



Agência para a Energia

# Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido



# Índice

<b>1. Introdução</b>	<b>4</b>	<b>3. Más utilizações e desperdícios de ar comprimido</b>	<b>18</b>
1.1. Porquê a necessidade de controlar a produção de ar comprimido?	6	3.1. Utilizações inapropriadas	20
1.2. O que é um sistema de ar comprimido eficiente sob o ponto de vista energético?	8	3.2. Desperdícios energéticos	21
1.3. Práticas recomendáveis na aquisição de equipamentos/SAC, para garantir uma melhor eficiência energética. Análise de Custos do Ciclo de Vida	9	3.2.1. Fugas	21
		3.2.1.1. Identificação e medição de fugas	22
		3.2.2. Perdas de carga	24
		3.2.3. Compressor a funcionar quando não há necessidades de ar comprimido a satisfazer	25
<b>2. Como gerir um Sistema de Ar Comprimido</b>	<b>10</b>	<b>4. Rede de distribuição de ar comprimido</b>	<b>28</b>
2.1. Formulação e implementação de uma política energética específica para os SAC	13	4.1. Dimensionamento de tubagens	28
2.2. Determinação de utilizações e custos associados ao ar comprimido. Auditorias/ Diagnósticos	14	4.2. Configuração ( <i>layout</i> ) da rede	29
2.3. Identificação de oportunidades para melhoria	16	4.3. Materiais e especificação de acessórios utilizados na rede do SAC	29
2.4. Manutenção	16	4.4. Redes dedicadas por níveis de pressão de serviço	31
2.5. Sensibilização do pessoal técnico e seu envolvimento	17	<b>5. Compressores</b>	<b>32</b>
		5.1. Tipos de compressores	34
		5.2. Seleção do compressor	38
		5.2.1. Definição de capacidade de um compressor	38

5.3.	Melhorias na eficiência do compressor existente	40	8.	<b>Gestão de condensados</b>	62
5.3.1.	Localização e instalação do compressor	40	8.1.	Recolha de condensados	64
5.3.2.	Manutenção e <i>upgrade</i> do compressor	41	8.2.	Tratamento de condensados	65
5.3.3.	Recuperação de calor	42	9.	<b>Síntese de potenciais de economia de energia associados às principais medidas de URE possíveis de implementar em Sistemas de Ar Comprimido</b>	66
5.3.4.	Lubrificantes	43			
5.3.5.	Sistemas de controlo do compressor	43			
5.4.	Controlo de múltiplos compressores	45			
6.	<b>Armazenamento de ar</b>	46			
6.1.	Dimensionamento do reservatório de ar comprimido	48			
6.2.	Reservatórios de ar adicionais localizados	49			
7.	<b>Tratamento de ar</b>	50			
7.1.	Qualidade do ar	52			
7.2.	Secagem	54			
7.3.	Filtragem	60			

# I. Introdução

- I.1. Porquê a necessidade de controlar a produção de ar comprimido?
- I.2. O que é um Sistema de Ar Comprimido eficiente sob o ponto de vista energético?
- I.3. Práticas recomendáveis na aquisição de equipamentos/SAC, para garantir uma melhor eficiência energética. Análise de Custos do Ciclo de Vida

---

# ção

# I. Introdução

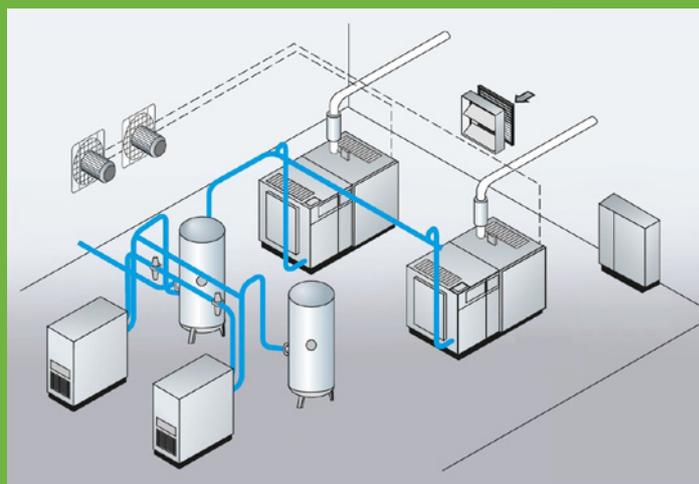
## I.1. Porquê a necessidade de controlar a produção de ar comprimido?

Os Sistemas de Ar Comprimido (SAC) são dos principais consumidores de energia elétrica na indústria Europeia, sendo responsáveis por mais de 10% do consumo de eletricidade deste setor. Em Portugal, o consumo associado aos SAC na indústria ronda os 2,8 TWh/ano.

Aplica-se aqui a terminologia “sistemas de ar comprimido”, como sendo um tipo de sistemas acionados por motores elétricos, neste caso responsáveis pelo fornecimento de ar comprimido e que têm em comum:

- O acionamento elétrico, consistindo de um motor e eventualmente um controlador eletrónico do motor, que converte a energia elétrica em energia mecânica na forma de um veio rotativo, e o elemento compressor, que utiliza a energia mecânica fornecida pelo motor para comprimir um fluido de trabalho (ar);
- Os sistemas auxiliares de tratamento de ar comprimido e condensados que garantam a qualidade necessária requerida pelos dispositivos de utilização final;

- A rede de tubagens através da qual circula o ar comprimido e que interliga os sistemas de produção e tratamento aos dispositivos de utilização final, que convertem a energia mecânica do ar comprimido em trabalho;
- O equipamento de controlo para regular a produção do sistema às necessidades dos consumidores finais.



**Fig.1- Exemplo típico de um sistema de ar comprimido**

A utilização do ar comprimido é transversal a toda a indústria, devido à segurança, versatilidade de aplicações e produtividade que garante. Contudo, a sua produção origina custos elevados que podem representar entre 5 e 20% dos custos globais da energia elétrica do processo de fabrico. Por essa razão necessita de ser controlado tanto na produção e na sua distribuição, como na boa utilização no consumidor final.

No ciclo de vida de um SAC, o consumo de energia é a parcela mais significativa nos seus custos de operação, representando em média cerca de 80 a 90%. A otimização do SAC é imperativa na maioria das indústrias, por forma a reduzir custos energéticos e dessa forma incrementar a sustentabilidade. É de salientar que o desempenho destes sistemas, em termos de eficiência energética, depende não só do desempenho e rendimento de cada componente (motor, compressor, sistema de controlo, rede de distribuição, ...), mas também e sobretudo da conceção e operação de todo o sistema.

A monitorização contínua dos custos associados à produção de ar comprimido permite identificar possíveis desvios nos consumos originados por

ineficiências ou desperdícios. As alterações do perfil de produção devem originar uma reavaliação dos parâmetros de monitorização do SAC, que permitam identificar e corrigir essas ineficiências, de acordo com o indicador global do processo industrial (tep, kWh/t, ...).

O valor do consumo específico do SAC (J/l, kWh/m<sup>3</sup>, ...) deve ser monitorizado em períodos semanais, mensais e anuais de forma a tornar possível a identificação de desvios a curto, médio e longo prazo e proceder a eventuais correções que permitam o mínimo consumo energético para uma máxima produção.

Uma monitorização eficiente de um SAC permite controlar continuamente os custos na produção de ar comprimido e manter o sistema na sua máxima eficiência energética, além de contribuir para o aumento da sua fiabilidade e do seu desempenho e minimizar o impacto ambiental por via da redução do consumo de energia elétrica e consequentemente das emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> associadas. Só desta forma será possível garantir uma produtividade sustentável.

## 1.2. O que é um Sistema de Ar Comprimido eficiente sob o ponto de vista energético?

Um SAC energeticamente otimizado é o que garante a produção de ar comprimido necessária, com o mínimo consumo energético, tendo em conta o parque de máquinas existente.

Atualmente, o elevado nível de automatização dos processos industriais origina elevados consumos de ar comprimido, requerendo uma alta fiabilidade e uma disponibilidade total dos equipamentos de forma a garantir a continuidade do processo de produção.

Além da fiabilidade e da disponibilidade, também deve ser tomada em consideração a otimização na gestão dos equipamentos, de forma a garantir uma redução significativa dos custos energéticos na produção do ar comprimido. Os sistemas de gestão de centrais de compressores (Gestores) podem no limite controlar redes de diferentes pressões, partilhando compressores entre elas (desde que os equipamentos trabalhem dentro dos seus limites de operação), garantindo não só uma solução mais eficiente para as redes distintas, assim como melhorar a condição de equipamentos de reserva.

A banda de regulação nos compressores de velocidade variável, também é um fator importante

a considerar, nomeadamente quanto à sua utilização dentro da zona ótima de trabalho destes equipamentos (gama de rotações por minuto (rpm) onde o consumo específico (rácio J/l) é menor).

A eficiência energética também está diretamente relacionada com a utilização adequada dos compressores de carga-vazio. A redução dos tempos de funcionamento em vazio deve ser considerada, especialmente quando originam consumos energéticos que penalizam a eficiência global do SAC.

Para além da seleção adequada do compressor, deverão ser tomados em consideração aspetos como a localização da central de compressores, o nível da qualidade do ar, o controlo de fugas, a minimização da pressão de serviço da rede, a manutenção adequada dos equipamentos, a sensibilização de todos os utilizadores de ar comprimido para o uso correto desta utilidade e a implementação de práticas de monitorização de consumos, entre outros, dado que são fatores que contribuem para o incremento da eficiência energética dos SAC e que se devem manter ao longo do ciclo de vida destes sistemas.

## 1.3. Práticas recomendáveis na aquisição de equipamentos/SAC, para garantir uma melhor eficiência energética. Análise de Custos do Ciclo de Vida

Por vezes as soluções inovadoras e energeticamente mais eficientes, podem apresentar custos iniciais mais elevados no investimento. No entanto, num curto período de tempo a diferença estará amortizada quando contabilizada a redução do valor da fatura energética.

Quando se opta por uma política de um menor preço de aquisição, em detrimento de uma solução energética mais eficiente, opta-se por um custo energético acrescido durante toda a vida útil desse mesmo equipamento.

### Exemplo:

Considere-se um compressor lubrificado com uma potência de 160 kW, arrefecido a ar, que trabalha num regime de carga constante. Passados 4 meses de funcionamento, os custos de energia consumida são superiores ao seu valor de aquisição:

$$182 \text{ kW} \times 2880 \text{ h} = 524.160 \text{ kWh}$$
$$524.160 \text{ kWh} \times 0,10 \text{ €/kWh} = 52.416,00 \text{ €}$$

Se for tomada em consideração uma vida útil de 10 anos, esta máquina irá consumir aproximadamente 14.560.000 kWh, o que ao custo médio atual do kWh representará 1.456.000,00 € em energia.

Um compressor que seja 4% mais eficiente representa uma redução de custos energéticos em cerca de 58.000,00 € no seu ciclo de vida a 10 anos, valor que ultrapassa largamente o seu valor de aquisição.

Para o mesmo equipamento, uma manutenção adequada, representa em média cerca de 8% dos custos do ciclo de vida do compressor.

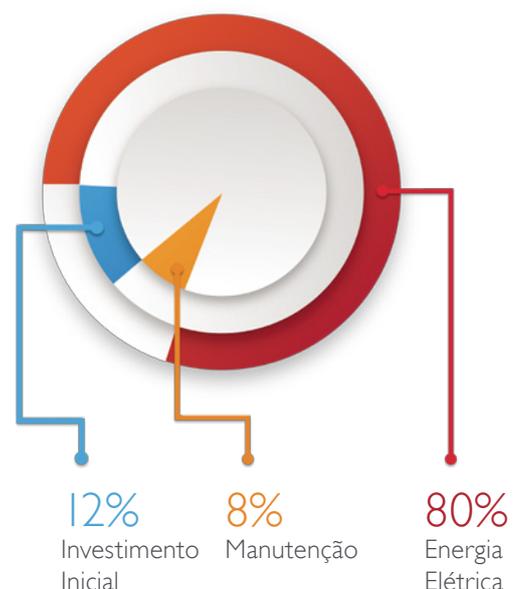


Fig.2- Custos do Ciclo de Vida de um compressor

# 2. Como gerir um Sistema de Ar Comprimido

- 1.1. Formulação e implementação de uma política energética específica para os SAC
- 2.2. Determinação de utilizações e custos associados ao ar comprimido. Auditorias/Diagnósticos
- 2.3. Identificação de oportunidades para melhoria
- 2.4. Manutenção
- 2.5. Sensibilização do pessoal técnico e seu envolvimento

---

# erir na de rimido

## 2. Como gerir um Sistema de Ar Comprimido

A gestão de um Sistema de Ar Comprimido não passa apenas pela otimização do funcionamento da central de compressores. A utilização do ar comprimido requer o compromisso de todos

os intervenientes na aplicação de boas práticas, desde a sua produção até ao utilizador final, com o objetivo de melhorar a eficiência energética do SAC, garantindo uma produtividade sustentável.

## 2.1. Formulação e implementação de uma política energética específica para os SAC

Para a formulação e implementação de uma política de eficiência energética num SAC, é necessário conhecer o perfil de consumo da instalação, com base num registo temporal representativo da realidade atual, que permitirá simular cenários de melhoria e estimar com alguma segurança os possíveis potenciais de poupança com a implementação dessas melhorias.

Um registo de dados deve considerar medições efetivas de energia, caudal e pressão num período de 7 dias consecutivos, representativos de uma semana típica de produção. Com base nos dados obtidos, serão simulados diferentes cenários que permitirão apresentar a solução mais eficiente, podendo passar ou não pela aquisição de novos equipamentos.

A implementação das soluções deverá ser prioritária, evitando o acumular de perdas sucessivas. Deve ser faseada, começando por aquelas cujo impacto seja mais significativo e imediato. Por último deverá ser complementada com as restantes medidas identificadas. Após cada implementação, existem sempre pequenos ajustes para adaptação plena das soluções ao sistema produtivo.

Para tal é necessário que na estrutura interna das empresas exista um responsável pela coordenação e gestão dos SAC e da política energética dessa vertente, incluindo a política de aquisição de equipamentos, não permitindo que tais responsabilidades sejam diluídas, ou mesmo ignoradas, por vários departamentos ou pessoas, sobretudo de áreas não técnicas.

## 2.2. Determinação de utilizações e custos associados ao ar comprimido. Auditorias/Diagnósticos

Para determinar a utilização e os custos associados ao ar comprimido, será necessário uma recolha rigorosa de informação, relativa não só aos consumos energéticos, mas também do perfil de consumo de ar comprimido. Para tal será necessário efetuar um diagnóstico ou auditoria energética, com medições efetivas ou estimadas, tendo por base os instrumentos de medição existentes na instalação ou em alternativa recorrer a auditoria externa para determinar ou complementar a informação relativa aos custos associados à produção de ar comprimido.

**Meios alternativos** para estimar valores de consumo de energia e caudal:

- Com base nos tempos de operação dos compressores e especificações técnicas dos mesmos, poderá ser calculado o volume de ar produzido e respetiva energia consumida.
  - Por exemplo num compressor de carga/vazio, com base nas horas de carga e de vazio podemos estimar as médias dos consumos energéticos e o volume de ar produzido.

**Exemplo:**

**Energia consumida (kWh) = (Horas carga x kW em carga + Horas de vazio x kW em vazio)**

**Volume produzido (m<sup>3</sup>) = (Horas carga x caudal produzido (l/s) x 3,6)**

**Meios de medição efetiva** de valores de consumo de energia e caudal:

- Instalação de caudalímetros para determinar o perfil de consumo de ar comprimido.
- Sensores de pressão para permitir análise de perdas de carga.
- Equipamentos de registo de consumo energético.

Os dados devem ser obtidos numa semana típica de produção e representativos da realidade dos consumos do SAC.

A auditoria/diagnóstico energético de um SAC deverá ter uma abordagem cíclica composta pelos seguintes pontos:



**Fig.3- Ciclo de abordagem ao processo de otimização de um SAC**

## 1. Pré-auditoria:

Sendo a pré-auditoria uma fase de identificação de possíveis melhorias na operação de um SAC, torna-se importante nesta fase conhecê-lo em detalhe, desde a fase de produção e tratamento do ar comprimido até à sua distribuição. Conhecer em pormenor os processos em que este é utilizado, questionando sempre a possibilidade de fazer de forma diferente, tentando identificar ineficiências e possíveis melhorias. A pré-auditoria é uma fase de observação e interação com quem diariamente trabalha no processo produtivo.

