compressor em carga, e colocar o compressor em funcionamento.
2. Timmer (ON DELAY) de 30 min para retirar o compressor de funcionamento

- **CONTROLO COMPRESSOR 2 (C02)**

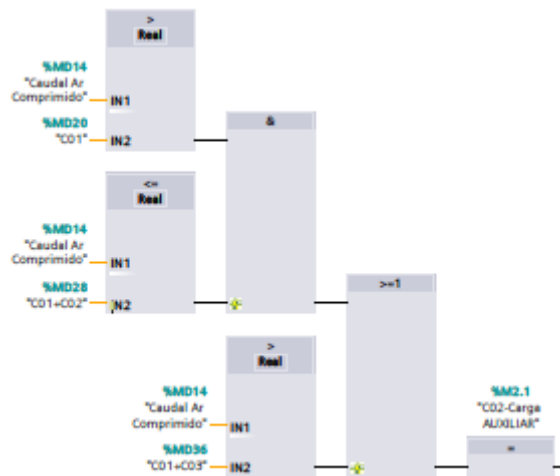
**CONDIÇÕES ARRANQUE:**

O arranque e paragem do compressor é efectuado de acordo com as seguintes Condições:

- Arranque do compressor C02
  - $Q_{consumo} > C1$  e  $Q_{consumo} \leq 3 \times C1$
  - $Q_{consumo} > 5 \times C1$

- Paragem do compressor 2

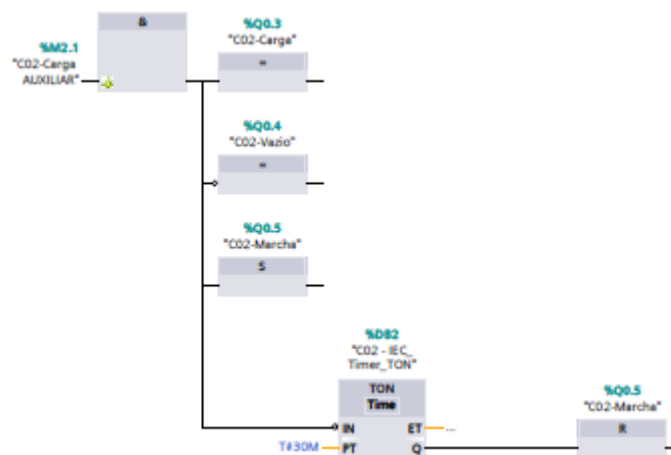
Não ter condição de Marcha há mais de 30 min



CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C02 - AUXILIAR PATAMARES

Com ordem de funcionamento do compressor %M2.1

1. Ligar compressor em carga, e colocar o compressor em funcionamento.
2. Timmer (ON DELAY) de 30 min para retirar o compressor de funcionamento



CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C02

- **CONTROLO COMPRESSOR 3 (C03)**

**CONDIÇÕES ARRANQUE:**

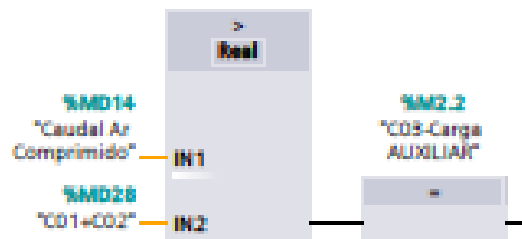
O arranque e paragem do compressor é efectuado de acordo com a seguinte Condição:

- Arranque do compressor 3

$$Q_{consumo} > 3 \times C1$$

- Paragem do compressor 3

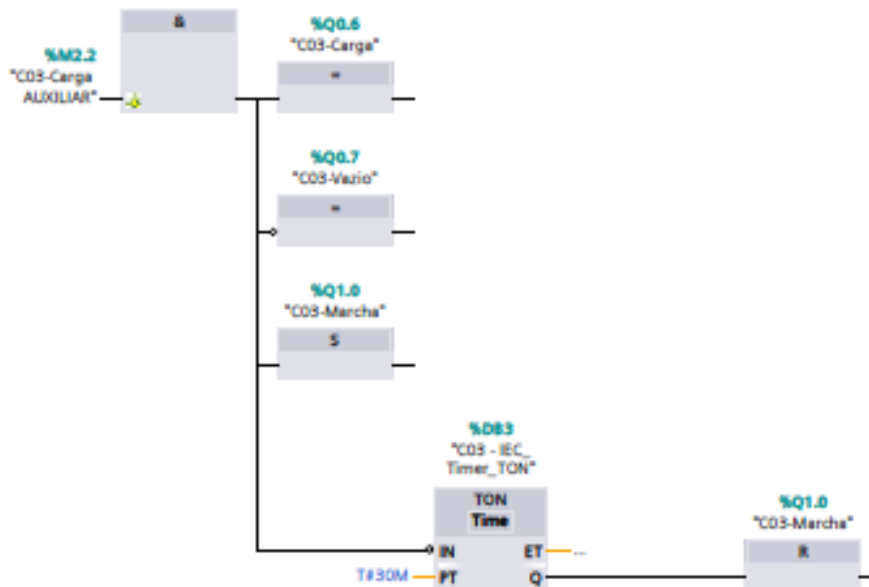
Não ter condição de Marcha há mais de 30min



CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C03 - AUXILIAR PATAMARES

Com ordem de funcionamento do compressor %M2.2

1. Ligar compressor em carga, e colocar o compressor em funcionamento.
2. Timmer (ON DELAY) de 30 min para retirar o compressor de funcionamento

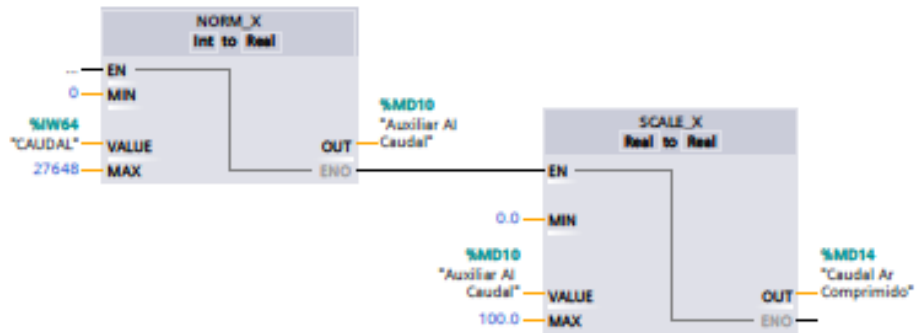


CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C03

---

- **CONTROLO ANALÓGICO**

O controlo da analógica transforma a entrada analógica de um valor interno do PLC que no caso das entradas analógicas do S7-1200 transforma um valor de 0 a 27648 num valor de engenharia (real) de 0 a 100 m<sup>3</sup>/min (%MD14).



LEITURA / CONVERSAO DO SINAL ANALOGICO DO CAUDAL DO AR COMPRIMIDO

---

## 6. Conclusões

O conceito de eficiência energética poder-se-á enunciar como um acto que conduz a menores consumos de energia através da optimização do sistema e da racionalização dos consumos, mantendo intactas as necessidades. O ar comprimido, pelo peso que tem na estrutura de custos energéticos das empresas e pelo elevado potencial de poupança que apresenta, deverá constituir uma preocupação de gestão, manifestada através da optimização do sistema e da sua utilização racional. A gestão desta utilidade surge como um meio para alcançar objectivos de produtividade e de competitividade.