A pré-auditoria irá definir qual o plano de ações e o âmbito da auditoria a realizar. Nesta fase poderá ser estimado o potencial de poupanças expectável, mesmo que de uma forma grosseira.

Deverá ser definido quem irá fazer o quê, como o fará, onde o executará e quando irá acontecer (o quê, onde, como e quando).

## 2. Auditoria:

Após identificados os possíveis pontos de melhoria, é na fase da auditoria que serão alocados os recursos materiais e humanos necessários para a realização das medições, que irão permitir que o estudo elaborado seja o mais completo possível. É também nesta fase que serão identificados e criadas as condições para que as medições sejam feitas de forma precisa.

A auditoria será a fase onde se irão recolher os dados necessários para obter todas as respostas às perguntas levantadas/estruturadas na pré-auditoria.

Muitas serão as variáveis a registar, de salientar o caudal, a pressão e a energia consumida.

Estas medidas poderão ser aplicadas a uma área específica ou a toda a unidade fabril, dependendo do objetivo e plano definido na pré-auditoria.

## 3. Recomendações:

Nesta fase são apresentadas soluções que permitam obter poupanças energéticas significativas, de forma sustentável, tanto no SAC como no processo produtivo que permitam uma melhoria na qualidade do produto acabado.

## 4. Otimização:

Depois da implementação das ações planeadas e com o surgir dos resultados, verifica-se a necessidade de alguns ajustes e afinações. O processo de otimização tem como objetivo pequenos ajustes para plena adaptação das soluções implementadas ao sistema produtivo.

## 5. Monitorização de dados:

Os sistemas de monitorização devem garantir em tempo real, que o sistema está a operar dentro dos limites estabelecidos, permitindo identificar os desvios significativos aos valores expectáveis.

O ciclo fecha-se com auditorias regulares, que poderão originar novas recomendações e medidas adaptadas à presente e futuras realidades.

## 2.3. Identificação de oportunidades para melhoria

Num SAC existe potencial para melhorias, desde o quadro de alimentação elétrica aos equipamentos, até ao consumidor final da rede de ar comprimido. As oportunidades mais evidentes ou frequentes estão normalmente associadas a:

- Redução do caudal de fugas de ar comprimido;
- Quedas de pressão resultantes de um mau dimensionamento da rede de tubagens ou dos equipamentos auxiliares de ar comprimido;
- Défice de manutenção;

- Equipamento mal ajustado ou com uma gestão ineficiente;
- Equipamento sobredimensionado.

As redes de ar comprimido estão constantemente sujeitas a alterações, em parte devido à degradação das tubagens (corrosão) ou com a modificação do *layout* (ampliação não estruturada), fatores esses que obrigam a uma procura permanente por melhorias, que permitam manter o SAC otimizado na máxima eficiência admissível.

## 2.4. Manutenção



**Fig.4- Ação de manutenção de compressor**

A execução das ações de manutenção preventiva conforme indicação do fabricante, poderão entre outros aspetos manter inalterada a eficiência dos equipamentos. Uma manutenção adequada garante que os equipamentos trabalhem dentro dos parâmetros de referência, sem aumentos dos consumos energéticos. Além de garantir uma maior fiabilidade, prolonga a vida útil dos equipamentos e minimiza os possíveis riscos de contaminação do produto final.

**Exemplo:**

Um compressor de parafuso lubrificado, equipado com um filtro separador que retira do ar comprimido grande parte do óleo usado no processo de compressão, evitando que este seja arrastado para a linha. Este filtro vai colmatando ao longo do tempo, perdendo a capacidade de reter o óleo. Deste modo, para garantir a pressão de regulação, este terá de vencer uma perda de carga originada por esta colmatação, o que se traduz num consumo energético acrescido. O equipamento poderá operar sem apresentar avaria, no entanto existe uma perda de eficiência camuflada e o risco de contaminar com óleo o produto final.

## 2.5. Sensibilização do pessoal técnico e seu envolvimento



**Fig.5- Formação técnica de pessoal**

Devem ocorrer ações de sensibilização para que todos tenham conhecimento de quanto custa a produção do ar comprimido e os riscos inerentes à utilização do mesmo, bem como do impacto da interdependência dos vários componentes de um SAC.

É obrigação de todo o pessoal técnico que se encontra envolvido a operar com o SAC, garantir que o equipamento e a rede de distribuição de ar comprimido não apresentem perdas energéticas.

Devem ser implementadas rotinas de manutenção dos equipamentos, efetuadas por pessoal competente e devidamente qualificado, respeitando os períodos aconselhados pelo fabricante. Devem ser implementadas rotinas de deteção e reparação de fugas na rede de ar comprimido, evitando-se assim desperdícios energéticos.

Nos períodos de paragem na laboração, os operacionais devem prever a paragem dos compressores ou o isolamento das áreas inoperativas, de forma a evitar horas de trabalho desnecessárias nas máquinas e o consequente consumo de energia associado.

# 3. Más útil e desperd ar compri

- 3.1. Utilizações inapropriadas
- 3.2. Desperdícios energéticos
  - 3.2.1. Fugas
  - 3.2.2. Perdas de carga
  - 3.2.3. Compressor a funcionar quando não há necessidades de ar comprimido a satisfazer

---

# izações íciós de mido

## 3. Más utilizações e desperdícios de ar comprimido

### 3.1. Utilizações inapropriadas

O ar comprimido deve ser utilizado de uma forma racional em aplicações que efetivamente necessitem desta forma de energia para a sua eficiente operação. Processos que possam ser efetuados por outros meios, ou com a utilização de tecnologias mais eficientes, devem ser privilegiados em detrimento da utilização de ar comprimido para esses fins, uma vez que se utilizado ar comprimido tal opção refletir-se-á gravosamente nos custos energéticos do SAC.

Entre alguns exemplos de utilizações inapropriadas de ar comprimido destacam-se:

- Processos de limpeza;
- Produção de vácuo com efeito de Venturi;
- Para arrefecimento/secagem do produto final.

Nalguns casos, são possíveis em média, economias de energia na ordem dos 40%, com esta mudança de comportamentos e/ou opções tecnológicas.

**Tabela 1- Alternativas à aplicação de ar comprimido**

Aplicação	Alternativa ao Ar Comprimido
Ventilação	Ventiladores ou sopradores
Agitação de líquidos	Agitadores mecânicos ou sopradores
Limpeza de pavimentos ou pessoas	Escovas ou aspiradores elétricos
Rejeição de produtos de uma linha de processo	Braços mecânicos
Transporte pneumático	Sopradores ou telas transportadoras

## 3.2 Desperdícios energéticos

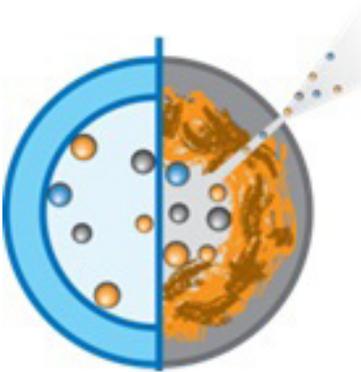
Englobam-se nesta classificação as fugas de ar comprimido, as perdas de carga e a operação do(s) compressor(es) quando não há necessidades de ar comprimido a satisfazer.

### 3.2.1 Fugas

As fugas podem representar, em média, cerca de 10 a 15 % do consumo de ar comprimido num SAC, havendo contudo instalações com valores superiores a estes (até 30-40%). Essas fugas devem ser localizadas e reparadas com a máxima brevidade. Pequenas fugas são inevitáveis mesmo em redes bem concebidas e com uma adequada manutenção, mas é inaceitável que o seu valor represente mais de 5% do consumo dos compressores.

Tubagens degradadas por corrosão, uniões de tubos (roscas, flanges, válvulas, etc), pontos de ligação através de “ligações rápidas”, mangueiras plásticas para alimentação de máquinas, cilindros pneumáticos e eletroválvulas de comando pneumático, são normalmente os pontos que deverão ser foco de análise no controlo de fugas.

A Tabela seguinte permite estimar caudais de fugas de ar comprimido. Por exemplo, uma fuga num orifício com um diâmetro de 1 mm e a uma pressão de 8 bar(a) corresponde a um desperdício de 0,0811 m<sup>3</sup>/min.



**Fig.6- Exemplo de uma fuga**

**Tabela 2- Determinação do caudal de fugas (m<sup>3</sup>/min) com base na pressão do ar comprimido e no diâmetro do orifício por onde se verifica a fuga**

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

Como se depreende desta Tabela, também a utilização num SAC de uma pressão maior do que o devido contribui para o acréscimo de fugas.

## 3.2.1.1 Identificação e medição de fugas

### Identificação:

Hoje em dia é fácil localizar as fugas mesmo em ambientes ruidosos, recorrendo a equipamentos que detetam o ponto exato com recurso a aparelhos de ultrassons e sem necessidade de interromper a laboração. Os métodos tradicionais de deteção (por audição, com recurso a espuma de sabão, etc.)

tornam-se pouco eficientes, nomeadamente em ambientes ruidosos e de difícil acesso.

É importante que em todas as empresas utilizadoras de ar comprimido seja prática comum a implementação de um programa regular de verificação e eliminação de fugas de ar comprimido.



**Fig.7- Aparelho de Ultrassons**

Alguns SAC têm caudalímetros instalados para efeitos de monitorização. Com tais dispositivos é possível medir o consumo de ar comprimido quando os equipamentos produtivos não estão em operação, dando assim uma boa indicação sobre o nível de fugas. Na falta dessa instrumentação permanente, pode recorrer-se à sua instalação provisória.

#### **Medição:**

A medição deverá ser efetuada por método direto, recorrendo a um caudalímetro para medição de caudal real, num período de paragem na produção.

Não sendo possível medir, podemos sempre recorrer a outras alternativas, como a que se indica a seguir.

#### **Estimativa:**

Existem métodos indiretos que permitem estimar este caudal de fugas de forma grosseira, realizando o registo do tempo de queda de pressão de 1 bar, num volume estimado da rede (incluindo reservatórios). Outra alternativa será registar o tempo de carga, num determinado período, de um compressor de carga/vazio, tendo como base a capacidade de referência desse compressor.

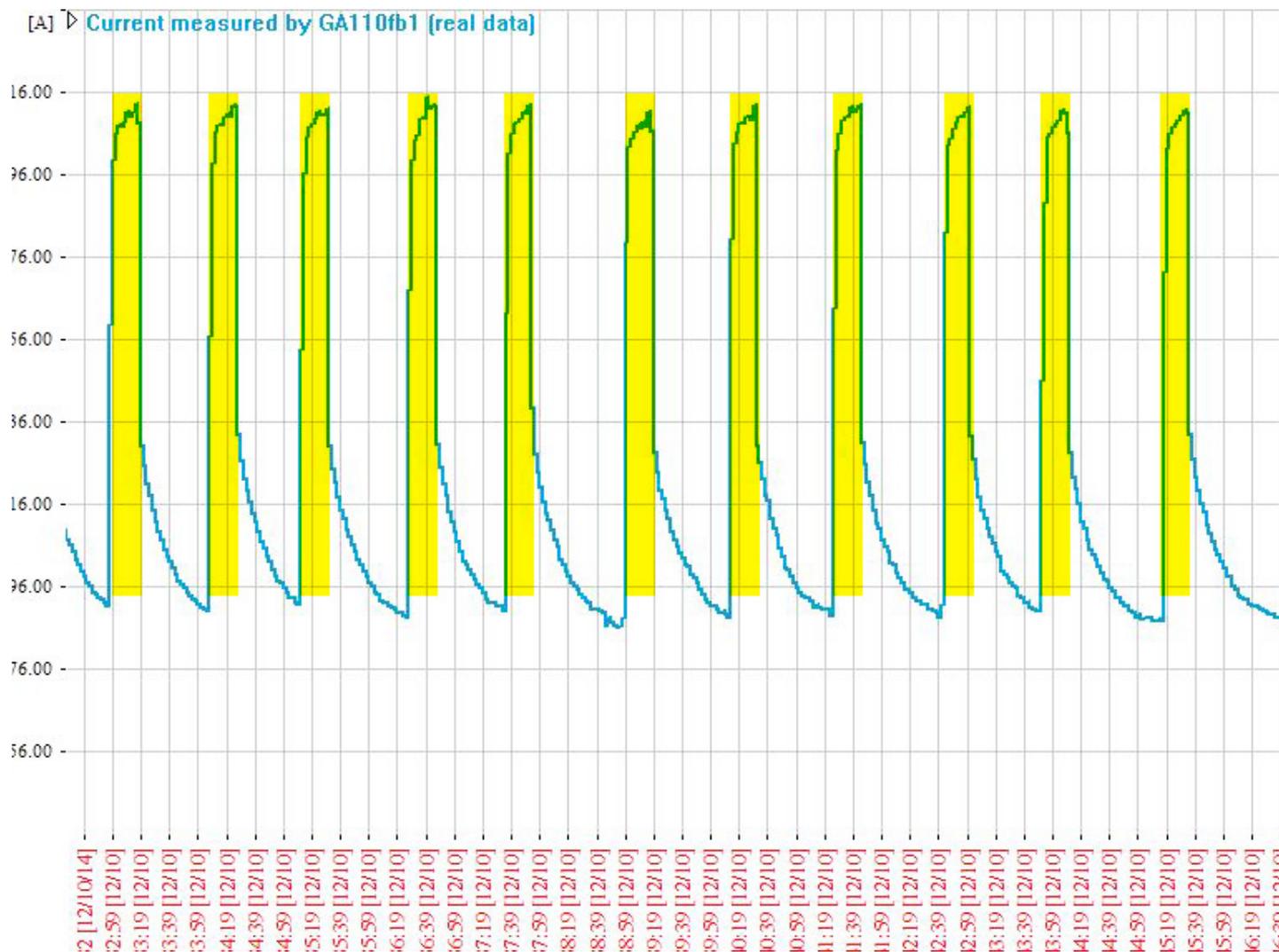
$$Q_f = Q_c \times t/T$$

Q <sub>f</sub>	Caudal de fugas (m <sup>3</sup> /s)
Q <sub>c</sub>	Capacidade do compressor (m <sup>3</sup> /s)
t	Tempo durante as quais o compressor laborou em carga (s)
T	Tempo total {carga/vazio} (s)

#### **Fórmula 1- Cálculo de estimativa de caudal de fugas**



**Fig.8- Caudalímetro**



**Fig.9- Perfil de um compressor de carga/vazio**

## 3.2.2. Perdas de carga

As perdas de carga introduzidas pelas tubagens e respetivos acessórios ou coletores de uma rede de ar comprimido têm um custo significativo, o qual deverá ser tomado em consideração, que estará presente 24 horas por dia, 365 dias do ano, durante todo o ciclo de vida da instalação.

Nestas circunstâncias, o compressor tem que produzir ar a uma pressão suficientemente elevada para fazer face a estas perdas de carga no sistema

e ainda atingir a pressão mínima de operação dos equipamentos de utilização final ou de processo. É frequente encontrar-se compressores produzindo ar a uma pressão de 8 bar(e) e com a pressão necessária no ponto de utilização a ser apenas de 6,5 bar(e).

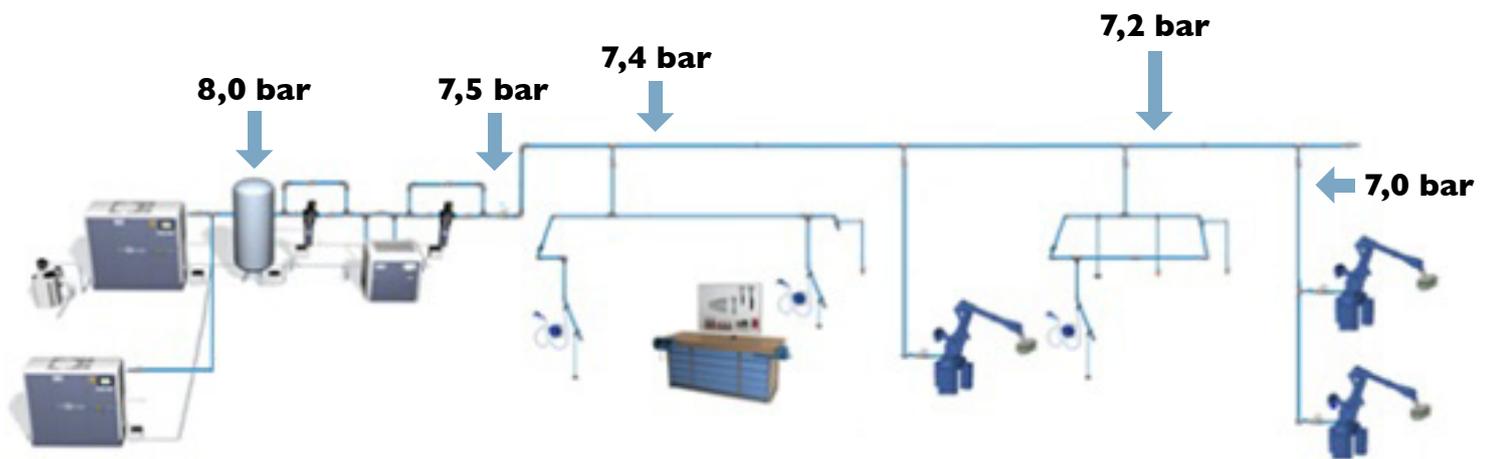
As perdas de carga são consequência direta do aumento de velocidade do fluido no interior da tubagem. Dado que ao longo do tempo os consumos tendem a aumentar para fazer face ao crescimento de

produção, a perda de carga acentua-se ao longo dos anos de operação. Outro fator de grande influência é a geometria da rede de distribuição. Sendo o crescimento de produção normalmente acompanhado com alterações aos *layouts* das instalações e não existindo um projeto inicial que preveja esse crescimento, essa geometria tende a crescer disformemente, causando acentuadas perdas de carga localizadas.

Normalmente o redimensionamento dos coletores principais seria uma solução a aplicar, mas frequentemente fica para segundo plano.

Sempre que seja prevista a instalação de novos equipamentos, deverá ser efetuada uma análise à rede existente e confirmar se esta necessita ou não de alterações.

As perdas de carga ao longo de toda a rede, entre o ponto de produção e os vários consumidores, devem ser quantificadas através de manómetros localizados em diversos pontos da rede, permitindo avaliar a condição dos coletores e dos equipamentos auxiliares.



**Fig.10- Exemplo de uma rede com perdas de carga**

**Por cada bar de acréscimo no valor da pressão do SAC, implica um consumo adicional de 7% de energia nos compressores.**

O investimento inerente ao sobredimensionamento do coletor poderá ser facilmente recuperado na fatia energética, se este representar uma acentuada redução na pressão de serviço dos compressores.

### 3.2.3. Compressor a funcionar quando não há necessidades de ar comprimido a satisfazer

Durante os períodos de paragem de produção, deverá ser sempre acutelada a paragem dos equipamentos de ar comprimido, evitando arranques e consumos

de energia desnecessários, assim como o desgaste dos equipamentos do SAC, que originam custos de manutenção acrescidos.

# 4. Rede de distribuição de ar comprimido

- 4.1. Dimensionamento de tubagens
- 4.2. Configuração (*layout*) da rede
- 4.3. Materiais e especificação de acessórios utilizados na rede do SAC
- 4.4. Redes dedicadas por níveis de pressão de serviço

---

# ção de mido

## 4. Rede de distribuição de ar comprimido

### 4.1. Dimensionamento de tubagens

Para o dimensionamento de uma rede de ar comprimido, deverá ser estimado o consumo dos diversos utilizadores e o possível aumento de consumo num curto, médio e longo prazo.

O traçado deve ser o mais linear possível e em “anel fechado”.

Os materiais a utilizar (tubagens e ligações) devem contemplar as especificações da qualidade do ar requeridas na utilização.

Nas baixadas de alimentação aos vários consumidores, deve ser implementado um seccionamento automático (eletroválvulas) para minimizar as fugas nos períodos de inoperação desses consumidores. O controlo dessas mesmas eletroválvulas não deve estar dependente da ação manual do operador da máquina.

Para o dimensionamento de uma rede de ar comprimido deve ser considerada uma perda de carga máxima admissível ( $\Delta P$ ) de 0,1 bar recorrendo à seguinte fórmula:

$$\Delta P = f \times \frac{Q_v^{1,85} \times L}{d^5 \times P}$$

$\Delta P$	Perda de carga	bar			
f	Factor de fricção	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2">[</td> <td>Alumínio = 280</td> </tr> <tr> <td>Aço galvanizado = 450</td> </tr> </table>	[	Alumínio = 280	Aço galvanizado = 450
[	Alumínio = 280				
	Aço galvanizado = 450				
$Q_v$	Caudal (FAD)	l/s			
d	Diâmetro interno do tubo	mm			
L	Comprimento total tubagem	m			
P	Pressão absoluta	bar(a)			

#### Fórmula 2- Cálculo da perda de carga numa tubagem

É essencial que as tubagens em termos de diâmetro sejam dimensionadas de modo a evitar perdas de carga excessivas. Devem ser evitadas penalizações associadas a desperdícios energéticos, se por exemplo forem utilizados tubos com diâmetros muito pequenos.

## 4.2. Configuração (layout) da rede

Sempre que possível, a rede de distribuição deve ser projetada em “anel fechado” para um maior equilíbrio no fornecimento do caudal, uma menor perda de carga e maior estabilidade de pressão. Com a introdução

de válvulas de seccionamento, garante-se uma maior flexibilidade na utilização e nas ações de manutenção da rede de tubagens.

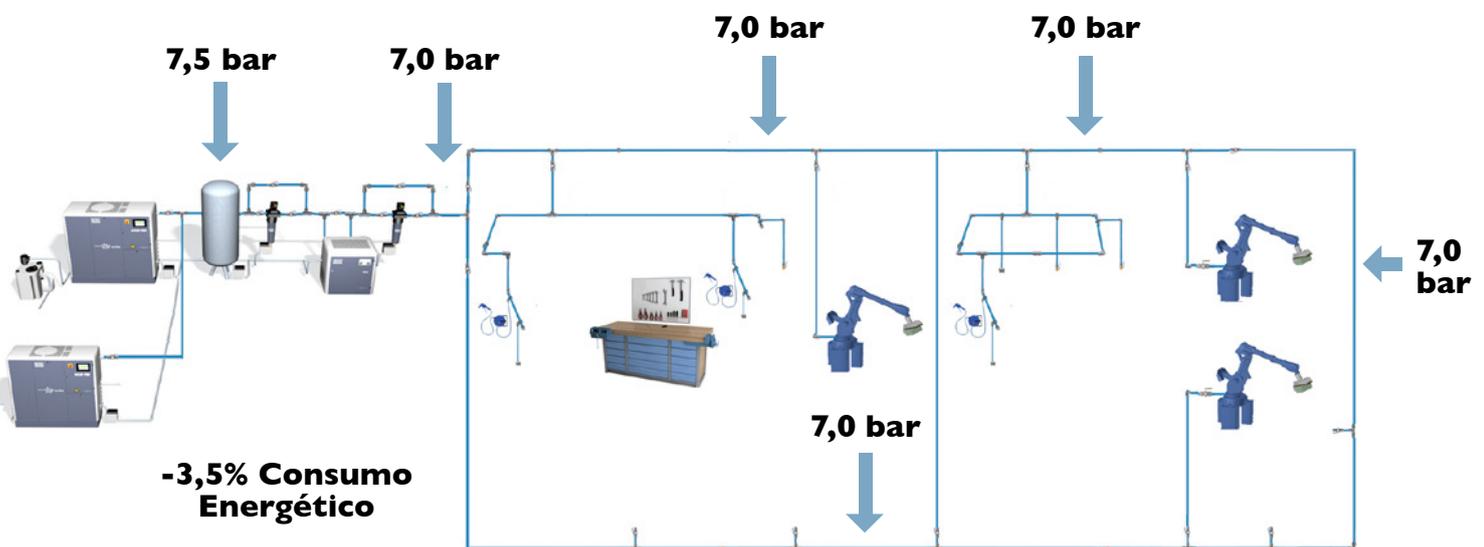


Fig.11- Exemplo de uma rede em “anel fechado” com perdas de carga

## 4.3. Materiais e especificação de acessórios utilizados na rede do SAC

Em projeto, deverá ser considerada a utilização de acessórios cuja geometria não cause turbulência e consequentemente significativas perdas de carga.

Os coletores principais deverão estender-se a toda a área fabril, garantindo que todos os consumidores serão devidamente alimentados.

Mediante a pressão de trabalho, a agressividade do meio ambiente, as temperaturas ambiente, as especificações do processo de fabrico e a qualidade do ar comprimido, deverá ser selecionado o material com as especificações adequadas a cada instalação.

Dos materiais mais comuns, é de se referir o uso de aços carbono em indústrias pesadas onde a qualidade do ar comprimido não é tão exigente, que possa comprometer a qualidade do produto final. Já a utilização de aços inoxidáveis recomenda-se em indústrias tais como farmacêutica, alimentar e eletrônica, onde normalmente as exigências com a qualidade do ar comprimido são fundamentais para a qualidade e segurança do produto final. As tubagens de alumínio com acessórios de cravar devem ser utilizadas quando se pretende uma simplicidade e rapidez na montagem, permitindo de forma simples alterações futuras nos *layouts*.

Devem ser tomadas em conta as seguintes considerações adicionais:

- Evitar traçados sinuosos;
- As curvas a utilizar devem ser de dimensão adequada e de raio longo.
- Os acessórios devem ter o diâmetro nominal adequado sem redução da secção interior.
- Evitar estrangulamentos nas secções dos coletores principais, evitando sempre que possível ligações em “T” e privilegiar as ligações em “Y”.

A instalação de válvulas de seccionamento nas redes permite uma manutenção/utilização adequada, aumentando a sua flexibilidade.

Deve ser privilegiada a utilização de válvulas de macho esférico ou em alternativa as de borboleta em detrimento das válvulas de diafragma, uma vez que estas introduzem perdas de carga mais acentuadas.

**Tabela 3- Alguns acessórios e a sua influência sobre as perdas de carga em tubagem de vários diâmetros. As perdas são calculadas para o comprimento equivalente**

Componente	Comprimento Equivalente (m)										
	Diâmetro Interno da tubagem acessório (mm)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	300	350	400
	0.3	0.5	0.6	1.0	1.3	1.6	1.9	2.6	3.2	3.9	5.2
	5.0	8.0	10.0	16.0	20.0	25.0	30.0	40.0	50.0	60.0	80.0
	1.5	2.5	3.0	4.5	6.0	8.0	10.0				
	4.0	6.0	7.0	12.0	15.0	18.0	22.0	30.0	36.0		
	7.5	12.0	15.0	24.0	30.0	38.0	45.0	60.0			
	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10.0	12.0	16.0	20.0	24.0	32.0
	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12.0	15.0	18.0	24.0
	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0
	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9.0	12.0	15.0	18.0	24.0
	0.5	0.7	1.0	2.0	2.5	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.6

## 4.2. Redes dedicadas por níveis de pressão de serviço

É energeticamente mais eficiente, criar redes distintas (multi-rede) para diferentes pressões de serviço.

Deverá ser evitada a utilização de reguladores de pressão, que em muitos casos, implicam um aumento desnecessário na pressão de serviço e o consequente aumento no consumo energético.

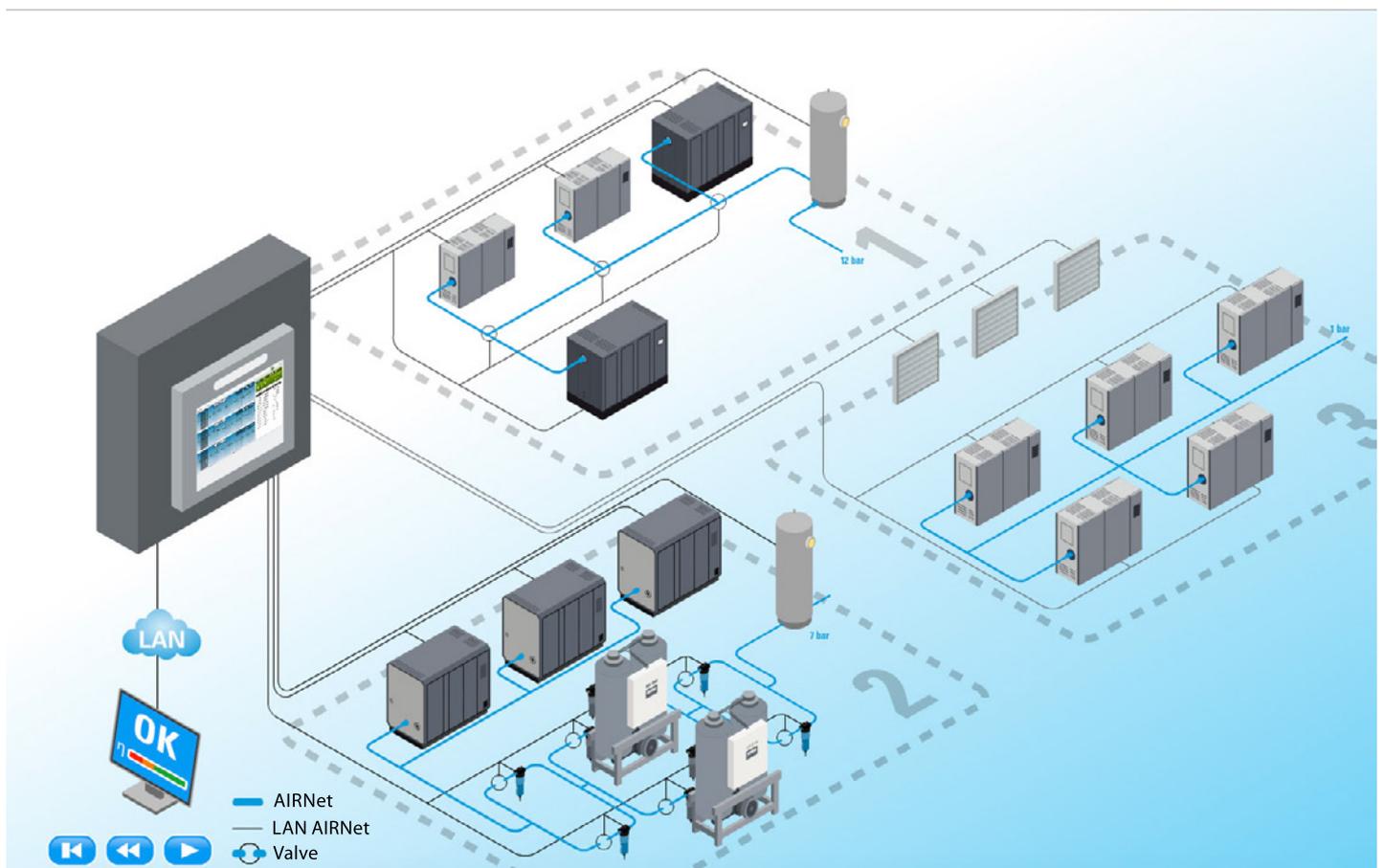


Fig.12- Exemplo típico de um Sistema de Ar Comprimido com redes distintas

# 5. Compre

- 5.1. Tipos de compressores
- 5.2. Seleção do compressor
  - 5.2.1. Definição de capacidade de um compressor
- 5.3. Melhorias na eficiência do compressor existente
  - 5.3.1. Localização e instalação do compressor
  - 5.3.2. Manutenção e *upgrade* do compressor
  - 5.3.3. Recuperação de calor
  - 5.3.4. Lubrificantes
  - 5.3.5. Sistemas de controlo do compressor
- 5.4. Controlo de múltiplos compressores