Num SAC existe potencial de melhoria, desde o quadro de alimentação eléctrica até ao último ponto de consumo na extremidade da rede. As boas práticas ou medidas de utilização racional de energia (URE), podem passar por:

- A instalação adequada do equipamento em condições favoráveis, uma alimentação eléctrica de qualidade e um correto dimensionamento das tubagens de ar e condutas de ventilação/extração, que permitam garantir a operacionalidade do equipamento de uma forma mais eficiente e fiável.
- Uma manutenção adequada, que garanta não só uma elevada fiabilidade do equipamento, como o funcionamento deste nas suas condições de referência, por exemplo, um filtro colmatado dá origem a perdas de carga cujo valor sobe de forma exponencial à medida que o tempo for passando, se nada se fizer.
- A substituição de motores eléctricos convencionais por equipamentos de alto rendimento.
- O tipo de tecnologia de compressão adaptado às necessidades de qualidade do ar, pressão de serviço da rede e perfil de consumo/caudal. Pode-se, por exemplo utilizar compressores lubrificados, em instalações onde uma contaminação do ar coloca em causa o processo de fabrico, exige a instalação de multi-estágios de filtragem, que introduzem perdas de carga adicionais no SAC e conseqüentemente um consumo adicional de energia. Ou também para perfis de consumo elevados e estáveis, a melhor opção de compressão poderá passar por turbocompressores. No entanto, se existirem grandes variações, poderá ser mais vantajoso a instalação de compressores de velocidade variável, conjuntamente com outra tecnologia (carga/vazio). Cada instalação ditará qual a melhor solução.

- 
- O tipo de tratamento, o qual deverá sempre depender da qualidade do ar exigido na rede e ser o mais eficiente para a tecnologia de compressão instalada. Por exemplo, para um PDP de -20°C para compressores de parafuso isentos de óleo, podem usar-se secadores de adsorção com regeneração por ar de purga, com regeneração por ar quente ou com regeneração por calor de compressão, sendo este último o que tem maior eficiência face a qualquer um dos outros.  
As unidades de tratamento (secadores e filtros) deverão ser sobredimensionadas para garantir uma perda de carga mínima na rede. O investimento na aquisição irá ser amortizado rapidamente com os benefícios de médio/longo prazo, obtidos com a redução do consumo energético e das necessidades de manutenção.
  - O correcto dimensionamento dos colectores desde o interior da central até à entrada do consumidor, para garantir a mínima perda de carga no sistema e permitir uma pressão na rede nos valores mínimos admissíveis a todos os equipamentos de consumo.
  - A constituição de redes separadas e/ou sistemas localizados multipressão, evitando desperdícios energéticos inerentes à utilização de uma única rede, à qual estão ligados pequenos consumidores em caudal com necessidade de uma pressão de serviço superior.
  - Privilegiar a selecção de equipamentos consumidores de ar comprimido, que executem a mesma função com valores de pressão de serviço mais baixos. Em equipamentos fixos, preferir as ligações roscadas em detrimento dos sistemas de engate rápido. Manter de forma cuidada os equipamentos e evitar utilizar a mesma baixada para vários consumidores.  
Substituir sistemas de criação de vácuo com recurso a ar comprimido (venturi), por bombas de vácuo.
  - Detecção e reparação de fugas nas unidades industriais, o que constitui uma medida de eficiência significativa. Em unidades industriais sem um plano de controlo de fugas, em média estas representam cerca de 20% do consumo.
  - Centrais com mais de um compressor instalado serem equipadas com um sistema de gestão eficaz. Tal sistema garantirá a selecção das máquinas mais adequadas para satisfazer o perfil de consumo, bem como uma gestão eficiente dos equipamentos de reserva.

- 
- No processo de compressão grande parte da potência aplicada ao veio é convertida em energia térmica, a recuperação desse calor deverá constituir uma medida de redução de consumo de energia primária, por via da sua reutilização em aquecimento de fluidos, naves fabris, lavagens, adição de água a caldeiras, etc.

Neste sentido, abordaram-se vários conceitos chave, trouxeram-se algumas realidades à discussão e elencaram-se várias medidas de melhoria. Em síntese as economias de energia são possíveis com:

- Produção e tratamento do ar comprimido;
- Redes de ar comprimido;
- Dispositivos de utilização final;
- Projecto e operação do sistema global.

A aplicabilidade de determinadas medidas e o alcance das economias de energia e de custos que as mesmas possibilitam, dependem da dimensão e da natureza específica da instalação. Apenas uma avaliação do sistema e das necessidades de cada empresa, pode determinar quais as medidas que são aplicáveis e rentáveis sob o ponto de vista económico. Cada instalação é única e existem variadas e distintas possibilidades, sendo de extrema importância o estudo/análise caso a caso.

Com o objetivo de dar continuidade ao trabalho nesta área de análise de eficiência na Indústria, recomendam-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Análise energética à nova central de ar comprimido;
- Optimização do dimensionamento das redes de distribuição de ar comprimido considerando a questão económica e a perdas de carga;
- Avaliação do desempenho do controlador PI em sistemas de ar comprimido que utilizem compressores do tipo parafuso;
- Estudo/pesquisa da modelagem de sistemas industriais através de Lógica e Redes Neurais;
- Avaliação da viabilidade de usos dos sistemas de controlo em unidades Industriais;
- Avaliação do impacto energético na Indústria.

---

## Bibliografia

- [1] **Compressed air manual**, 7th edition, ATLAS COPCO AIRPOWER NV, ISBN 9789081535809, Belgium 2010.
- [2] **International Energy Agency**, World Energy Outlook 2014 Factsheet (2015).
- [3] **British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy** (2015),
- [4] **World Energy Outlook, International Energy Agency** (2014). [consulta em 21 Março 2017].
- [5] **A.B. Rao, E.S. Rubin**, A Technical, Economic, and Environmental Assessment of Amine-Based CO<sub>2</sub> Capture Technology for Power Plant Greenhouse Gas Control, Environmental Science & Technology, 36 (2002) 4467–4475.
- [6] **Improving Compressed Air System Performance: A sourcebook for Industry**, U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy and the Compressed Air Challenge (2003), [consulta em 10 Setembro 2016].
- [7] **Radgen, P., Blaustein, E.** (Eds), Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potencial and Policy Actions, Final Report October 2000
- [8] **Installation Guide**, Guide to the Selection & Installation of Compressed Air Services , 5th Edition, British Compressed Air Society, 2000, [consulta em 16 Setembro 2016].
- [9] **Kaeser University e Kaeser Toolbox**, em [www.kaeser.com](http://www.kaeser.com), [consulta em 28 Setembro 2016].
- [10] **Medidas de Eficiência Energética Aplicáveis à Indústria Portuguesa: Um Enquadramento Tecnológico Sucinto**, ADENE, 2016. [consulta em 15 Outubro 2016].
- [11] **Compressed Air Facts: Control**; Druckluft Effizient, em [www.druckluft-effizient.com](http://www.druckluft-effizient.com) [consulta em 26 Outubro 2016].
- [12] **Boustead, I., Hancock, G.F.**; Handbook of Industrial Energy Analysis, Ellis Horwood, Chichester, 1979