---

# essores

# 5. Compressores

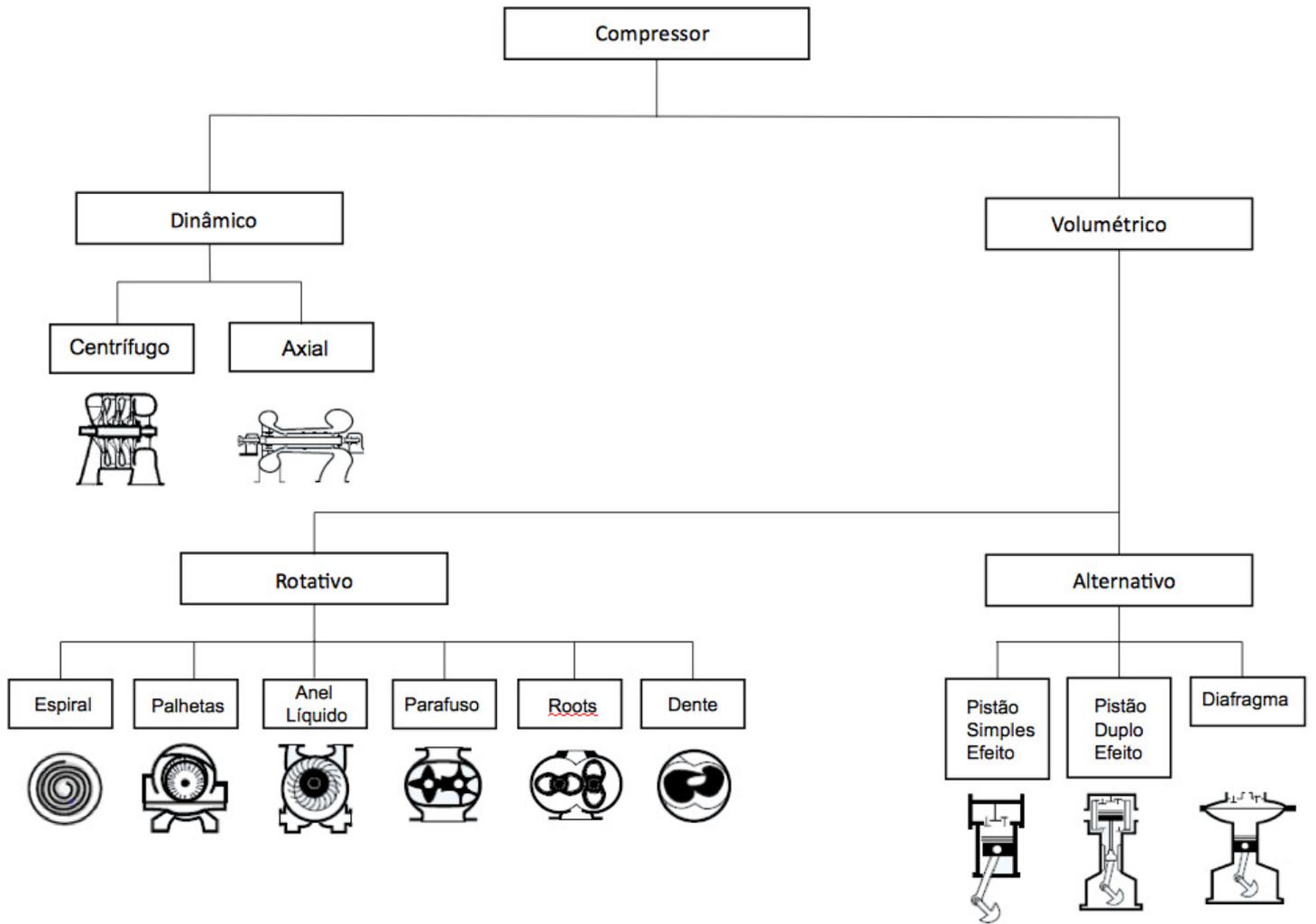
## 5.1. Tipos de compressores

Os principais tipos de compressores dividem-se em dois grandes grupos, os compressores volumétricos e os compressores dinâmicos.

**Compressores volumétricos:** A compressão é obtida através da redução de volume do gás a comprimir. O gás é admitido numa ou mais câmaras de compressão, nas quais será reduzido o seu volume, originando um aumento da pressão desse gás.

**Compressores dinâmicos:** A compressão é obtida através da conversão da energia cinética em pressão. A massa é acelerada a alta velocidade num impulsor, seguidamente é forçada a desacelerar ao ser expandida no difusor. Essa expansão converte a energia cinética em pressão.

A figura seguinte apresenta os tipos de compressores mais comuns:



**Fig.13- Tipos de compressores**

Na generalidade das soluções disponíveis no mercado, a seleção da tecnologia deverá enquadrar-se na sugestão da tabela seguinte:

**Tabela 4- Tecnologia e aplicações**

				
	<b>Centrífugo</b>	<b>Parafuso Lubrificado</b>	<b>Parafuso Isento de Óleo</b>	<b>De</b>
<b>Pressão bar(e)</b>	0,3 a 200	4 a 20	0,3 a 13	4 a
<b>Qualidade de ar</b>	Isento de óleo	Lubrificado	Isento de óleo	Isento
<b>Tipo de controlo</b>	Modelação (IGV)	Variação de velocidade Carga-Vazio	Variação de velocidade Carga-Vazio	Variação de Carga
<b>Gama de potência (kW)</b>	> 400	5 a 500	55 a 900	15 a
<b>Adaptação ao tipo de regime</b>	Contínuo	Variável e contínuo	Variável e contínuo	Variável e
<b>Aplicações industriais</b>	Processo	Gerais	Gerais	Ge
	Separação de gases; Química; Vidreira; Petróleos	Metalomecânica; Mineira; Cimenteira; Produção de Energia; Pneus	Alimentar; ETAR; Eletrónica; Gráficas; Transporte pneumático; Farmacêutica; Pasta e papel; Petróleos; Cimenteira; Produção de energia	Alime Farmac Eletr

				
<b>te</b>	<b>Espiral</b>	<b>Roots</b>	<b>Pistão Isento de Óleo</b>	<b>Pistão Lubrificado</b>
10	4 a 10	0,3 a 1	> 15	4 a 40
de óleo	Isento de óleo	Isento de óleo	Isento de óleo	Lubrificado
e velocidade Carga-Vazio	Arranque-Paragem	Variação de velocidade Carga-Vazio	Variação de velocidade Carga-Vazio	Arranque-Paragem Carga-Vazio
a 55	1 a 20	1 a 400	1,5 a 600	1,5 a 20
contínuo	Intermitente	Variável e contínuo	Variável e contínuo	Intermitente
rais	Gerais	Baixa Pressão	Alta Pressão	Gerais
entar; eûtica; ônica	Alimentar; Clínicas dentárias; Laboratórios; Gráficas	ETAR; Gráficas; Transporte pneumático	PET (garrafas de água); Compressão de Gases; Arranques pneumáticos; Aeronáutica	PET (detergentes); Arranque pneumático

## 5.2. Seleção do compressor

A seleção de um compressor deverá tomar em conta os requisitos do SAC, em que a eficiência energética deverá ser o fator de maior importância. Salienta-se que a eficiência energética do compressor dependerá não apenas da sua concepção, mas também da instalação, utilização e manutenção.

A pressão de projeto do compressor deverá ser a mais aproximada possível da pressão de serviço.

O caudal a disponibilizar deve satisfazer o somatório de todos os consumidores constantes e tomar em consideração as simultaneidades dos consumidores intermitentes.

O tipo de ar (isento de óleo ou lubrificado) será definido pelos requisitos do processo de fabrico e das especificações do produto final.

Na seleção do compressor devem ser comparados os consumos específicos em kWh/m<sup>3</sup> de cada tipo de compressor para diferentes capacidades e funcionamento à mesma pressão.

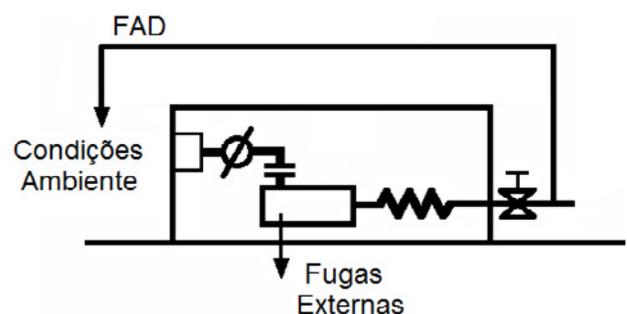
No caso da necessidade de se renovar um compressor existente por uma nova unidade, deve optar-se por uma solução com menor consumo específico de energia e adaptada às necessidades do sistema. A seleção do compressor mais apropriado para uma determinada finalidade deve sempre basear-se numa análise económica, atendendo aos custos fixos com a instalação e aos custos variáveis de operação (energia, segurança, manutenção, água de arrefecimento, etc.).

### 5.2.1. Definição de capacidade de um compressor

Na seleção de um compressor a unidade de medida de capacidade (ou caudal, fluxo, débito, etc.) foi sempre o fator mais complexo de se definir de forma clara, tornando-se ainda mais complexo quando as condições de referência são distintas (Free Air Delivery (FAD), Normais (N), Atual (A), Standard (S) ou admitido (I)).

Existem normas que especificam claramente os pressupostos tidos nessas definições. Na Europa, a unidade mais utilizada é o FAD, especificado pela norma ISO 1217 Ed. 3 anexo C, que toma por referências a medição à saída do compressor, após arrefecedor final e referida para as condições de

admissão (Temperatura de 20°C, Pressão de 1 bar(a) e Humidade Relativa de 0 %) e que corresponde efetivamente ao ar comprimido disponível ao utilizador.



No entanto, para podermos comparar coisas comparáveis, é necessário procedermos de forma correta à conversão das unidades de caudal. Para tal teremos de recorrer à equação universal dos gases ( $P \times V = m \times R \times T$ ) e ter em consideração as condições em que são tidas as referências para as outras unidades:

**Caudal Normal (N):**

Temperatura de admissão = 0°C  
 Pressão de admissão = 1,013 bar(a)  
 Humidade Relativa = 0 %

**Caudal Atual (A):**

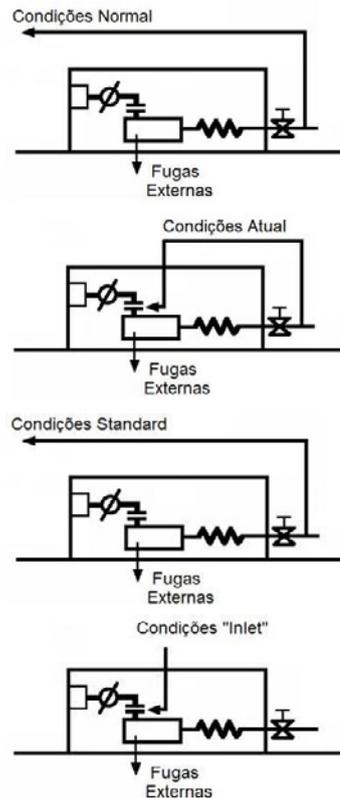
Temperatura de admissão = 35°C  
 Pressão de admissão = 0,98 bar(a)  
 Humidade Relativa = 60 %

**Caudal Standard (S):**

Temperatura de admissão = 15,56°C  
 Pressão de admissão = 1,0132 bar(a)  
 Humidade Relativa = 0 %

**Caudal admitido “Inlet” (I):**

Temperatura de admissão = 35°C  
 Pressão de admissão = 0,98 bar(a)  
 Humidade Relativa = 60 %



**Exemplo de cálculo:**

Pretende-se converter o caudal de 100 m³/h nas condições FAD para condições Normais.

Para diferentes condições de admissão, sabemos que:

$$m \times R = P_{FAD} \times V_{FAD} / T_{FAD} = P_N \times V_N / T_N$$

	Condições FAD	Condições N
<b>P</b>	1 bar	1,013 bar
<b>T</b>	20 + 273 K	0 + 273 K
<b>V</b>	100 m³/h	? Nm³/h

$$1 \times 100 / 293 = 1,013 \times V_N / 273$$

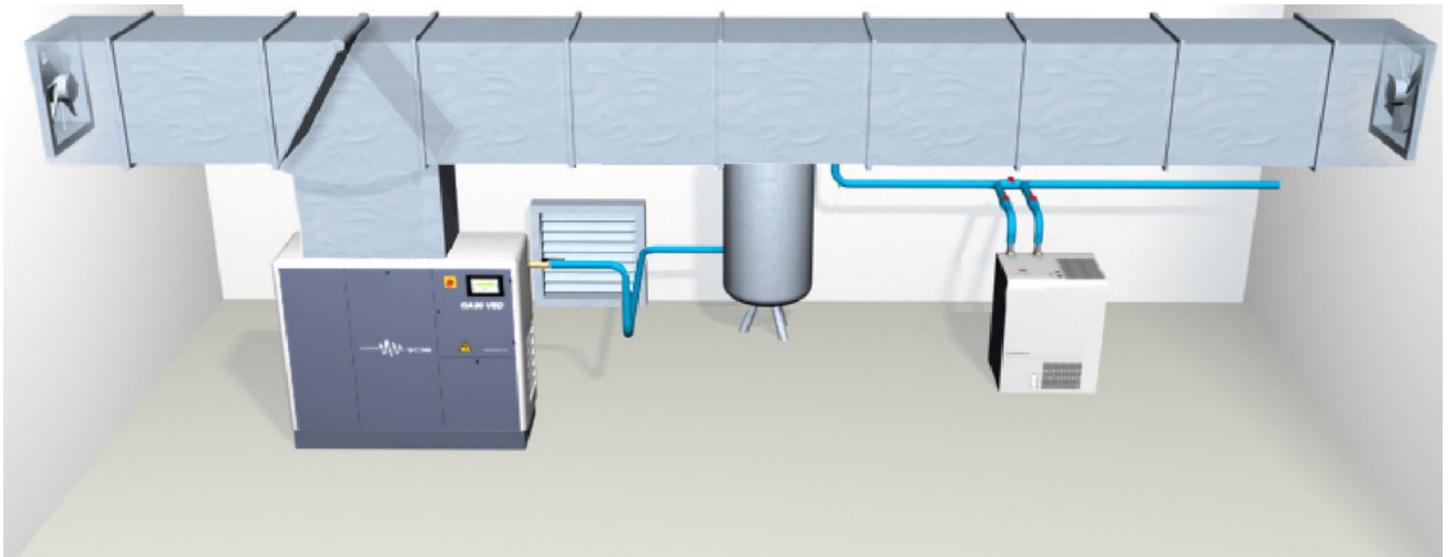
$$V_N = (1 \times 100 \times 273) / (293 \times 1,013) = 91,97 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

## 5.3. Melhorias na eficiência do compressor existente

### 5.3.1. Localização e instalação do compressor

A localização de uma central de ar comprimido deve garantir as condições ambientais favoráveis,

nomeadamente em questões de temperatura ambiente, humidade, ventilação e contaminação do ar de admissão.



**Fig.14- Exemplo típico de uma central de ar comprimido**

O aumento de 3 °C na temperatura do ar de admissão aumenta a potência consumida em cerca de 1% e ar húmido provoca corrosões e mau funcionamento dos equipamentos. E um aumento das perdas de carga na admissão do ar, por exemplo de 10 mbar, aumenta o consumo de ar dos aparelhos pneumáticos em 1%. Logo, há todo o interesse em aspirar ar frio e limpo, pelo que se deve evitar locais soalheiros, húmidos ou poeirentos.

Devem ser consideradas grelhas de admissão de ar (do exterior) para uma boa ventilação da sala de compressores. Estas grelhas devem ser constituídas por aberturas bem dimensionadas e estarem livres de eventuais obstruções causadas por objetos armazenados. Devem estar localizadas em fachadas viradas a Norte, sempre que possível, e em áreas não expostas ao Sol.

Em compressores arrefecidos a ar, para obviar riscos de mistura do ar quente de arrefecimento com o ar de admissão e de modo a que este tenha a temperatura mais baixa possível, deverão existir condutas próprias para exaustão desse ar quente do compressor para o exterior, como ilustrado na Figura anterior.

A distância da central de compressores até aos pontos de maior consumo deve também ser tomada em consideração. Os coletores principais devem ser dimensionados de forma a minimizar as perdas de carga para os caudais e pressões atuais, considerando um fator de crescimento para ampliações futuras.

Poderá ser opção, descentralizar ou dedicar uma máquina em determinadas aplicações específicas. Para um pequeno consumidor que necessita de valores de pressão superiores, será vantajoso dedicar um pequeno compressor a essa utilização específica e não elevar a pressão em toda a rede (1 bar = 7% energia). O mesmo critério se aplica a consumidores onde a qualidade do ar requerida é superior à da rede de ar geral.

No entanto, a centralização de compressores numa central tira maior partido da eficiência do SAC, permitindo uma gestão mais eficiente do grupo de

máquinas, não só ao nível energético, mas também ao nível da redundância e disponibilidade dos equipamentos.

A área a disponibilizar para a central de compressores, deve contemplar espaço suficiente para movimentação dos equipamentos ou dos seus componentes, nas respetivas ações de manutenção. Deverão ser considerados espaços adicionais, para um futuro crescimento do SAC.

Para facilitar ações de manutenção, deverão ser considerados meios de elevação com capacidade de movimentar o componente mais pesado dos equipamentos instalados. Esses meios vão permitir minimizar tempos de imobilização e reduzir custos das ações a executar.

Para o encaminhamento das purgas provenientes dos equipamentos, deverão ser previstos pontos de recolha de condensados, os quais deverão ser diferenciados caso sejam provenientes de compressores lubrificados, de forma a cumprir a legislação em vigor e preservar o meio ambiente.

## 5.3.2. Manutenção e *upgrade* do compressor

A manutenção procura assegurar a máxima disponibilidade dos equipamentos. As máquinas durante o seu regime de trabalho estão sujeitas ao desgaste e degradação de alguns componentes. Os fabricantes estimam uma vida útil para esses componentes e aconselham ações de manutenção planeadas e em intervalos regulares (manutenção preventiva).

Uma manutenção cuidada e efetuada de acordo com as indicações do fabricante, minimiza o risco de avarias imprevistas e as consequentes indisponibilidades do compressor.

Com a manutenção realizada dentro dos intervalos adequados e indicados pelos fabricantes, também se evitam desperdícios energéticos, provocados por

ineficiências internas das próprias máquinas (filtro de admissão e/ou separador colmatado = consumos energéticos acrescidos).

Em compressores mais antigos pode justificar-se a substituição dos respetivos motores elétricos por outros de rendimento superior, ditos de “alto

rendimento” (com a classificação IE2 ou IE3 ou IE4), conduzindo a economias de energia normalmente não inferiores a 2-3%. Em motores com um período de funcionamento superior a 3000 horas/ano, tal substituição é normalmente viável sob o ponto de vista económico.

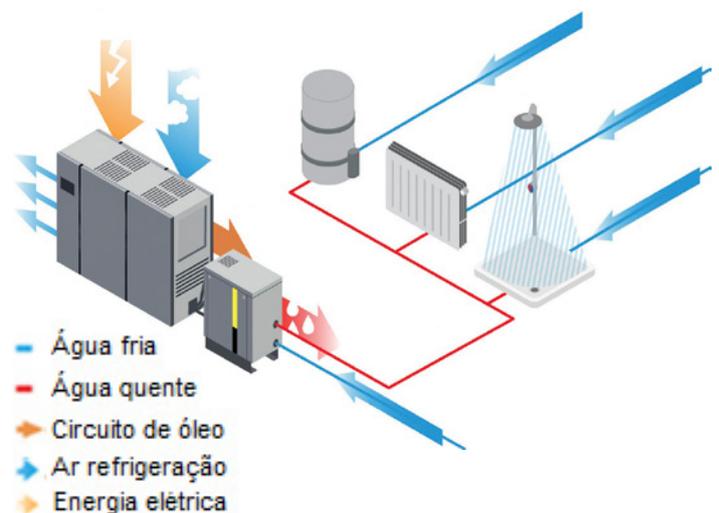
### 5.3.3. Recuperação de calor

Até 90% da potência aplicada ao veio de um compressor, pode ser recuperada sob a forma de calor (energia térmica). Dessa energia térmica, apenas 4% permanece no ar comprimido, podendo a restante ser reutilizada para o aquecimento de águas industriais, com a introdução de um sistema de recuperação de calor. A água quente resultante dessa permuta, tipicamente a uma temperatura entre 80 e 90 °C, pode ser utilizada como água do processo, em aquecimento de ar ambiente, em AQS para balneários, no pré-aquecimento de água de alimentação ou de ar de combustão em caldeiras, entre outras aplicações.

Ao definir a localização de uma central de compressores, deve ser considerada a possível recuperação de energia como um ponto fundamental. Esta recuperação maximiza o potencial de eficiência energética de um SAC, ao não ser necessário consumir outras fontes de energia (combustíveis fósseis) e portanto minimizando o impacto ambiental provocado pela produção de ar comprimido.

As oportunidades de recuperação são determinadas por fatores como:

- O tempo de funcionamento do compressor e o seu fator de carga;
- O grau de simultaneidade da operação do compressor com o funcionamento dos potenciais utilizadores da energia recuperada;
- A disponibilidade a curta distância de áreas a aquecer, caldeiras ou outros consumidores de ar quente, instalações sanitárias ou outras consumidoras de água quente.



**Fig.15- Instalação típica com recuperador de calor**

## 5.3.4. Lubrificantes

Os lubrificantes utilizados nos equipamentos, devem respeitar as indicações dos fabricantes, de forma a garantir um desempenho adequado dentro dos parâmetros de funcionamento.

Nos compressores lubrificados, o óleo tem a função de lubrificação, arrefecimento e selagem nos rotores do elemento. Neste caso, é comprimido juntamente com o ar e posteriormente será separado.

O tipo de óleo utilizado deve tomar em consideração as temperaturas de funcionamento e o ambiente de trabalho do compressor. A degradação do óleo leva à redução da vida útil de determinados componentes (ex. filtro separador), originando consumos energéticos acrescidos.

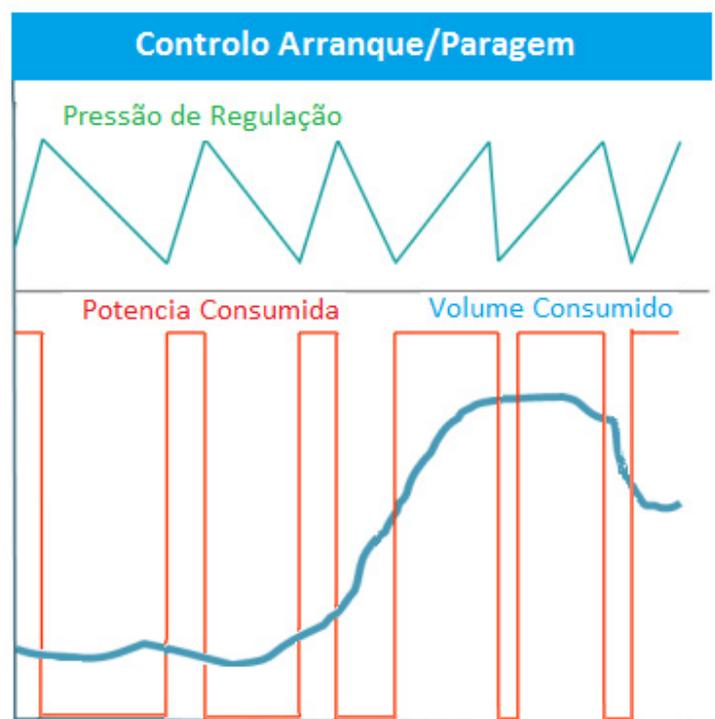
## 5.3.5. Sistemas de controlo do compressor

O controlador do compressor (PLC) tem como principais funções, proteger o equipamento com base em avançados algoritmos, garantir a segurança das pessoas e regular a operação do equipamento dentro dos parâmetros definidos.

O sistema de controlo de um compressor permite aumentar a sua eficiência e fiabilidade. Como o perfil de consumo não é constante na generalidade das indústrias, há a necessidade de adaptar a regulação do compressor ao perfil de consumo.

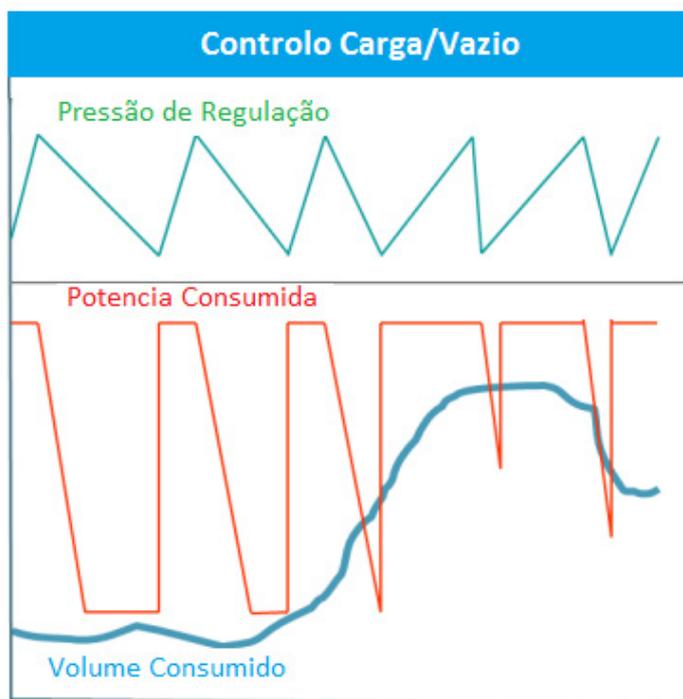
### Tipos de controlo:

- **Arranque-Paragem:** A forma mais simples de controlar um compressor é atuando diretamente no acionamento deste. Com o arranque do motor, inicia-se a produção de ar comprimido, elevando a pressão. Quando esta atinge o valor máximo estabelecido, o controlador dá ordem de paragem ao motor. É um tipo de controlo pouco eficiente, utilizado em compressores de baixa potência instalada, com regime de trabalho reduzido.



**Fig.16- Controlo tipo arranque/paragem**

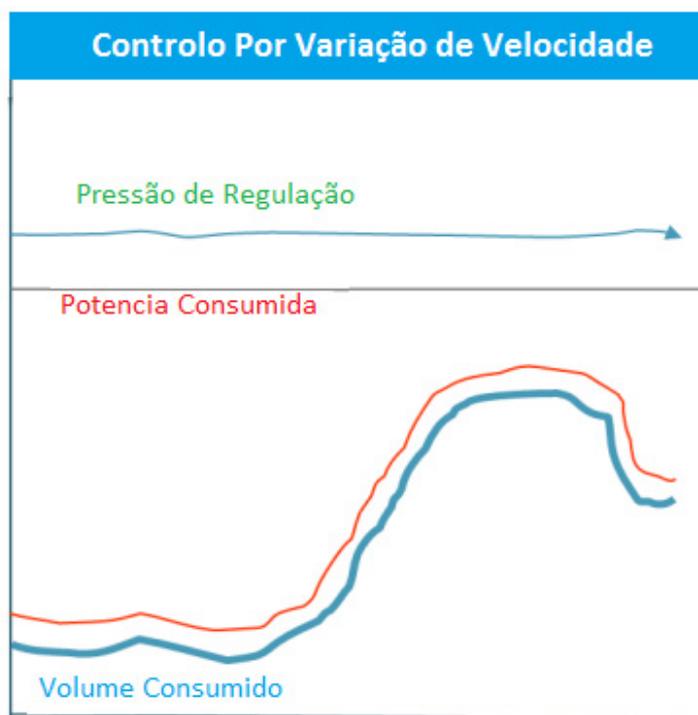
- **Carga-vazio:** Os equipamentos que operam continuamente, com uma solicitação de produção de ar comprimido constante, estão normalmente equipados com sistemas de controlo do tipo carga-vazio. Com a abertura da válvula instalada na admissão de ar do compressor, inicia-se a produção de ar comprimido, elevando a pressão (compressor em carga). Quando esta atinge o valor máximo estabelecido, o controlador dá ordem de fecho à válvula de admissão (compressor em vazio). O motor de acionamento está em contínuo funcionamento, parando apenas quando não existe consumo de ar comprimido. Os tempos em vazio, quando prolongados, penalizam a eficiência da operação deste tipo de controlo.



**Fig.17- Controlo tipo carga/vazio**

- **Varição de Velocidade:** Num SAC onde se impõe uma estabilidade na pressão ou com um perfil de consumo variável, a utilização de compressores de velocidade variável é a solução energeticamente mais eficiente. A variação da rotação do motor de acionamento ao elemento compressor adapta o caudal produzido às variações instantâneas do perfil

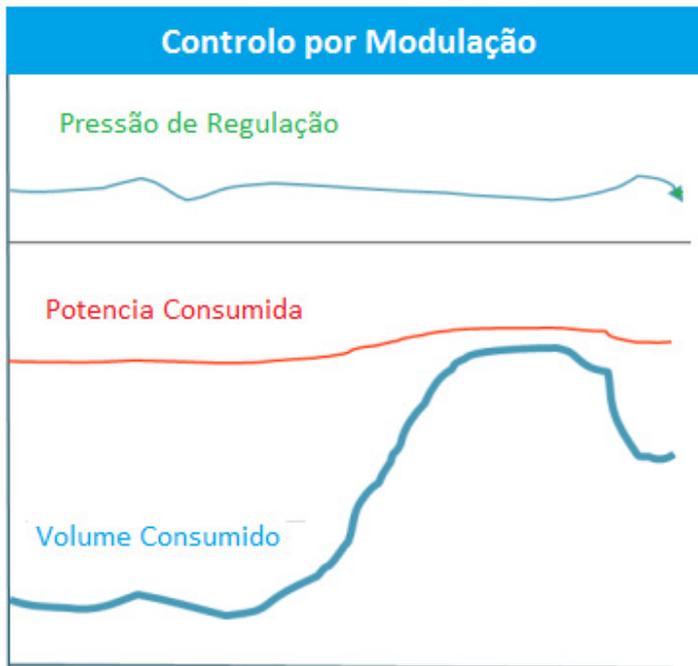
de consumo. A eficiência energética será tanto maior, quanto maior for o tempo de operação deste compressor na sua zona ótima de funcionamento. A utilização de compressores de variação de velocidade poderá conduzir a poupanças de energia, até 35%.



**Fig.18- Controlo tipo por variação de velocidade**

- **Modelação:** Variando a área de admissão do compressor, controla-se o caudal produzido, mantendo a pressão de trabalho constante. Embora a sua aplicação apresente vantagens no controlo de compressores dinâmicos, a sua utilização não é energeticamente eficiente em compressores volumétricos, porque o seu princípio de funcionamento baseia-se no incremento da taxa de compressão do elemento, ao criar uma queda de pressão na sua admissão.

Por vezes, a melhor solução no controlo de um SAC, está na seleção e conjugação dos vários tipos de controlo disponíveis, que devidamente geridos garantem a maior eficiência no consumo de energia.



**Fig.19- Controlo tipo por modulação**

## 5.4. Controlo de múltiplos compressores

Em centrais de ar comprimido, com mais de um compressor em funcionamento, torna-se importante a utilização de sistemas de gestão e otimização. Tais sistemas de controlo conduzem normalmente a economias de energia entre 5 e 35% (Fonte: Programa *Motor Challenge*).

Com base no perfil de consumos da unidade fabril, é possível otimizar o funcionamento da central de compressores, com a instalação de um gestor. Este irá selecionar entre os equipamentos disponíveis o grupo de compressores energeticamente mais eficientes para satisfazer os consumos.

Com a implementação de um sistema de gestão, em alternativa a uma regulação sequencial, será criada uma única referência de leitura de pressão, facto esse que permite obter poupanças diretas, na ordem de 7% por cada bar reduzido na pressão máxima de serviço da rede. Os arranques intempestivos serão minimizados através de um algoritmo avançado de controlo. Com a instalação de equipamentos de velocidade variável, o sistema de gestão tenderá a operar com eles na zona ótima de funcionamento, garantindo desta forma a eficiência máxima do SAC.

# 6. Armazene de ar

- 6.1. Dimensionamento do reservatório de ar comprimido.
- 6.2. Reservatórios de ar adicionais localizados.

---

# enamento

## 6. Armazenamento de ar

### 6.1. Dimensionamento do reservatório de ar comprimido

Os reservatórios de ar comprimido são elementos essenciais num SAC, tendo como principal função o armazenamento de ar comprimido e compensar as 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 sua 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).