- 
- [13] **Compressed air systems in the European Union** (3), Energy emissions, Savings potencial and policy actions, Peter Radgen and Edgar Blaustein, 161, ISBN 3-932298-16-0, or as PDF document. [consulta em 3 Novembro 2016].
- [14] **British Compressed Air Society Ltd.** Benefits And Applications Of Compressed Air.[Online]BCAS.<http://www.bcas.org.uk/compressed-air-benefits-and-applications.php>. [consulta em 3 de Novembro de 2016.]
- [15] **US-DEPARTMENT OF ENERGY.** Industrial Compressed Air System Energy Efficiency Guide- book. Carroll, Hatch and Associates, Inc., Portland, EUA. 1993. 98p. Sponsored by USDOE, Washington, DC (United States). DOE Contract AC79-908P03940, [consulta em 5 Novembro 2016].
- [16] **Compressed Air Challenge.** Compressed Air Best Pratices – Using KPI’s For Peak Efficiency. 2013].
- [17] **SIEMENS.** Simatic, S7-1200 Programmable Controller System Manual, [consulta em 15 Julho 2017].
- [18] **“Siemens Industry Online Support”** [Online]. Disponível em: <https://support.automation.siemens.com/WW/llisapi.dll?func=cslib.csinfo2&aktprim=99&lang=en>, [consulta em 15 Julho 2017].
- [19] **Laamanen, Arto; Vilenius, Matti – Is it for Digital Hydraulics?** Academia Matti Linjama, Tampere University of Technology Institute of Hydraulics and Automation, The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP’03, May 7-9, 2003, Tampere, Finland; [http://www.tut.fi/cs/groups/public\\_news/@1102/@news/@p/documents/liit/mdbw/mdq0/~edisp/p044763.pdf](http://www.tut.fi/cs/groups/public_news/@1102/@news/@p/documents/liit/mdbw/mdq0/~edisp/p044763.pdf), . [consulta em 6 Fevereiro 2018].
- [20] **SCHNEIDER ELECTRIC.** Guia de Soluções de Eficiência Energética, [consulta em 15 Julho 2017].
- [21] **MikroElektronika** D.O.O. MikroElektronika. [Online] Disponível em: <https://www.mikroe.com/old/plcbook/chapter1/chapter1.htm>. [consulta em 23 Fevereiro 2018].

---

## **ANEXOS**

## Table of contents

<b>Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]</b>	2 - 1
<b>Program blocks</b>	
Main [OB1]	3 - 1
C01 - Controlo CAUDAL [FC1]	4 - 1
GERAL - Analógicas [FC0]	5 - 1
C02 - Controlo CAUDAL [FC2]	6 - 1
C03 - Controlo CAUDAL [FC3]	7 - 1
Parametros [FC4]	8 - 1
<b>System blocks</b>	
<b>Program resources</b>	
C01 - IEC_Timer_TON [DB1]	9 - 1
C02 - IEC_Timer_TON [DB2]	10 - 1
C03 - IEC_Timer_TON [DB3]	11 - 1
<b>Technology objects</b>	12 - 1
<b>PLC tags</b>	
Sinais PLC [50]	
PLC tags	13 - 1
User constants	14 - 1
<b>PLC data types</b>	15 - 1
<b>Watch and force tables</b>	
Force table	16 - 1
Watch table_1	17 - 1
<b>Traces</b>	18 - 1
Measurements	19 - 1
Combined measurements	20 - 1
<b>PLC alarm text lists</b>	21 - 1
<b>Local modules</b>	22 - 1

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### Compressores\_Parametros

#### General\Project information

<b>Name</b>	Compressores_Parametros	<b>Author</b>	Paulo Oliveira
<b>Comment</b>		<b>Slot</b>	1
<b>Rack</b>	0		

#### General\Catalog information

<b>Short designation</b>	CPU 1214C DC/DC/DC	<b>Description</b>	Work memory 100 KB; 24VDC power supply with DI14 x 24VDC SINK/ SOURCE, DQ10 x 24VDC and AI2 on board; 6 high-speed counters and 4 pulse outputs on board; signal board expands on-board I/O; up to 3 communication modules for serial communication; up to 8 signal modules for I/O expansion; 0.04 ms/1000 instructions; PROFINET interface for programming, HMI and PLC to PLC communication
<b>Article number</b>	6ES7 214-1AG40-0XB0	<b>Firmware version</b>	V4.2

#### General\Identification & Maintenance

<b>Plant designation</b>		<b>Location identifier</b>	
<b>Installation date</b>	2018-02-19 21:30:20.127	<b>Additional information</b>	

#### General\Checksums

<b>Text lists</b>	FA 70 E8 75 1D 5A 8E 29	<b>Software</b>	7C 1C 0E 4C D4 2D F4 CE
-------------------	-------------------------	-----------------	-------------------------

#### PROFINET interface [X1]\General

<b>Name</b>	PROFINET interface_1	<b>Author</b>	Paulo Oliveira
<b>Comment</b>			

#### PROFINET interface [X1]\General\Project information

<b>Name</b>	DI 14/DQ 10_1	<b>Comment</b>	
<b>Name</b>	AI 2_1	<b>Comment</b>	

#### PROFINET interface [X1]\Ethernet addresses\Interface networked with

<b>Subnet:</b>	Not connected		
----------------	---------------	--	--

#### PROFINET interface [X1]\Ethernet addresses\IP protocol

<b>IP configuration</b>	Set IP address in the project	<b>IP address:</b>	192.168.0.1
<b>Subnet mask:</b>	255.255.255.0	<b>Use router</b>	False

#### PROFINET interface [X1]\Ethernet addresses\PROFINET

<b>PROFINET device name is set directly at the device</b>	False	<b>Generate PROFINET device name automatically</b>	True
<b>PROFINET device name:</b>	compressores_parametros	<b>Converted name:</b>	compressoresxbparametros4f69
<b>Device number:</b>	0		

#### PROFINET interface [X1]\Time synchronization

<b>Enable time synchronization via NTP server</b>	Enable time synchronization via NTP server		IP addresses
<b>Server 1</b>	0.0.0.0	<b>Server 2</b>	0.0.0.0
<b>Server 3</b>	0.0.0.0	<b>Server 4</b>	0.0.0.0
<b>Update interval</b>	10sec		
<b>CPU synchronizes the modules of the device.</b>	No synchronization		

#### PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel0


<b>Channel address</b>	I0.0	<b>Input filters</b>	6.4 millisec
<b>Enable pulse catch</b>	0		

Totally Integrated Automation Portal			
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel0\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49152
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge0	Rising edge0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel0\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49280
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge0	Falling edge0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel1</b>			
Channel address	I0.1	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel1\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49153
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge1	Rising edge1		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel1\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49281
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge1	Falling edge1		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel2</b>			
Channel address	I0.2	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel2\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49154
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge2	Rising edge2		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel2\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49282
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge2	Falling edge2		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel3</b>			
Channel address	I0.3	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel3\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49155
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge3	Rising edge3		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel3\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49283
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge3	Falling edge3		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel4</b>			
Channel address	I0.4	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel4\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49156
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge4	Rising edge4		

Totally Integrated Automation Portal			
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel4\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49284
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge4	Falling edge4		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel5\</b>			
Channel address	I0.5	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel5\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49157
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge5	Rising edge5		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel5\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49285
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge5	Falling edge5		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel6\</b>			
Channel address	I0.6	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel6\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49158
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge6	Rising edge6		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel6\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49286
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge6	Falling edge6		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel7\</b>			
Channel address	I0.7	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel7\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49159
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge7	Rising edge7		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel7\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49287
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge7	Falling edge7		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel8\</b>			
Channel address	I1.0	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel8\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49160
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge8	Rising edge8		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel8\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49288
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge8	Falling edge8		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel9\</b>			
Channel address	I1.1	Input filters	6.4 millise

Totally Integrated Automation Portal			
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel9\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49161
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge9	Rising edge9		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel9\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49289
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge9	Falling edge9		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel10</b>			
Channel address	I1.2	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel10\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49162
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge10	Rising edge10		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel10\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49290
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge10	Falling edge10		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel11</b>			
Channel address	I1.3	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel11\</b>			
Enable rising edge detection	0	RidPrefixRisingEdgeEvent	49163
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Rising edge11	Rising edge11		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel11\</b>			
Enable falling edge detection	0	RidPrefixFallingEdgeEvent	49291
Event name:	0	Hardware interrupt:	0
Falling edge11	Falling edge11		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel12</b>			
Channel address	I1.4	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Digital inputs\Channel13</b>			
Channel address	I1.5	Input filters	6.4 millise
Enable pulse catch	0		
<b>PROFINET interface [X1]\Analog inputs\Noise reduction</b>			
Integration time	50 Hz (20 ms)		
<b>PROFINET interface [X1]\Analog inputs\Channel0</b>			
Channel address	IW64	Measurement type	Voltage
Voltage range	0..10 V	Smoothing	Weak (4 cycles)
		Enable overflow diagnostics	1
<b>PROFINET interface [X1]\Analog inputs\Channel1</b>			
Channel address	IW66	Measurement type	Voltage
Voltage range	0..10 V	Smoothing	Weak (4 cycles)
		Enable overflow diagnostics	1
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs</b>			
Reaction to CPU STOP	Use substitute value		