Para o dimensionamento de um reservatório adequado ao SAC, poderemos seguir a seguinte fórmula:

$$V = \frac{0,25 \times Q_c \times p_1 \times T_0}{f_{\max} \times (p_u - p_L) \times T_1}$$

V = Volume do reservatório

$Q_c$  = Capacidade do compressor  
(1/s) FAD

$p_1$  = Pressão de entrada do compressor  
(bar(a))

$T_1$  = Temperatura máxima de entrada  
no compressor (K)

$T_0$  = Temperatura do ar comprimido  
no reservatório (K)

$(p_u - p_L)$  = Diferencial de pressão  
entre carga/vazio

$f_{\max}$  = Frequência máxima  
= 1 ciclo/30 segundos  
(aplicável a compressores  
Atlas Copco)

**Fórmula 3- Cálculo do volume de um reservatório**

## 6.2. Reservatórios de ar adicionais localizados

Em picos de consumo, para manter a estabilidade na pressão da rede, a forma adequada de atuar será instalar reservatório(s) perfeitamente dimensionado(s) junto ao consumidor que provoca esses picos de consumo. Desta forma, fica salvaguardado o armazenamento de ar comprimido suficiente, para evitar instabilidades de pressão ao longo da rede e garantir a operacionalidade de todos os consumidores.

Para o dimensionamento de um reservatório que garanta a disponibilidade de ar comprimido num pico de consumo elevado e esporádico poderemos seguir a seguinte fórmula:

$$V = \frac{q \times t}{P_1 - P_2} = \frac{L}{P_1 - P_2}$$

V = Volume do reservatório (l)

q = Caudal durante a fase de esvaziamento (l/s)

t = Tempo da fase de esvaziamento (s)

P<sub>1</sub> = Pressão de serviço normal da rede (bar)

P<sub>2</sub> = Pressão mínima admissível na rede (bar)

L = Caudal requerido na fase de enchimento (1/ciclo de trabalho)

**Fórmula 4- Cálculo do volume de um reservatório para atenuar o efeito dos picos de consumo**

# 7. Tratame de ar

7.1. Qualidade do ar

7.2. Secagem

7.3. Filtragem

---

# ento

## 7. Tratamento de ar

A finalidade do tratamento de ar comprimido é garantir que a qualidade deste está em conformidade com o especificado pelo consumidor e evitar a deterioração prematura de todos os componentes da rede de ar comprimido.

O ar comprimido contém impurezas e humidade. Dependendo da sua aplicação, pode alterar a qualidade

do produto final, resultando em custos elevados de perdas de produção. Nestes casos torna-se importante o seu tratamento para que o ar comprimido tenha a qualidade adequada ao processo de fabrico.

Contaminantes comuns encontrados no ar comprimido:



**Fig.20- Tipos de contaminantes**

Deve ter-se presente que o equipamento auxiliar para tratamento de ar (filtros, secadores, etc.) também

consome energia, pelo que igualmente nesta área se deve procurar oportunidades de poupança de energia.

## 7.1. Qualidade do ar

De acordo com a norma ISO 8573-1:2010 são definidas 7 classes de pureza (entre 0 e 6). Quanto menor a classe de pureza, melhor será a qualidade do ar. As classes traduzem o nível máximo de contaminação

de partículas sólidas e óleo por metro cúbico de ar e o máximo conteúdo admissível de água no ar comprimido sob pressão (PDP).

**Tabela 5- Classes de pureza ISO 8573-1:2010**

Classe de Pureza	Partículas Sólidas			Água		Óleo Total
	Número máximo de partículas por m <sup>3</sup>			Ponto máximo de orvalho sob pressão		Concentração máxima
	0,1-0,5 micron	0,5-1 micron	1,0-1,5 micron	°C	°F	mg/m <sup>3</sup>
0	Conforme especificado pelo utilizador ou fornecedor do equipamento e mais rigorosa do que a classe 1.					
1	≤ 20000	≤ 400	≤ 10	≤ -70	≤ -94	≤ 0,01
2	≤ 40000	≤ 6000	≤ 100	≤ -40	≤ -40	≤ 0,1
3	-	≤ 90000	≤ 1000	≤ -20	≤ -4	≤ 1
4	-	-	≤ 10000	≤ 3	≤ 37,4	≤ 5
5	-	-	≤ 100000	≤ 7	≤ 44,6	-
6	≤ 5 mg/m <sup>3</sup>			≤ 10	≤ 50	-

Quanto maior o grau de qualidade do ar necessário/pretido, maior será o custo energético nesta vertente. Estes custos resultam essencialmente de perdas de carga introduzidas por filtros e secadores, de consumos elétricos associados a secadores de refrigeração, de consumos de ar comprimido ou de outra fonte energética na regeneração de secadores dessecantes, etc.

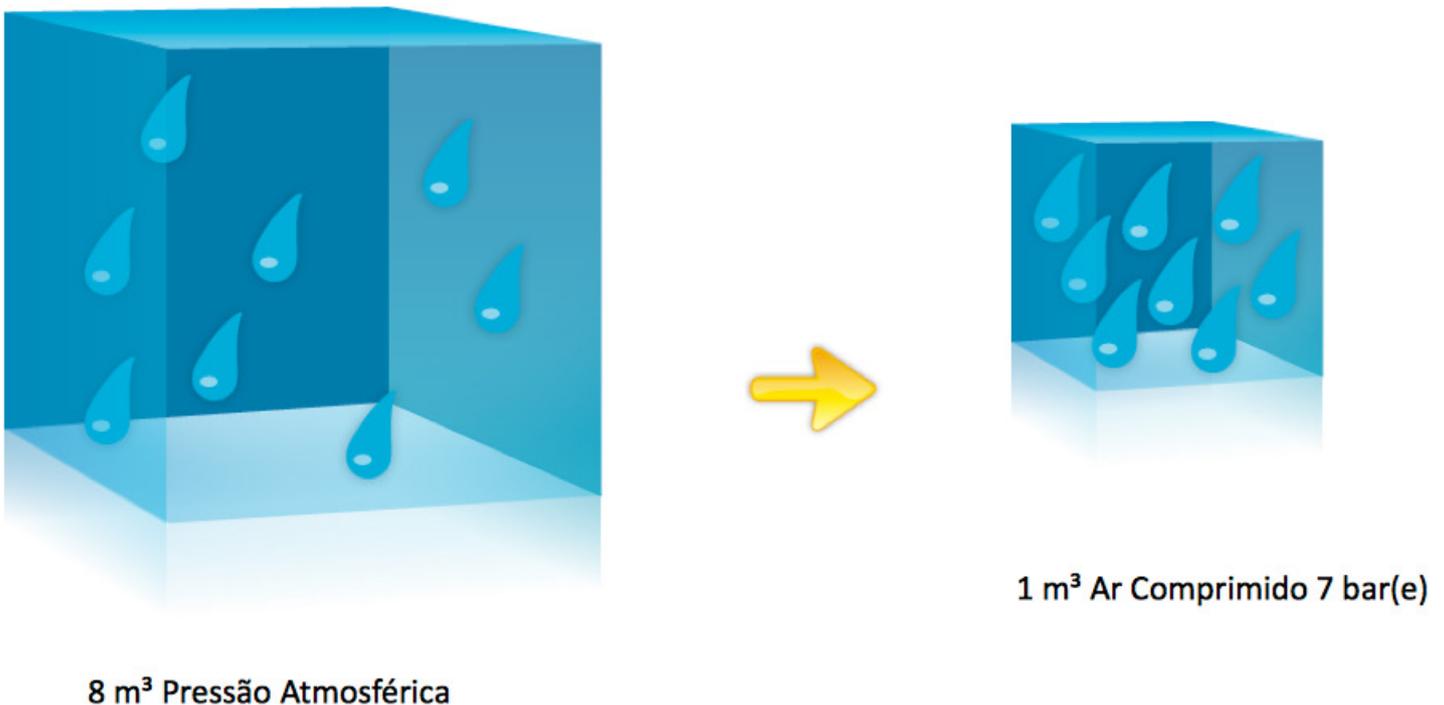
Contudo, a eventual procura de economias de energia nesta área não poderá nunca comprometer a qualidade do produto e a fiabilidade do processo, pelo que qualquer tentativa de obter somente o nível mínimo aceitável de qualidade do ar (e com o melhor tratamento possível nos pontos onde realmente se justifica) deve atender a estas condicionantes.

## 7.2. Secagem

O ar que é aspirado num compressor contém vapor de água. À medida que é comprimido e arrefecido, esse vapor de água condensa. Com a compressão, a concentração de vapor de água por  $\text{m}^3$  de ar aumenta (ver Figuras 21 e 22).

Um compressor com uma pressão de trabalho de 7 bar e uma capacidade de 200 l/s, que aspira ar a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e com 80% de humidade relativa (HR), introduz cerca de 80 litros de água na rede de ar comprimido, em regime de carga durante 24 horas/dia.

A temperatura de Ponto de Orvalho sob Pressão (PDP), é o parâmetro utilizado para quantificar o teor de vapor de água contido no ar comprimido, ou seja a temperatura à qual o ar atinge a saturação (HR = 100%) à pressão de operação e abaixo da qual ocorre a condensação desse vapor de água.



**Fig.21- Volume de ar reduzido de 8 m<sup>3</sup> para 1 m<sup>3</sup> com a compressão**

A água resultante da condensação do vapor de água tem que ser removida, para evitar danos nos componentes do SAC e no produto.

A remoção dessa água apenas se consegue recorrendo a unidades de secagem instaladas à saída dos compressores.

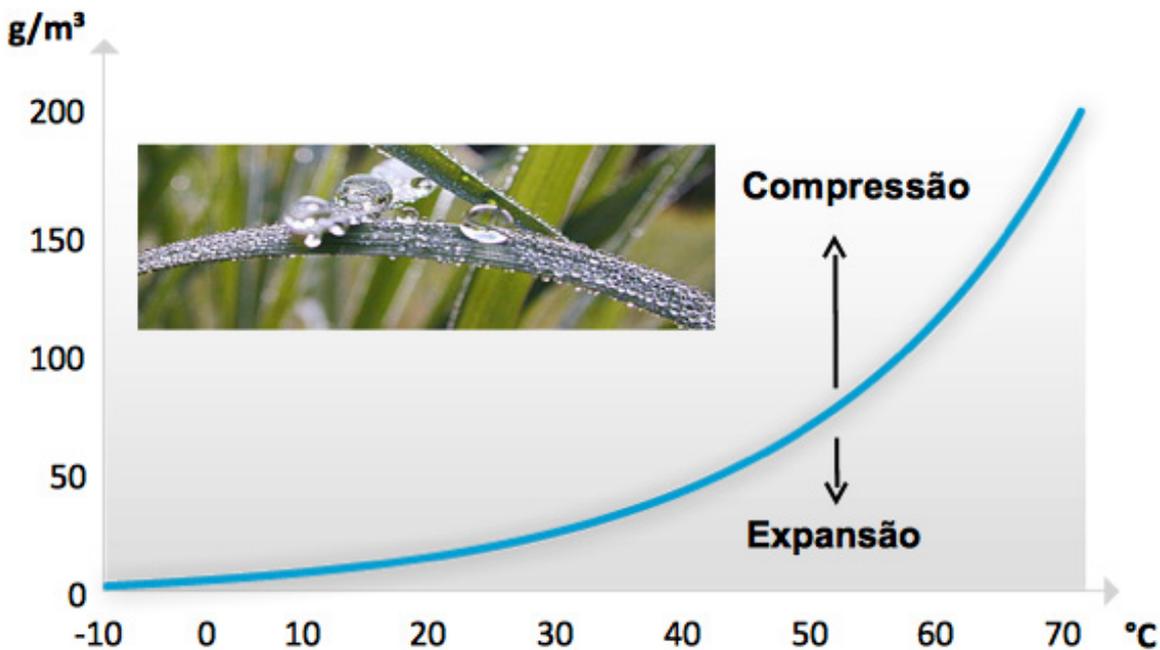


Fig.22- Linha de saturação à temperatura (HR=100%)

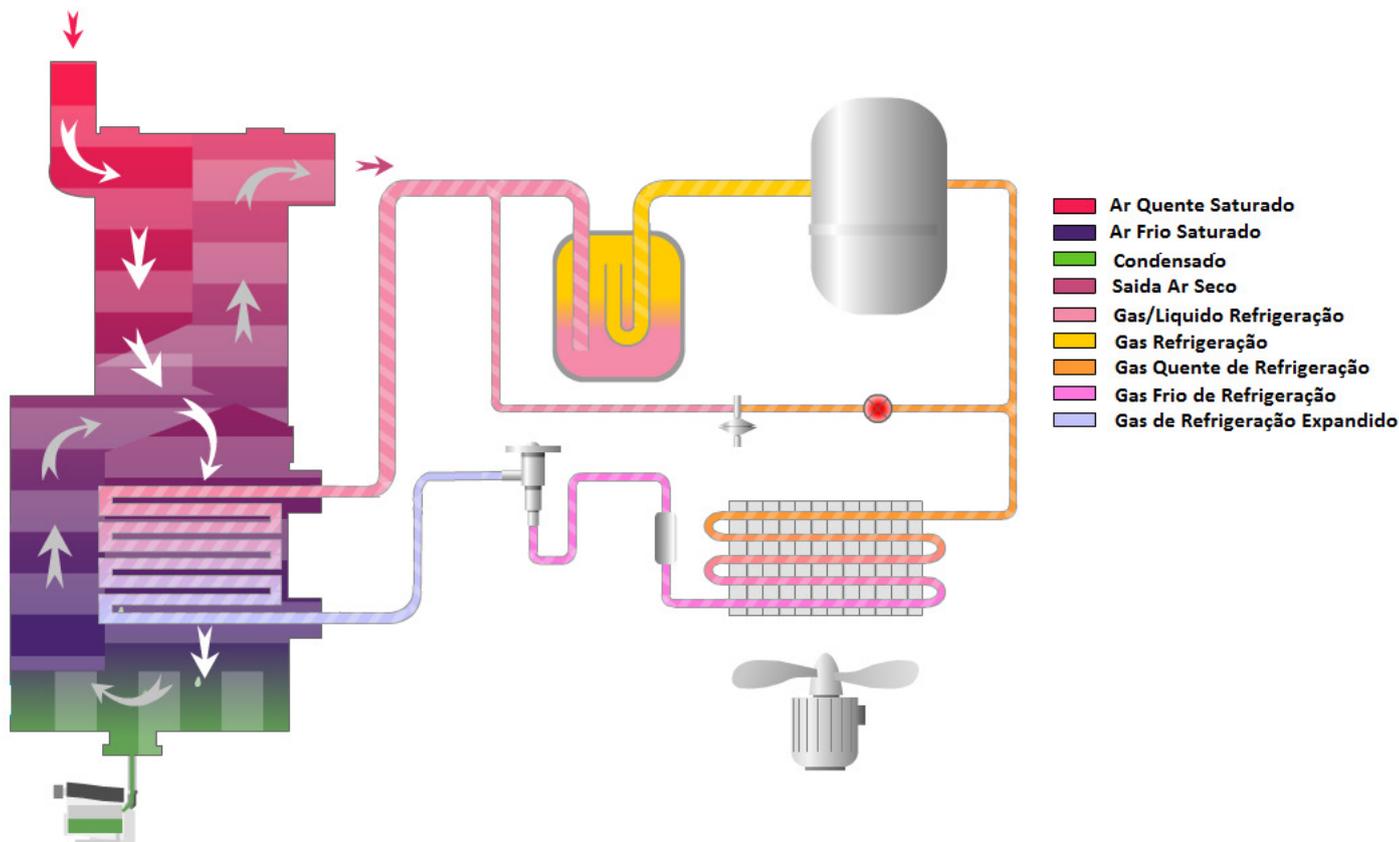
## Secadores de refrigeração

O princípio de secagem por refrigeração é baseado num ciclo frigorífico, onde o arrefecimento do ar comprimido causa a condensação do vapor de água nele contido. Este método de secagem é limitado a valores de PDP superiores a 0 °C, dado que abaixo deste valor a água irá congelar no condensador, bloqueando a passagem do ar.

No sentido de otimizar o processo de secagem e maximizar a eficiência energética, o ar comprimido de saída do secador é aquecido, em contraciclo com o ar de entrada, evitando que a condensação ocorra na tubagem de saída. Por outro lado essa permuta permite pré-arrefecer o ar de entrada, minimizando a energia calorífica a retirar no evaporador.

Os secadores de refrigeração podem tratar um caudal constante ou variável, desde que trabalhem dentro dos limites de operação do mesmo. Os fatores que influenciam a sua operação são o caudal, a temperatura e pressão do ar comprimido e a temperatura ambiente (se arrefecido por ar).

Para regimes de carga com grandes variações, esta tecnologia está disponível com acionamento por velocidade variável, permitindo maior estabilidade no valor de PDP e uma redução nos custos energéticos.



**Fig.23- Diagrama de fluxo de um secador de refrigeração**

## Secadores de adsorção

Neste tipo de secadores, o processo de secagem é obtido pela passagem do ar comprimido através de um material dessecante (sílica-gel, seiva molecular e alumina ativada). Estes materiais apresentam um elevado poder de atração das moléculas de água,

permitindo adsorvê-las em grande quantidade e garantindo pontos de orvalho extremamente baixos, conseguindo-se assim obter valores de PDP entre -20 e -70 °C.



**Fig.24- Tipos de dessecantes dos secadores de adsorção**

Após o preenchimento das superfícies irregulares do material dessecante com água (saturação), será necessário regenerá-lo, reativando a sua capacidade de adsorção. Este processo de regeneração poderá ser realizado de diversas formas.

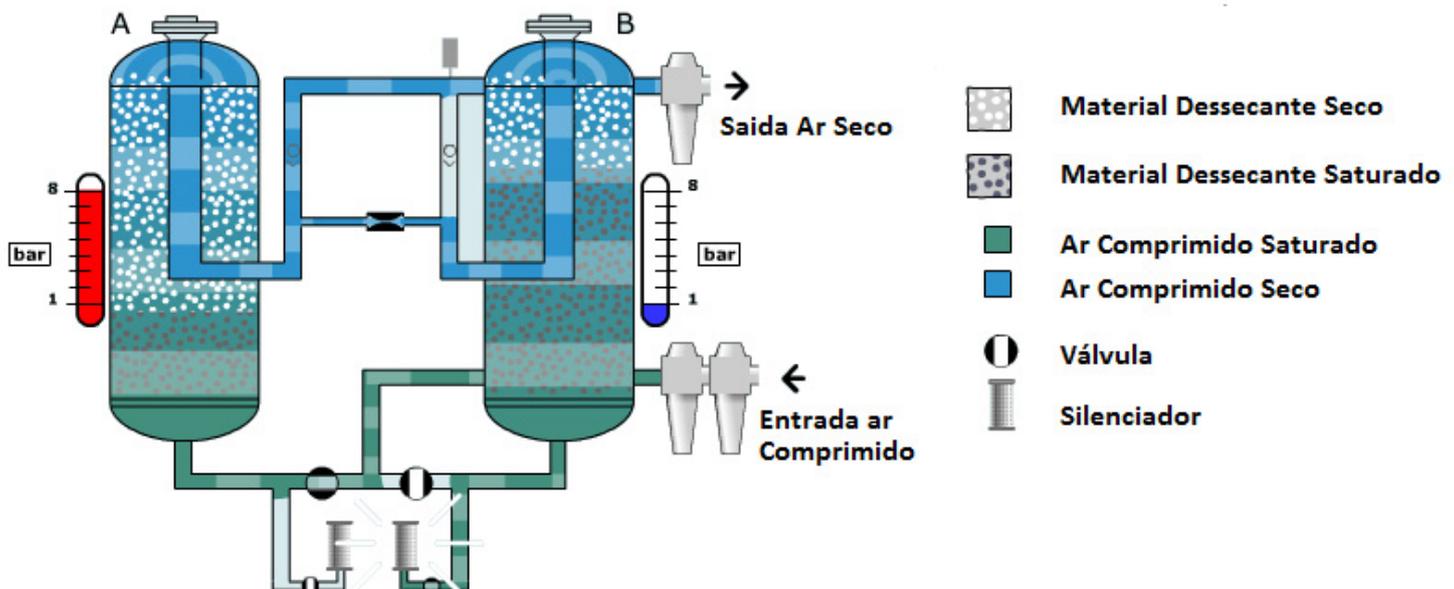
Destacam-se as seguintes tecnologias:

**Secadores de adsorção com regeneração por ar de purga:** Os secadores de adsorção com regeneração por ar de purga são compostos por duas torres preenchidas com material dessecante. Para garantir o fornecimento contínuo de ar comprimido seco, enquanto uma torre se encontra no processo de secagem do ar comprimido (em operação), a outra torre encontra-se no processo de regeneração do

dessecante (em regeneração). Quando saturada a torre em operação (temporizada ou por condição), invertem-se as suas funções.

No processo de regeneração do material dessecante, este tipo de secador, utiliza parte do ar seco, expandindo-o na torre em processo de regeneração, libertando-o em seguida para a atmosfera. Desta forma a humidade retida no dessecante é arrastada para o exterior.

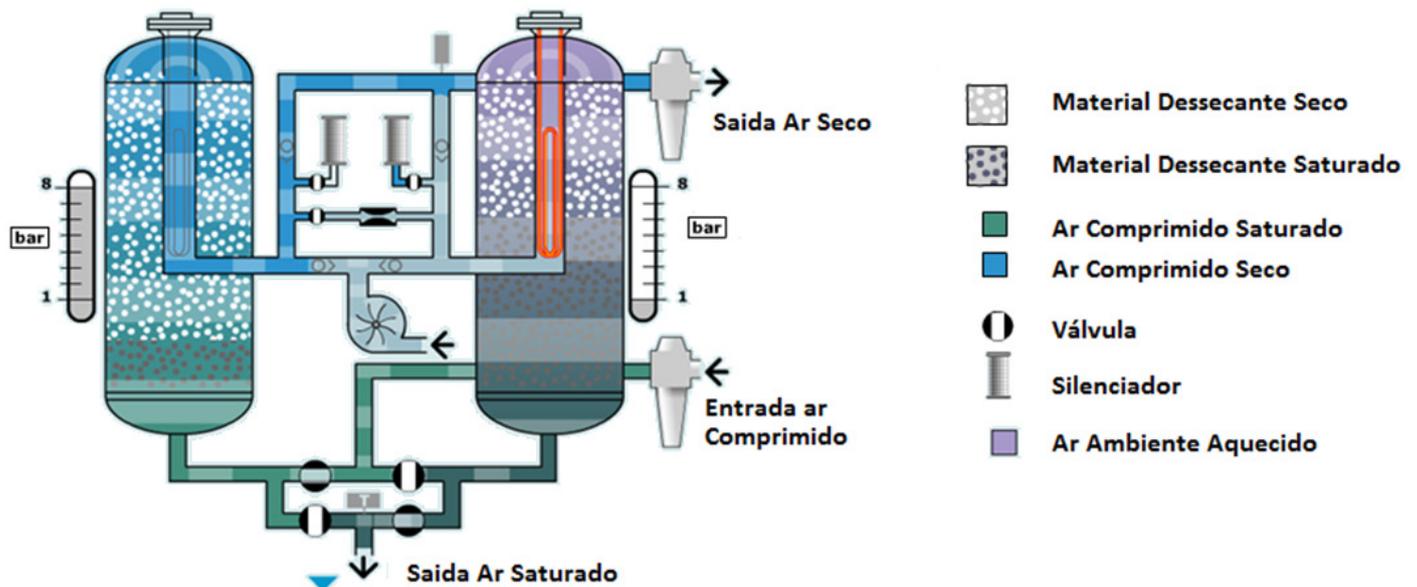
Como é utilizada uma percentagem de ar comprimido tratado (entre 15 a 20 %), no ciclo regenerativo, a opção por este tipo de tecnologia, obriga ao sobredimensionamento dos compressores.



**Fig.25- Diagrama de fluxo de um secador de adsorção com regeneração por ar de purga**

**Secadores de adsorção com regeneração por ar quente:** Os secadores de adsorção com regeneração por ar quente são compostos por duas torres preenchidas com material dessecante. Para garantir o fornecimento contínuo de ar comprimido seco, enquanto uma torre se encontra no processo de secagem do ar comprimido (em operação), a outra torre encontra-se no processo de regeneração do dessecante (em regeneração). Quando saturada a torre em operação (temporizada ou por condição), invertem-se as suas funções.

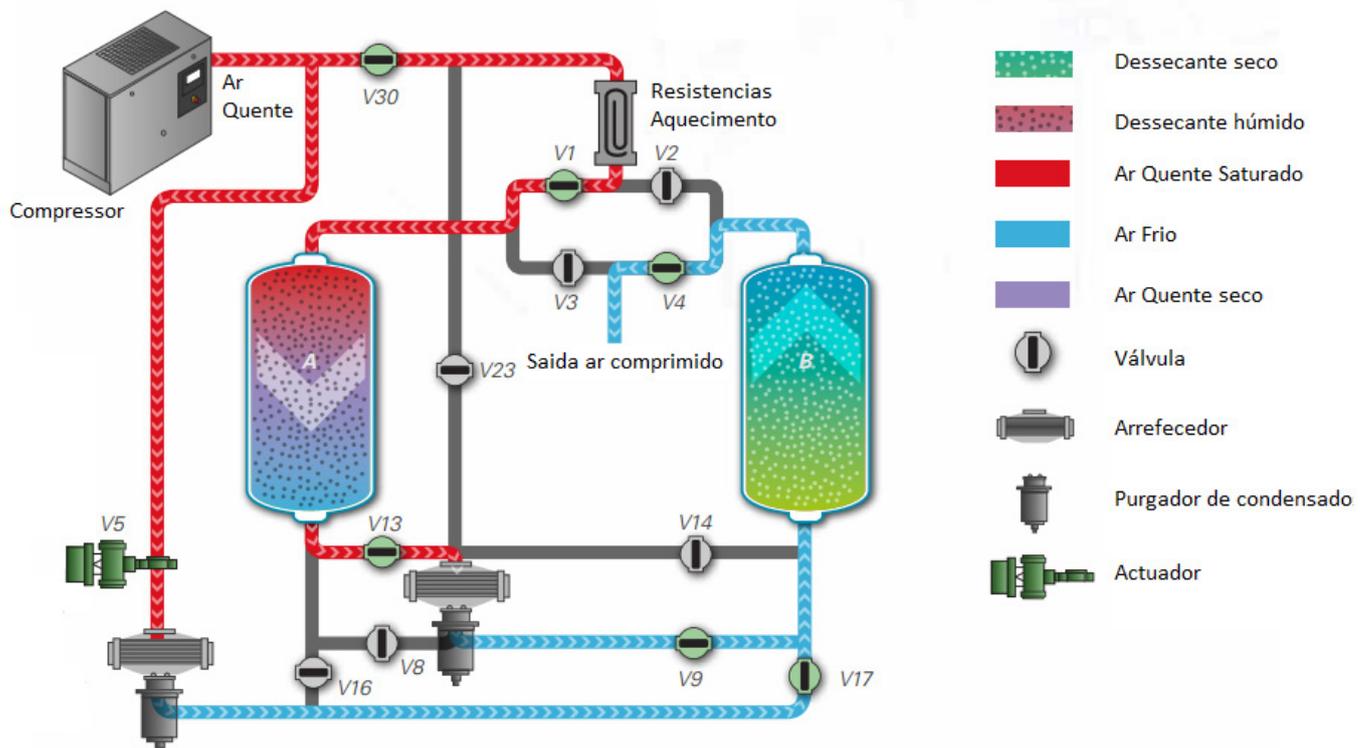
No processo de regeneração, inicialmente o ventilador insufla ar atmosférico no interior da torre em regeneração, fazendo-o passar previamente num bloco de resistências elétricas. O aumento da temperatura do ar insuflado irá elevar a temperatura de saturação do mesmo, permitindo que este remova com maior facilidade a água adsorvida pelo dessecante, regenerando-o. No final do processo de regeneração é utilizada uma pequena percentagem de ar comprimido tratado (entre 2 a 5 %), para arrefecimento do dessecante.



**Fig.26- Diagrama de fluxo de um secador de adsorção com regeneração por ar quente**

**Secadores de adsorção com regeneração por calor de compressão:** Os secadores de adsorção com regeneração por ar quente de compressão aproveitam a energia térmica desenvolvida no processo de compressão, para efetuar a regeneração do material dessecante saturado. Para que a regeneração seja adequada e eficiente, a utilização desta tecnologia

só poderá ser aplicada em compressores isentos de óleo (parafuso ou centrífugos), onde as temperaturas desenvolvidas podem atingir até os 200 °C à saída dos elementos compressores. Neste tipo de secagem, os consumos energéticos adicionais no processo de regeneração (energia elétrica ou ar comprimido) são praticamente nulos.



**Fig.27- Diagrama de fluxo de um secador de adsorção com regeneração por calor de compressão**

## Otimização na seleção de um secador

Uma análise ao processo de secagem, inicialmente deverá passar pela definição do valor de ponto de orvalho necessário no processo fabril, identificando se o nível máximo de PDP é admissível a todos os consumidores.

Independentemente do processo fabril, será boa prática a salvaguarda de todos os componentes do SAC, garantindo que o teor de humidade contido no ar comprimido é o adequado.

Em aplicações onde a exigência do valor de PDP não seja inferior a 2 °C, um secador de refrigeração poderá ser a solução energeticamente mais eficiente, com um baixo custo no investimento inicial e aplicável à generalidade das tecnologias de compressão.

Sempre que a exigência do valor de PDP seja inferior a 2 °C, será necessário recorrer à tecnologia de adsorção. A seleção deste tipo de secadores estará condicionada aos seguintes parâmetros:

- Caudal de ar a tratar;
- Mínimo valor de PDP requerido;
- Tecnologia de compressão;
- Ambiente envolvente.

Para baixos consumos e aplicações localizadas, onde o valor de PDP requerido seja inferior ao da restante unidade fabril, os secadores de adsorção com regeneração por ar de purga são a solução mais indicada, porque o consumo adicional da regeneração do secador não é significativo e o valor de ponto de orvalho será garantido.

Em aplicações com caudais elevados, com diferentes tecnologias de compressão e com a necessidade de garantir um valor constante de PDP, a opção energética mais adequada é a utilização de secadores de adsorção com regeneração por ar quente. Comparando esta tecnologia com secadores de regeneração com ar de purga, mesmo existindo o consumo energético do ventilador, o consumo das resistências e o consumo residual de ar comprimido para arrefecimento, o custo energético relativo ao processo de secagem é bastante

inferior. A utilização de ar de purga para regeneração do dessecante é uma opção energeticamente menos eficiente, quando comparada com a regeneração por ar quente.

Em centrais constituídas somente por compressores isentos de óleo (parafuso ou centrífugos) a utilização da energia térmica obtida na compressão, para regeneração do material dessecante, será a opção energeticamente mais eficiente. A utilização desta energia térmica permite reduzir quase na totalidade os consumos energéticos com a secagem de ar, inerentes ao processo de regeneração do material dessecante.

Para a otimização do controlo em secadores de adsorção, deverá existir uma monitorização do valor de ponto de orvalho sob pressão (PDP), de forma a prolongar o ciclo de secagem (saturação da torre) até que seja atingido o PDP mínimo requerido (controlo por condição). Uma torre regenerada em espera reduz o número de ciclos de secagem, reduz os ciclos de regeneração e traduz-se num menor consumo energético.

## 7.3. Filtragem

Dependendo da aplicação, os contaminantes presentes no ar comprimido, podem interferir na qualidade do produto final. Mediante os valores admissíveis, assim deverá ser selecionado o tipo de filtragem a utilizar no SAC.

Atualmente as tecnologias de filtragem disponíveis para a remoção dos contaminantes do ar comprimido, apresentam uma elevada eficiência na

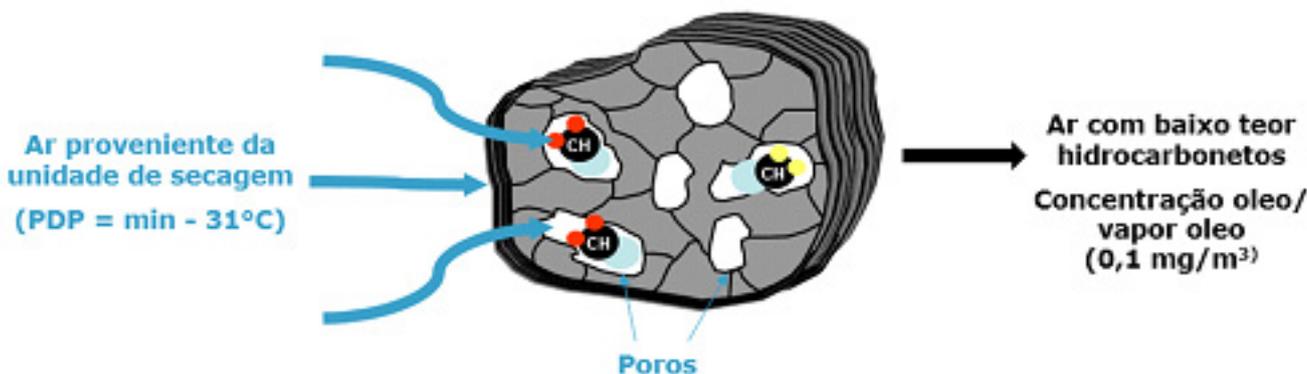
remoção de partículas. No entanto em instalações com compressores lubrificados, para manter essa elevada eficiência, o ar comprimido deve apresentar múltiplos estágios de tratamento, constituídos em primeiro lugar por pré-filtros de proteção ao secador, finalizando com um ou mais estágios de filtragem para remoção de partículas e vapores remanescentes.