Totally Integrated Automation Portal			
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel0</b>			
Channel address	Q0.0	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel1</b>			
Channel address	Q0.1	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel2</b>			
Channel address	Q0.2	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel3</b>			
Channel address	Q0.3	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel4</b>			
Channel address	Q0.4	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel5</b>			
Channel address	Q0.5	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel6</b>			
Channel address	Q0.6	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel7</b>			
Channel address	Q0.7	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel8</b>			
Channel address	Q1.0	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Digital outputs\Channel9</b>			
Channel address	Q1.1	Substitute a value of 1 on a change from RUN to STOP.	0
<b>PROFINET interface [X1]\Operating mode</b>			
IO controller	True	IO system	
Device number	0	IO device	False
<b>PROFINET interface [X1]\I/O addresses\Input addresses</b>			
Start address	0.0	End address	1.7
Organization block	0	Process image	0
<b>PROFINET interface [X1]\I/O addresses\Input addresses</b>			
Start address	64	End address	67
Organization block	0	Process image	0
<b>PROFINET interface [X1]\I/O addresses\Output addresses</b>			
Start address	0.0	End address	1.7
Organization block	0	Process image	0
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Interface options</b>			
Support device replacement without exchangeable medium	True	Permit overwriting of device names of all assigned IO devices	False
Limit data infeed into the network	True	Use IEC V2.2 LLDP mode	False
Keep-Alive connection monitoring	30s		

Totally Integrated Automation Portal			
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Real time settings\IO communication</b>			
Send clock:	1.000ms		
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Real time settings\Real time options</b>			
Calculated bandwidth for cyclic IO data:	0.000ms	Calculated bandwidth for cyclic IO data:	0.000%
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\General</b>			
Name	Port_1	Author	Paulo Oliveira
Comment			
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Port interconnection\Local port:</b>			
Local port:	Compressores_Parametros\PROFINET interface_1 [X1]\Port_1 [X1 P1 R]	Medium:	Copper
Cable name:	---		
			
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Port interconnection\Partner port:</b>			
	Monitoring of partner port is not possible	Partner port:	Any partner
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Port options\Activate</b>			
Activate this port for use	True		
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Port options\Connection</b>			
Transmission rate / duplex:	Automatic	Monitor	False
Enable autonegotiation	True		
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Port options\Boundaries</b>			
End of detection of accessible devices	False	End of topology discovery	False
End of the sync domain	False		
<b>PROFINET interface [X1]\Advanced options\Port [X1 P1]\Hardware identifier\Hardware identifier</b>			
LADDR	65		
<b>PROFINET interface [X1]\Web server access</b>			
Enable Web server using this interface	False	The Web server must also be activated in the properties of the PLC.	
<b>PROFINET interface [X1]\Hardware identifier\Hardware identifier</b>			
Hardware identifier	264	Hardware identifier	64
<b>High speed counters (HSC)\HSC1\General\Enable</b>			
Enable this high speed counter	0	Enable this high speed counter	0
Enable this high speed counter	0	Enable this high speed counter	0
Enable this high speed counter	0	Enable this high speed counter	0
<b>High speed counters (HSC)\HSC1\General\Project information</b>			
Name	HSC_1	Comment	
Name	HSC_2	Comment	
Name	HSC_3	Comment	
Name	HSC_4	Comment	
Name	HSC_5	Comment	
Name	HSC_6	Comment	

Totally Integrated Automation Portal			
<b>High speed counters (HSC)\HSC1\I/O addresses\Input addresses</b>			
Start address	1000.0	End address	1003.7
Start address	1004.0	End address	1007.7
Organization block	0	Start address	1008.0
End address	1011.7	Organization block	0
Process image	0	Start address	1012.0
End address	1015.7	Organization block	0
Process image	0	Start address	1016.0
End address	1019.7	Organization block	0
Process image	0	Start address	1020.0
End address	1023.7	Organization block	0
Process image	0	Organization block	0
Process image	0	Process image	0
<b>High speed counters (HSC)\HSC1\Hardware identifier\Hardware identifier</b>			
Hardware identifier	257	Hardware identifier	258
Hardware identifier	259	Hardware identifier	260
Hardware identifier	261	Hardware identifier	262
<b>Pulse generators (PTO/PWM)\PTO1/PWM1\General\Enable</b>			
Enable this pulse generator	0	Enable this pulse generator	0
<b>Pulse generators (PTO/PWM)\PTO1/PWM1\General\Project information</b>			
Name	Pulse_1	Comment	
Name	Pulse_2	Comment	
<b>Pulse generators (PTO/PWM)\PTO1/PWM1\I/O addresses\Output addresses</b>			
Start address	1000.0	End address	1001.7
Start address	1002.0	End address	1003.7
Organization block	0	Organization block	0
Process image	0	Process image	0
<b>Pulse generators (PTO/PWM)\PTO1/PWM1\Hardware identifier\Hardware identifier</b>			
Hardware identifier	265	Hardware identifier	266
<b>Startup</b>			
Startup after POWER ON	Warm restart - mode before POWER OFF	Comparison preset to actual configuration	Startup CPU even if mismatch
Configuration time	60000ms	OBs should be interruptible	1
<b>Cycle</b>			
Cycle monitoring time	150ms		
Enable minimum cycle time for cyclic OBs	0	Minimum cycle time	1ms
<b>Communication load</b>			
Cycle load due to communication	20%		
<b>System and clock memory\System memory bits</b>			
Enable the use of system memory byte	0	Address of system memory byte (MBx)	1
First cycle		Diagnostic status changed	
Always 1 (high)		Always 0 (low)	
<b>System and clock memory\Clock memory bits</b>			
Enable the use of clock memory byte	0	Address of clock memory byte (MBx)	0
10 Hz clock		5 Hz clock	
2.5 Hz clock		2 Hz clock	
1.25 Hz clock		1 Hz clock	
0.625 Hz clock		0.5 Hz clock	
<b>Web server\General</b>			
Activate Web server on all modules of this device	False	Permit access only with HTTPS	True

Totally Integrated Automation Portal			
<b>Web server\Automatic update</b>			
Enable automatic update	True	Update interval	0s
<b>Web server\User interface languages</b>			
<b>Assign project language</b>		<b>User interface languages</b>	
English (United States)		German	
English (United States)		English	
English (United States)		French	
English (United States)		Spanish	
English (United States)		Italian	
English (United States)		Chinese (simplified)	
<b>Web server\User management</b>			
<b>User name</b>		<b>User rights</b>	
Everybody			
<b>Web server\User defined web pages</b>			
Application name	HTML source path	Default HTML page	Files with dynamic content
		index.htm	.htm;.html
			Web DB number
			333
			Fragment DB number
			334
<b>Web server\Overview of interfaces</b>			
<b>Device</b>		<b>Interface</b>	<b>Enabled web server access</b>
Compressores_Parametros		PROFINET interface_1	False
<b>User interface languages</b>			
<b>Assign project language</b>		<b>User interface languages</b>	
English (United States)		German	
English (United States)		English	
English (United States)		French	
English (United States)		Spanish	
English (United States)		Italian	
English (United States)		Chinese (simplified)	
<b>Time of day\Local time</b>			
Time zone	(UTC +01:00) Berlin, Bern, Brussels, Rome, Stockholm, Vienna		
<b>Time of day\Daylight saving time</b>			
Activate daylight saving time	1	Difference between standard and daylight saving time	60mins
<b>Time of day\Daylight saving time\Start of daylight saving time</b>			
Starting week of the month:	Last		Sunday
of	March	at	01:00 a.m.
<b>Time of day\Daylight saving time\Start of standard time</b>			
	Last		Sunday
of	October	at	02:00 a.m.
<b>Protection &amp; Security</b>			
Level of protection	No protection		
<b>Protection &amp; Security\Connection mechanisms</b>			
Permit access with PUT/GET communication from remote partner	False		
<b>Protection &amp; Security\Security event</b>			
Summarize security events in case of high message volume	False		
<b>Protection &amp; Security\External load memory</b>			
Disable copying from internal load memory to external load memory	False		

Totally Integrated Automation Portal

**Configuration control\Configuration control for central configuration**

**Allow to reconfigure the device via the user program**

0

**Connection resources\**

	Station resources - Reserved - Maximum	Station resources - Reserved - Configured	Station resources - Dynamic - Configured	Module resources - Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] - Configured
Maximum number of resources:		62	6	68
	Maximum	Configured	Configured	Configured
PG communication:	4	-	-	-
HMI communication:	12	0	0	0
S7 communication:	8	0	0	0
Open user communication:	8	0	0	0
Web communication:	30	-	-	-
Other communication:	-	-	0	0
Total resources used:		0	0	0
Available resources:		62	6	68

**Overview of addresses\Overview of addresses\Overview of addresses**

<b>Inputs</b>	True	<b>Outputs</b>	True
<b>Address gaps</b>	False	<b>Slot</b>	True

Type	Addr. from	Addr. to	Module	PIP	Device name	Device number	Size	Master / IO system	Rack	Slot
I	0	1	DI 14/DQ 10_1	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	2 Bytes	-	0	1 1
O	0	1	DI 14/DQ 10_1	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	2 Bytes	-	0	1 1
O	1000	1001	Pulse_1	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	2 Bytes	-	0	1 32
I	1012	1015	HSC_4	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 19
I	1016	1019	HSC_5	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 20
I	1004	1007	HSC_2	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 17
I	1008	1011	HSC_3	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 18
I	64	67	AI 2_1	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 2
I	1000	1003	HSC_1	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 16
I	1020	1023	HSC_6	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	4 Bytes	-	0	1 21
O	1002	1003	Pulse_2	Automatic update	Compressores_Par-	-	2 Bytes	-	0	1 33

Type	Addr. from	Addr. to	Module	PIP	Device name	Device number	Size	Master / IO system	Rack	Slot
					ametros [CPU 1214C DC/DC/DC]					
O	1004	1005	Pulse_3	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	2 Bytes	-	0	1 34
O	1006	1007	Pulse_4	Automatic update	Compressores_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]	-	2 Bytes	-	0	1 35

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### Main [OB1]

#### Main Properties

##### General

Name	Main	Number	1	Type	OB
Language	FBD	Numbering	Automatic		

##### Information

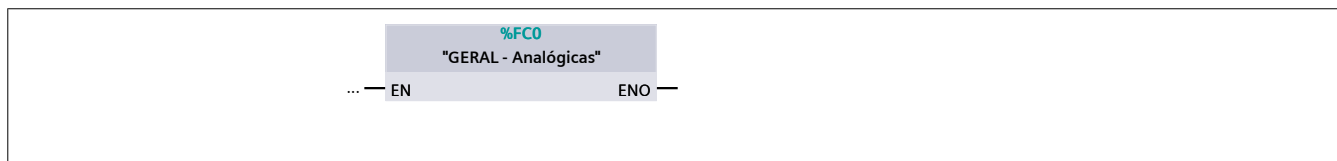
Title	"Main Program Sweep (Cycle)"	Author	PauloOliveira	Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
▼ Input				
Initial_Call	Bool			Initial call of this OB
Remanence	Bool			=True, if remanent data are available
Temp				
Constant				

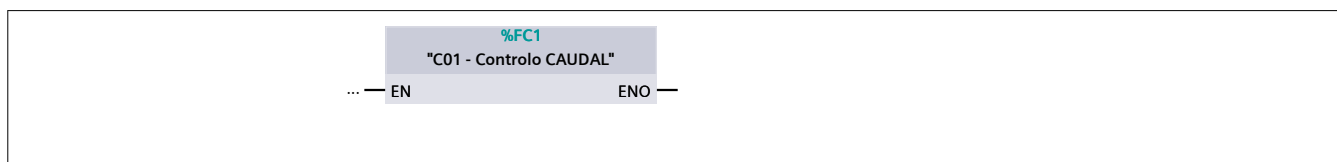
#### Network 1: PARAMETROS PARA CARGA / DESCARGA COMPRESSORES



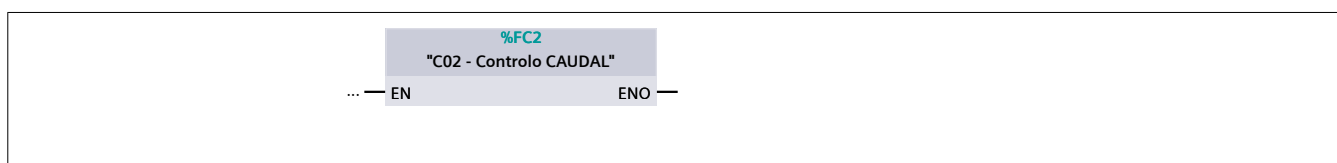
#### Network 2: ANALÓGICAS



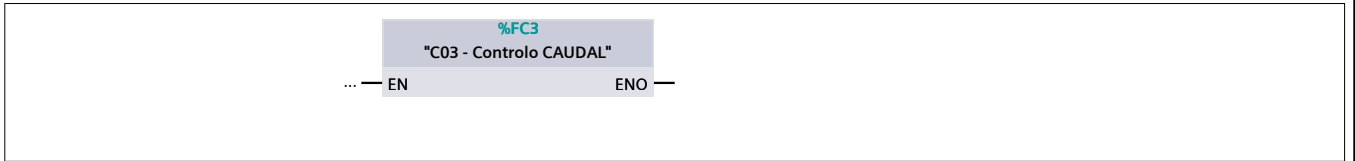
#### Network 3: CONTROLO DO C01



#### Network 4: CONTROLO DO C02



### Network 5: CONTROLO DO C03



## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### C01 - Controlo CAUDAL [FC1]

#### C01 - Controlo CAUDAL Properties

##### General

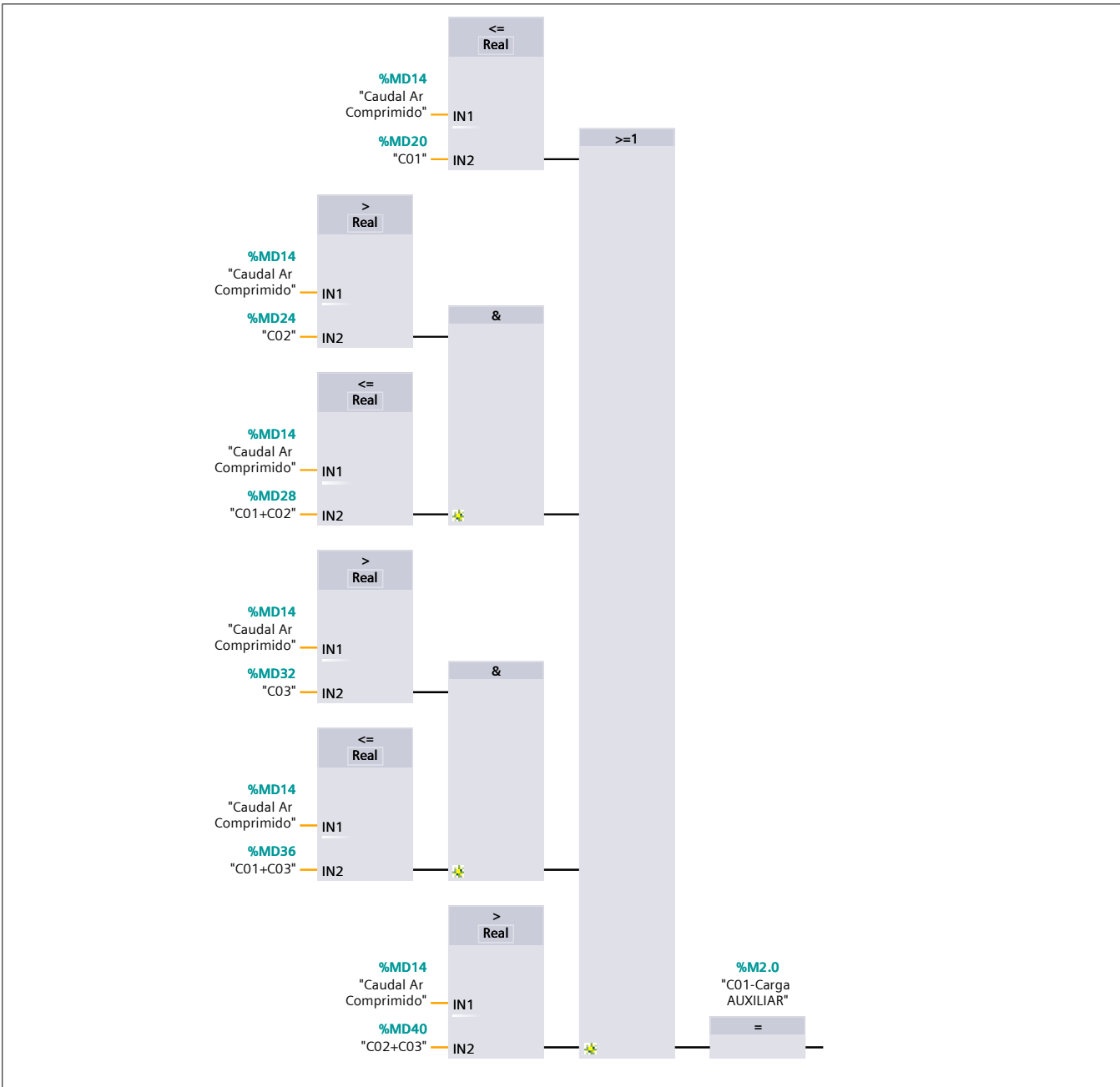
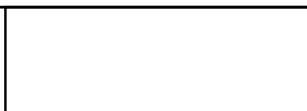
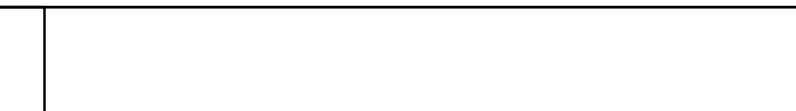
<b>Name</b>	C01 - Controlo CAUDAL	<b>Number</b>	1	<b>Type</b>	FC
<b>Language</b>	FBD	<b>Numbering</b>	Automatic		

##### Information

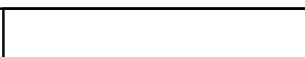
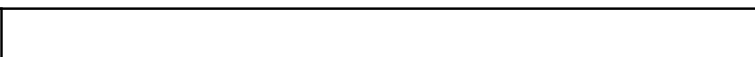
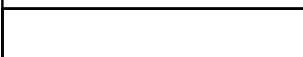
<b>Title</b>		<b>Author</b>	PauloOliveira	<b>Comment</b>	
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>	

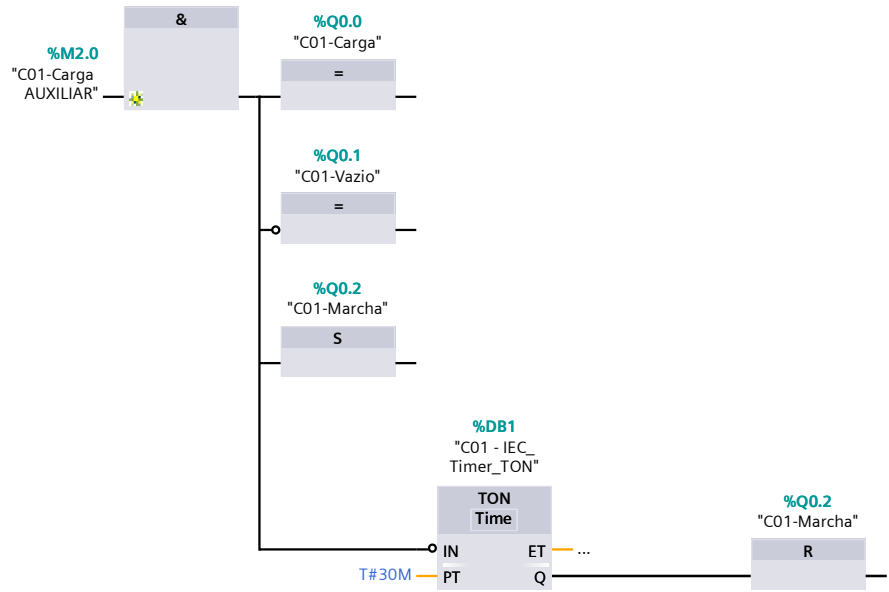
Name	Data type	Default value	Supervi- sion	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
C01 - Controlo CAUDAL	Void			

#### Network 1: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C01 - AUXILIAR PATA- MARES



**Network 2: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C01**





## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### GERAL - Analógicas [FC0]

#### GERAL - Analógicas Properties

##### General

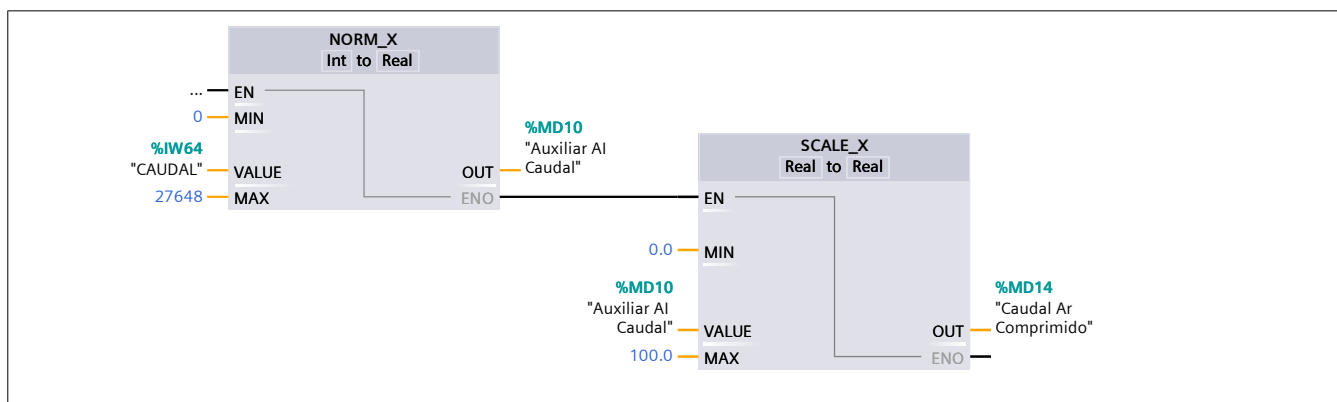
Name	GERAL - Analógicas	Number	0	Type	FC
Language	FBD	Numbering	Manual		

##### Information

Title		Author	PauloOliveira	Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
GERAL - Analógicas	Void			

### Network 1: LEITURA / CONVERSÃO DO SINAL ANALÓGICO DO CAUDAL DO AR COMPRIMIDO



## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### C02 - Controlo CAUDAL [FC2]

#### C02 - Controlo CAUDAL Properties

##### General

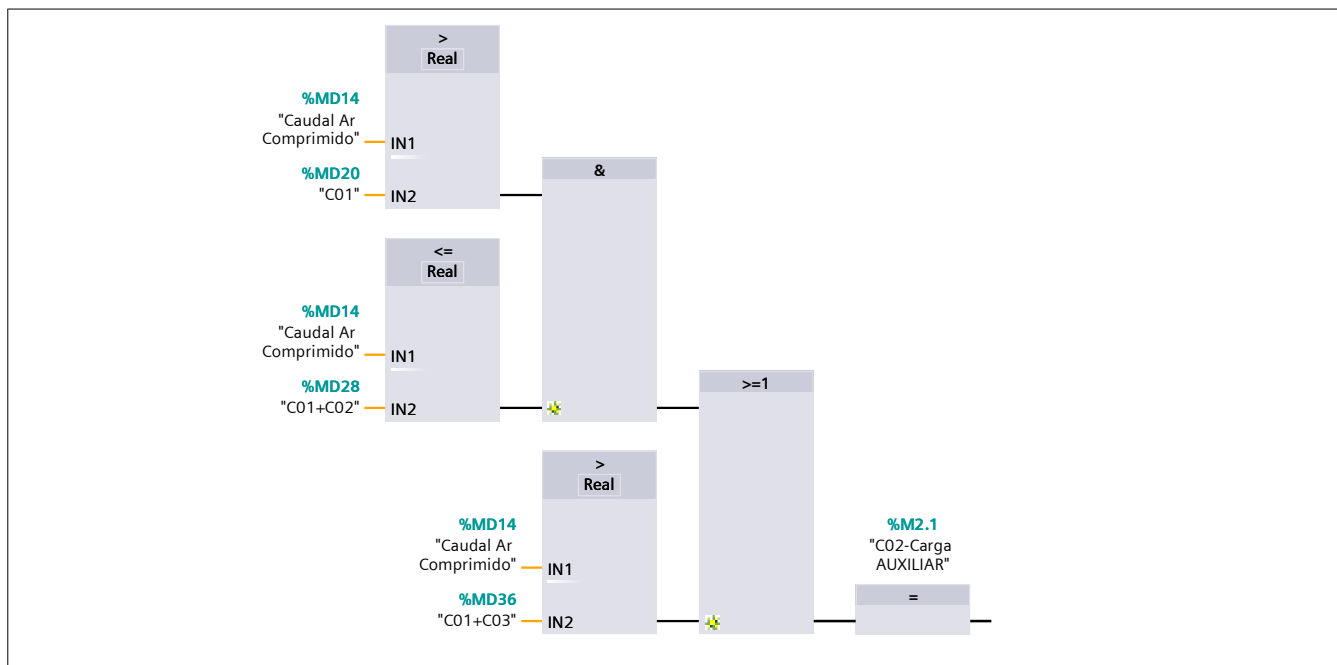
Name	C02 - Controlo CAUDAL	Number	2	Type	FC
Language	FBD	Numbering	Manual		

##### Information

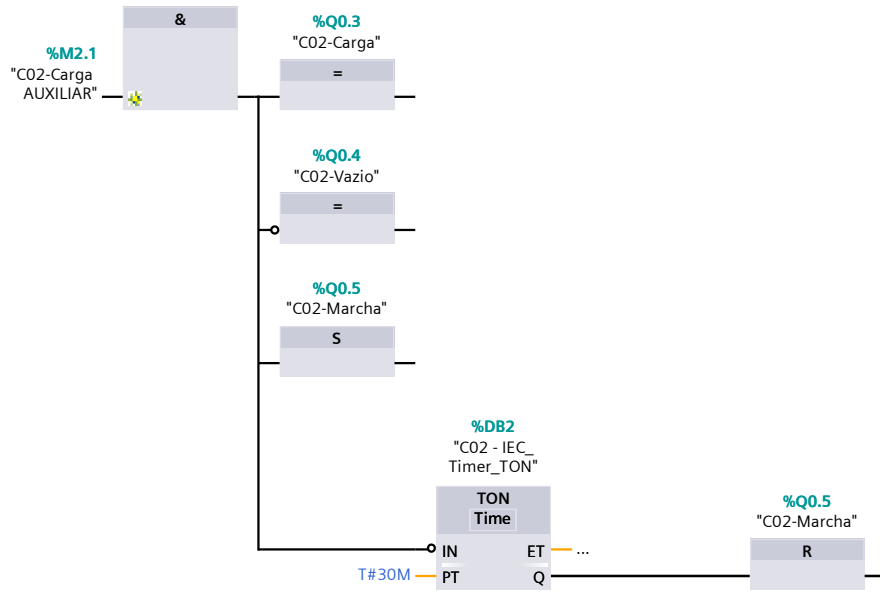
Title		Author	PauloOliveira	Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
C02 - Controlo CAUDAL	Void			

#### Network 1: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C02 - AUXILIAR PATAMARES



#### Network 2: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C02



## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### C03 - Controlo CAUDAL [FC3]

#### C03 - Controlo CAUDAL Properties

##### General

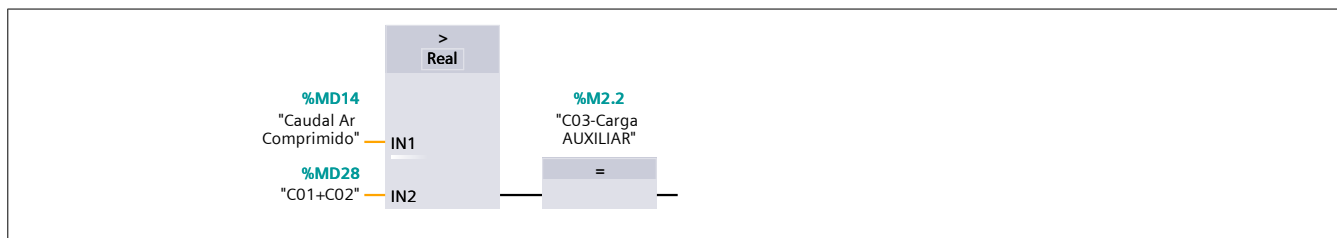
<b>Name</b>	C03 - Controlo CAUDAL	<b>Number</b>	3	<b>Type</b>	FC
<b>Language</b>	FBD	<b>Numbering</b>	Manual		

##### Information

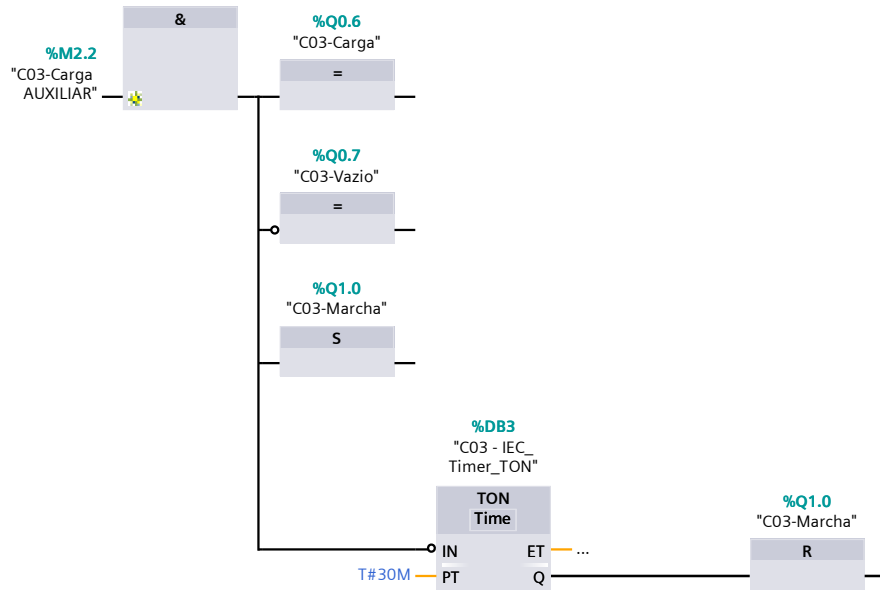
<b>Title</b>		<b>Author</b>	PauloOliveira	<b>Comment</b>	
<b>Family</b>		<b>Version</b>	0.1	<b>User-defined ID</b>	

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
C03 - Controlo CAUDAL	Void			

#### Network 1: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO) DO COMPRESSOR C03 - AUXILIAR PATAMARES



#### Network 2: CONTROLO DE CAUDAL (CARGA / VAZIO / MARCHA) DO COMPRESSOR C03



## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks

### Parametros [FC4]

#### Parametros Properties

##### General

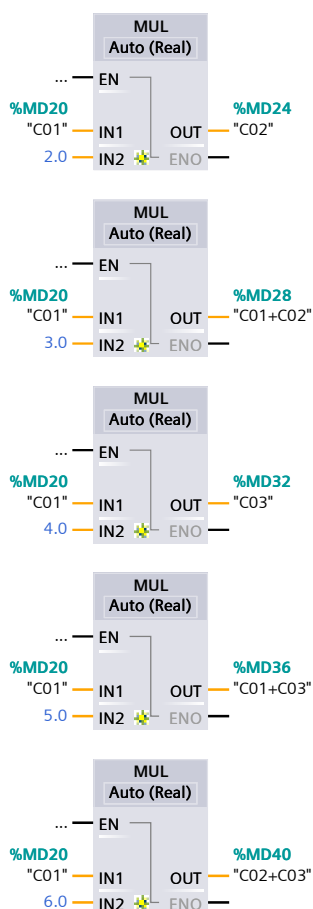
Name	Parametros	Number	4	Type	FC
Language	FBD	Numbering	Automatic		

##### Information

Title		Author		Comment	
Family		Version	0.1	User-defined ID	

Name	Data type	Default value	Supervision	Comment
Input				
Output				
InOut				
Temp				
Constant				
▼ Return				
Parametros	Void			

#### Network 1: PARAMETROS PARA CARGA / DESCARGA COMPRESSORES



## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks / System blocks / Program resources

### C01 - IEC\_Timer\_TON [DB1]

#### C01 - IEC\_Timer\_TON Properties

##### General

<b>Name</b>	C01 - IEC_Timer_TON	<b>Number</b>	1	<b>Type</b>	DB
<b>Language</b>	DB	<b>Numbering</b>	Automatic		

##### Information

<b>Title</b>		<b>Author</b>	Simatic	<b>Comment</b>	
<b>Family</b>	IEC	<b>Version</b>	1.0	<b>User-defined ID</b>	IEC_TMR

Name	Data type	Start value	Retain	Accessible from HMI/O PC UA	Writable from HMI/O PC UA	Visible in HMI engineering	Set-point	Supervision	Comment
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

## Compresores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks / System blocks / Program resources

### C02 - IEC\_Timer\_TON [DB2]

#### C02 - IEC\_Timer\_TON Properties

##### General

<b>Name</b>	C02 - IEC_Timer_TON	<b>Number</b>	2	<b>Type</b>	DB
<b>Language</b>	DB	<b>Numbering</b>	Automatic		

##### Information

<b>Title</b>		<b>Author</b>	Simatic	<b>Comment</b>	
<b>Family</b>	IEC	<b>Version</b>	1.0	<b>User-defined ID</b>	IEC_TMR

Name	Data type	Start value	Retain	Access- ible from HMI/O PC UA	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Super- vision	Comment
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Program blocks / System blocks / Program resources

### C03 - IEC\_Timer\_TON [DB3]

#### C03 - IEC\_Timer\_TON Properties

##### General

<b>Name</b>	C03 - IEC_Timer_TON	<b>Number</b>	3	<b>Type</b>	DB
<b>Language</b>	DB	<b>Numbering</b>	Automatic		

##### Information

<b>Title</b>		<b>Author</b>	Simatic	<b>Comment</b>	
<b>Family</b>	IEC	<b>Version</b>	1.0	<b>User-defined ID</b>	IEC_TMR

Name	Data type	Start value	Retain	Access- sible from HMI/O PC UA	Wri- ta- ble fro m HM I/O PC UA	Visible in HMI engi- neer- ing	Set- point	Super- vision	Comment
▼ Static									
PT	Time	T#0ms	False	True	True	True	False		
ET	Time	T#0ms	False	True	False	True	False		
IN	Bool	false	False	True	True	True	False		
Q	Bool	false	False	True	False	True	False		























## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### Technology objects

This folder is empty.

## Compressores Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / PLC tags / Sinais PLC [50]

### PLC tags

PLC tags									
Name	Data type	Address	Retain	Acces- sible from HMI/O PC UA	Writa- ble from HMI/O PC UA	Visi- ble in HMI engi- neer- ing	Supervision	Comment	
 C01-Carga	Bool	%Q0.0	False	True	True	True			
 C01-Vazio	Bool	%Q0.1	False	True	True	True			
 C01-Marcha	Bool	%Q0.2	False	True	True	True			
 C02-Carga	Bool	%Q0.3	False	True	True	True			
 C03-Carga	Bool	%Q0.6	False	True	True	True			
 C02-Vazio	Bool	%Q0.4	False	True	True	True			
 C03-Vazio	Bool	%Q0.7	False	True	True	True			
 C02-Marcha	Bool	%Q0.5	False	True	True	True			
 C03-Marcha	Bool	%Q1.0	False	True	True	True			
 CAUDAL	Int	%IW64	False	True	True	True			
 Auxiliar AI Caudal	Real	%MD10	False	True	True	True			
 Caudal Ar Comprimi- do	Real	%MD14	False	True	True	True			
 C01-Carga AUXILIAR	Bool	%M2.0	False	True	True	True			
 C02-Carga AUXILIAR	Bool	%M2.1	False	True	True	True			
 C03-Carga AUXILIAR	Bool	%M2.2	False	True	True	True			
 C01	Real	%MD20	False	True	True	True			
 C02+C03	Real	%MD40	False	True	True	True			
 C01+C03	Real	%MD36	False	True	True	True			
 C03	Real	%MD32	False	True	True	True			
 C01+C02	Real	%MD28	False	True	True	True			
 C02	Real	%MD24	False	True	True	True			
 C01+C02+C03	Real	%MD44	False	True	True	True			

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / PLC tags / Sinais PLC [50]

### User constants

#### User constants

Name	Data type	Value	Comment
------	-----------	-------	---------

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### PLC data types

This folder is empty.

## Compresores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Watch and force tables

### Force table

Name	Address	Display format	Force value	Comment
"CAUDAL":P	%IW64:P	DEC+/-	1	

## Compresores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Watch and force tables

### Watch table\_1

Name	Address	Display format	Modify value	Comment
"C01-Carga AUXILIAR"	%M2.0	Bool		
"C02-Carga AUXILIAR"	%M2.1	Bool		
"C03-Carga AUXILIAR"	%M2.2	Bool		
"Caudal Ar Comprimido"	%MD14	Floating-point number	61.0	

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### Traces

Name

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Traces

### Measurements

Name

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC] / Traces

### Combined measurements

Name

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### PLC alarm text lists

This folder is empty.

## Compressores\_Parametros [CPU 1214C DC/DC/DC]

### Local modules

This folder is empty.