**Fig.28- Filtro de partículas**

Estes filtros poderão reduzir a quantidade de óleo até  $0,01 \text{ mg/m}^3$ . Em aplicações específicas, com a instalação de um filtro de carvão ativado, a quantidade

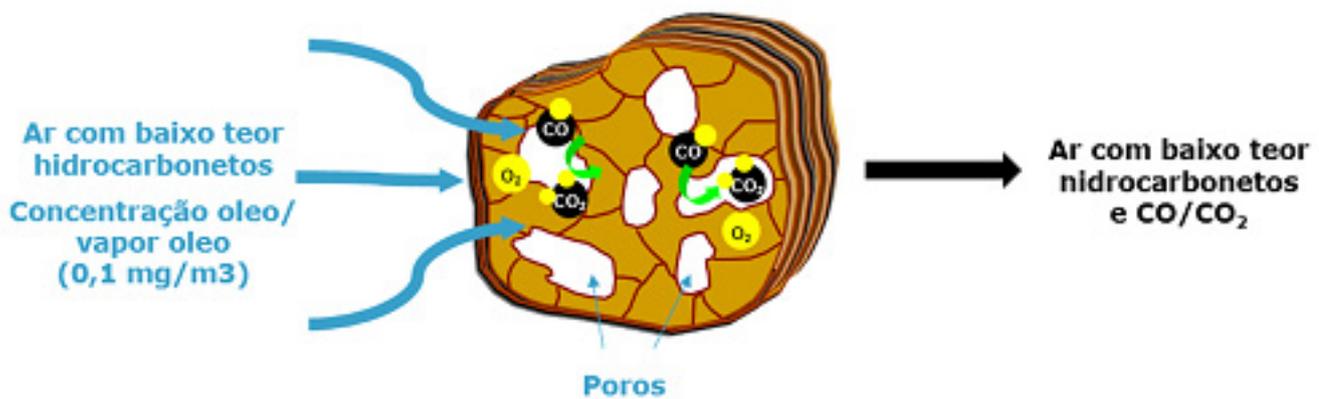
de óleo remanescente no ar comprimido pode ser reduzida até  $0,003 \text{ mg/m}^3$ .



**Fig.29- Filtro de carvão ativado**

Para aplicações especiais (ar respirável, aplicações farmacêuticas, etc.) será necessário recorrer a processos de filtragem específicos, dos quais se destacam:

- Filtros de CO/CO<sub>2</sub>
- Filtros Bacteriológicos
- Etc.



**Fig.30- Filtro catalisador**

O elemento filtrante vai colmatando ao longo da sua vida útil, podendo causar problemas na produção com a contaminação do produto final, originar perdas de carga na rede de ar comprimido e o respectivo aumento do consumo energético para vencer essa mesma perda de carga. A condição dos elementos filtrantes deve ser verificada regularmente e deve fazer parte integrante de um plano de manutenção.

Consoante os requisitos do processo de produção, os sistemas de filtragem do ar comprimido devem ser perfeitamente dimensionados de forma a introduzirem uma perda de carga na rede inferior a 0,1 bar.

Os dados de referência dos filtros anteriormente referidos aplicam-se a uma temperatura do ar comprimido que normalmente é de 21 °C. No entanto, o aumento da temperatura do ar afeta diretamente a capacidade do filtro, a eficiência e a sua vida útil, pelo que deverá ser tomada em consideração no seu dimensionamento.

Uma filtragem eficiente garante a fiabilidade dos componentes da rede de ar comprimido.

# 8. Gestão de condensados

8.1. Recolha de condensados

8.2. Tratamento de condensados

---

de  
dos

## 8. Gestão de condensados

Quando o ar atmosférico é comprimido, o vapor de água presente em cada m<sup>3</sup> de ar aumenta proporcionalmente à pressão de serviço. O processo de compressão gera condensados, que se provenientes de um compressor lubrificado arrastam contaminantes de hidrocarbonetos. Estes condensados se não forem tratados são extremamente perigosos para o ambiente.

Devido aos potenciais danos que estes condensados podem causar, foram introduzidos regulamentos rigorosos que proíbem a condução destes resíduos para os esgotos pluviais sem um tratamento prévio.

### 8.1. Recolha de condensados

Podem ser considerados quatro tipos de purgas:

**Purgas manuais:** Dependem da ação humana e são realizadas em intervalos irregulares com uma duração e eficiência dependentes do operador que as executa. Representam elevados desperdícios energéticos, principalmente quando continuamente abertas.

**Purgas de condensados automáticas:** O purgador tem associado um sistema de boia, que permite uma purga automática e completa dos condensados que se acumulam num pequeno depósito. Uma vez atingido um determinado nível, os condensados são descarregados através da abertura da boia acionada mecanicamente pelo nível do condensado.

**Purgas de condensados temporizadas:** A purga de condensados é realizada através de uma eletroválvula que realiza descargas regulares e temporizadas, independentemente do volume de condensados acumulado, o que provoca desperdícios energéticos ou uma deficiente descarga de condensados.

**Purgas de condensados eletrónicas:**

Controlada eletronicamente, este tipo de purga monitoriza o depósito de condensados com sensores de nível de líquido e descarrega-os apenas quando é necessário, evitando deste modo desperdícios de ar comprimido e desperdícios de energia. Uma vez atingido um determinado nível, os condensados são descarregados, através da abertura de uma eletroválvula comandada pela unidade de controlo. A descarga termina assim que o sensor detetar o nível mínimo de condensado, evitando que ar comprimido seja desperdiçado. No caso de anomalia, estes equipamentos possuem sistemas de alarme que sinalizam falhas de operação da purga.

A ineficiência das purgas de condensados constitui um dos principais desperdícios de energia. As purgas eletrónicas com sensores de nível e sem perdas de ar são as mais eficientes e eficazes na recolha de condensados. Este tipo de tecnologia permite elevar o condensado para cotas acima do seu nível de recolha, devendo ser privilegiada a sua utilização quando existem sistemas de tratamento de condensados.

## 8.2. Tratamento de condensados

Consoante o tipo de tecnologia de compressão, assim o tratamento/encaminhamento dos condensados deve ser efetuado de forma diferenciada:

- Os condensados de equipamentos isentos de óleo podem ser diretamente encaminhados para o esgoto, não necessitando de tratamento adicional.
- Os condensados de equipamentos lubrificados, antes de serem encaminhados para o esgoto, devem ser tratados, para que o teor de óleo arrastado nos mesmos seja minimizado e esteja em conformidade com a legislação em vigor, minimizando desta forma os impactos no meio ambiente.

Os separadores óleo/água devem ser instalados como parte integrante de um Sistema de Ar Comprimido. São concebidos para a remoção do óleo, com uma *performance* que garanta o cumprimento das rigorosas normas ambientais.

# 9. Síntese de p de economia associados às medidas de U possíveis de i em Sistemas Comprimido

---

# potenciais de energia principais JRE plementar de Ar

Podemos dizer que num SAC existe potencial de melhoria, desde o quadro de alimentação elétrica aos equipamentos até ao último ponto de consumo na extremidade da rede. Essas boas práticas ou medidas de utilização racional de energia (URE), podem passar por:

- A instalação adequada do equipamento em condições ambiente favoráveis, uma alimentação elétrica de qualidade e um correto dimensionamento das tubagens de ar e condutas de ventilação/extração, que permitem garantir a operacionalidade do equipamento de uma forma mais eficiente e fiável.
- Uma manutenção adequada, que garante não só uma elevada fiabilidade do equipamento, bem 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 e nada se fizer).
- A substituição de motores elétricos 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. Como exemplo, refira-se:
  - A utilização de compressores lubrificados, em instalações onde uma contaminação do ar coloca em causa o processo de fabrico, exige a instalação de multietágios de filtragem, que introduzem perdas de carga adicionais no SAC e consequentemente um consumo adicional de energia.
  - 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 ou

em operação conjuntamente com outra tecnologia (carga/vazio). Cada instalação ditará qual a melhor solução.

- O tipo de tratamento, que 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, pode-se usar secadores de adsorção com regeneração por ar de purga, com regeneração por ar quente ou com regeneração por calor de compressão, sendo o último tipo o que tem uma eficiência muito superior a qualquer dos outros).  
As unidades de tratamento (secadores e filtros) deverão ser sobredimensionadas para garantir uma perda de carga mínima na rede (com o investimento na aquisição a ser amortizado rapidamente com os benefícios energéticos a médio/longo prazo, obtidos com a redução do consumo energético e diminuição das necessidades de manutenção).
- O correto dimensionamento dos coletores 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 seleção de equipamentos consumidores de ar comprimido, que executem a mesma função com valores de pressão de serviço mais baixos.

Em equipamentos fixos, privilegiar as ligações roscadas em detrimento dos sistemas de engate rápido.

Manutenção cuidada dos equipamentos consumidores.

Evitar utilizar a mesma baixada para vários consumidores.

Substituição de sistemas de criação de vácuo com recurso a ar comprimido (venturi), por bombas de vácuo.

- Deteção e reparação de fugas nas unidades industriais, que constitui uma medida de eficiência significativa (dado que diversos estudos revelam que 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 eficiente. Tal sistema garantirá a seleção da(s) máquina(s) mais eficiente(s) para satisfazer o perfil de consumo, bem como uma gestão eficiente dos equipamentos de reserva.
- Atendendo a que 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...

Em suma, as economias de energia são possíveis em:

- Produção e tratamento do ar comprimido;
- Redes de ar comprimido;
- Dispositivos de utilização final;
- Projeto 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 um caso de estudo particular, podendo existir certamente uma panóplia de possibilidades distintas, sendo o estudo particular caso a caso de elevada importância.

As três tabelas seguintes resumem as medidas de economia de energia consideradas mais significativas pelo Programa Motor Challenge da Comissão Europeia, que normalmente são aplicáveis a um SAC da Indústria. Em cada Tabela, as medidas são apresentadas, começando-se por aquelas que têm um maior impacto potencial e que são as mais fáceis de implementar.

**Tabela 6- Medidas na produção de ar comprimido conducentes a economias de energia**

Otimização da utilização do sistema: ajuste dos controles e regulação da pressão, desligar quando não utilizado.
Otimização da pressão do ar comprimido do sistema. <i>Isto é função dos dispositivos de utilização final.</i>
Redução da temperatura do ar de admissão, por alteração da captação de ar (embora garantindo uma ótima filtragem na tomada de ar).
Modificação ou melhoramento do sistema de controlo do(s) compressor(es).
Otimização a jusante do(s) compressor(es) das mudanças de filtros (em função da queda de pressão, ...).
Filtragem e secagem do ar até aos requisitos mínimos do sistema (possivelmente mediante instalação de filtros/secadores pontuais para necessidades específicas).
Recuperação e utilização do calor desperdiçado através dos sistemas de arrefecimento do(s) compressor(es).
Aumento da capacidade do principal reservatório de ar comprimido.
Utilização de compressor controlado por variador eletrónico de velocidade.
Considerar um sistema de múltiplas pressões, ou usar compressores ( <i>boosters</i> ) para aumentar a pressão em determinados locais.
Substituição de motores elétricos por outros de alto rendimento.
Substituição do(s) compressor(es) por máquina(s) nova(s) ou melhor adaptada(s), com menor(es) consumo(s) específico(s) de energia e ajustada(s) às necessidades do sistema.

**Tabela 7- Medidas na rede de distribuição de ar comprimido conducentes a economias de energia**

Instituição de um programa regular de verificação de fugas de ar comprimido. Redução de fugas com: adaptadores de fugas reduzidas, uniões rápidas de elevada qualidade, ...
Divisão do sistema em zonas, com reguladores de pressão apropriados ou válvulas de corte. Fecho de linhas que estão fora de serviço.
Utilização de purgas de condensados do tipo “sem perdas de ar”.
Instalação de reservatórios suplementares de ar comprimido próximo de cargas variáveis.
Melhorias na rede de distribuição: <i>layout</i> (criar rede em anel, ...), diâmetro da tubagem.

### Tabela 8- Medidas nos dispositivos de utilização final de ar comprimido conducentes a economias de energia

Eliminação de utilizações não apropriadas de ar comprimido.
Reparação ou substituição de equipamentos com fugas de ar comprimido.
Desligar o ar comprimido quando a máquina não está em operação.
Verificação (e otimização) da necessidade de dispositivos específicos de regulação de pressão, filtros, secadores.

A tabela seguinte, resultante de um estudo efetuado para a Comissão Europeia no âmbito do Programa SAVE financiado por aquela entidade, estudo esse já realizado há alguns anos mas que se mantém atual, sobre o potencial de economia de energia em sistemas de ar comprimido na União Europeia e que pode perfeitamente ser transposto para a realidade do setor industrial em Portugal, ilustra bem o potencial significativo associado aos vários tipos de medidas, como as que foram referidas atrás e que podem ser implementadas nestes sistemas.

Esta tabela resume a contribuição potencial em termos de economias de energia das principais medidas técnicas referenciadas (valores típicos), sendo de salientar que os contributos das

várias medidas não são cumulativos (isto é, se implementadas determinadas medidas, outras podem não ter possibilidade de aplicação).

As economias de energia são mais facilmente conseguidas a partir de uma correta conceção dos sistemas (na fase de projeto) e, portanto, aquando da instalação de raiz de um sistema novo, mas também são possíveis pela substituição/melhoria dos principais componentes de um sistema existente. Além disso, ações relacionadas com a operação e manutenção, nomeadamente a manutenção regular de filtros e a deteção e eliminação de fugas de ar comprimido, podem ser introduzidas em qualquer momento do ciclo de vida de um SAC.

**Tabela 9- Contributo para as economias de energia das várias medidas que se podem implementar em SAC**

<b>Medidas</b>	<b>% de aplicação <sup>(1)</sup></b>	<b>% de ganhos <sup>(2)</sup></b>	<b>Contribuição potencial <sup>(3)</sup></b>
<b>Instalação ou renovação do sistema</b>			
Melhoria dos acionamentos (motores de alto rendimento)	25%	2%	0,5%
Melhoria dos acionamentos (variadores eletrónicos 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 do sistema de arrefecimento, da secagem e da filtragem	10%	5%	0,5%
Conceção geral do sistema, incluindo sistemas de multi-pressão	50%	9%	4,5%
Redução de perdas de carga	50%	3%	1,5%
Otimização de dispositivos de utilização final, consumidores de ar comprimido	5%	40%	2,0%
<b>Operação e manutenção do sistema</b>			
Redução de fugas de ar comprimido	80%	20%	16,0%
Maior frequência na substituição de filtros	40%	2%	0,8%
<b>TOTAL</b>			<b>32,9%<sup>(4)</sup></b>

**Legenda:**

- (1)** % de sistemas em que a medida é aplicável e viável economicamente  
**(2)** % de redução do consumo energético anual  
**(3)** Contribuição potencial = Aplicação x Economia  
**(4)** Para a realidade portuguesa, a economia total média estará mais próxima dos 25-30%

# Ficha Técnica

**Título:** Manual de Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido

**Edição:**  
ADENE- Agência para a Energia

**Data:**  
Junho 2016

**ISBN:**  
978-972-8646-37-0

**Para mais informações contactar:**

ADENE - Agência para a Energia  
Av. 5 de Outubro, 208, piso 2,  
1050-065 Lisboa - Portugal

geral@adene.pt  
www.adene.pt

**Design:**  
ADSÓUL

**Todos os direitos reservados.**  
Publicação gratuita

Coordenador:



Agência para a Energia

Autor:



Medida financiada no âmbito do Plano de Promoção da Eficiência no Consumo de energia eléctrica aprovada pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos: