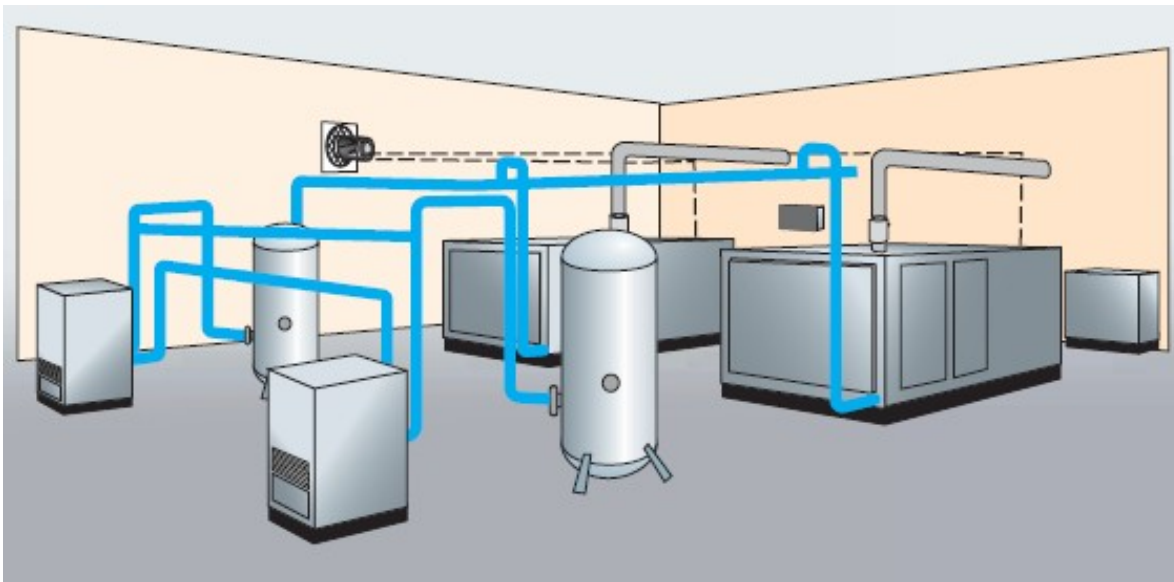


BOLETIM de ENGENHARIA Nº 001/15

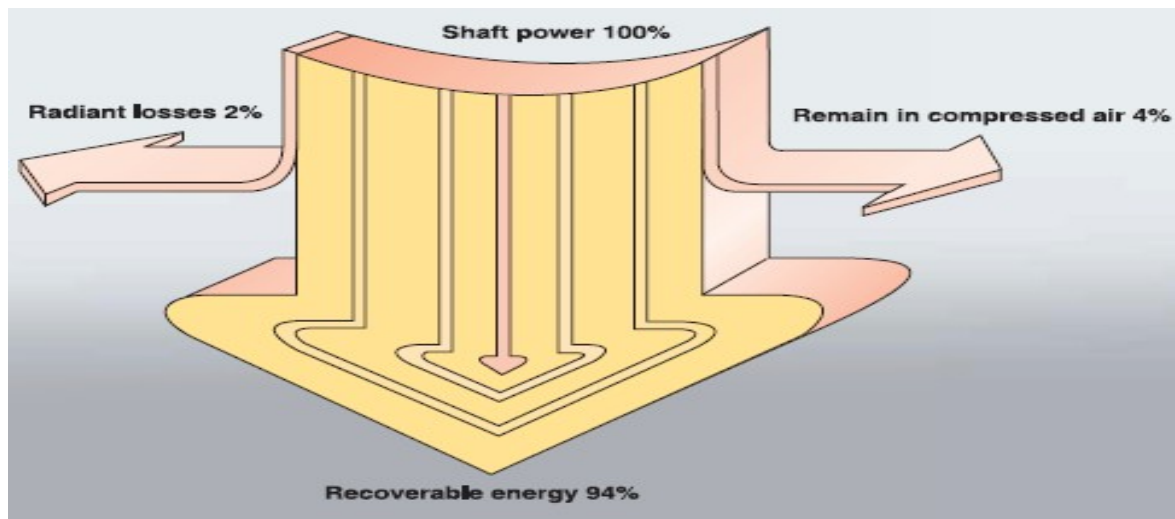
Este boletim de engenharia busca apresentar informações importantes para conhecimento de SISTEMAS de RECUPERAÇÃO de ENERGIA TÉRMICA - ENERGY RECOVERY aplicados a CENTRAIS de AR COMPRIMIDO.

Seu objetivo é demonstrar a viabilidade da tecnologia envolvida e esclarecer aos possíveis interessados no assunto, suas principais duvidas ou curiosidades que o tema desperta.



1.0 Um pouco de Ciência

A produção de ar comprimido é basicamente, um processo de conversão de energia, no qual a energia elétrica é convertida pelo motor elétrico em energia mecânica (eixo), que aciona o compressor, e este converte em energia potencial em forma de pressão no ar comprimido. Pelas transformações termodinâmicas que o ar atmosférico é submetido no processo de compressão, quase toda a energia (~ 94 %) consumida pelo motor elétrico é transferida para o ar e óleo lubrificante na forma de calor. Uma pequena parte perde-se para o meio ambiente através de radiação e convecção.



Porem, a eletricidade não é a única fonte de energia que chega ao sistema. O ar na sucção do compressor contém vapor de água. O calor retido no vapor de água é liberado por condensação (calor de liquefação = mudança de estado físico), nos resfriadores intermediários e posteriores, que fazem parte da unidade de compressão. Geralmente, o calor de condensação contido no ar da sucção equivale entre 5 % a 20% da energia elétrica recebida (1 kg vapor cede = 538 kcal = 0,625 kW para mudança de estado físico).

Ar atmosférico ao nível do mar, com temperatura de 30,0 °C e Umidade Relativa de 60 % contém 18,2 gramas de vapor de água para cada m³ que o compressor aspira.

Com o projeto do Sistema de Recuperação de Energia (Energy Recovery) desenvolvido pela Atlas Copco, para seus compressores de ar da linha ZR, é possível a captura de todo este calor do ar comprimido e do sistema de óleo. Como resultado a energia total recuperada na forma de água quente pode chegar de 80% até 105 % da energia elétrica recebida, dependendo das condições operacionais da instalação. Na grande maioria das aplicações industriais, esta recuperação fica entre 90 % a 95 %.

Para que haja a Recuperação de Energia é fundamental a simultaneidade das “cargas”, ou seja, o Sistema de Ar Comprimido deve operar no mesmo instante que o Sistema que irá receber a energia recuperada. Pois é até possível, acumular energia térmica (tanque isolado), mas os custos podem tornar a recuperação energética inviável economicamente.



2.0 Um pouco de Matemática

A eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Teoricamente, a eficiência energética na geração de ar comprimido η deveria ser determinada pela relação da quantidade de energia útil contida no ar comprimido pela quantidade de energia gasta para sua produção. Na prática, a eficiência de um compressor é determinada a partir do rendimento termodinâmico η_{th} e do rendimento mecânico η_c .

$$\eta = \eta_{th} \cdot \eta_c$$

Rendimento termodinâmico : É obtido pelo trabalho de compressão teórico (processo adiabático reversível) e pelo trabalho de compressão real (processo politrópico) de um gás perfeito.

Rendimento termodinâmico (η_{th}), associado a um processo real de compressão é dado por :

$$\eta_{th} = \frac{W_{th}}{W}$$

em que :

W_{th} – trabalho ideal por unidade de massa, a ser calculado a partir de $\int v dp$ ao longo de um processo ideal; e

W – trabalho real por unidade de massa efetivamente empregado na compressão.

Trabalho ideal de um compressor (processo adiabático reversível) :

$$W_{th} = P_1 \cdot v_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = R \cdot T_1 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad [\text{kJ/kg}]$$

em que:

P_1 - pressão do ar na admissão	[bar] ou $[10^2 \text{ kN/m}^2]$;
v_1 - volume específico do ar na admissão	$[\text{m}^3/\text{kg}]$;
T_1 - temperatura do ar na admissão	[K];
P_2 - pressão do ar na descarga	[bar] ou $[10^2 \text{ kN/m}^2]$;
T_2 - temperatura do ar na descarga	[K];
R - 0,287	[kJ/kg.K]; e
$n = \lambda = 1,4$ (ar em condições ambiente e processo adiabático).	

Trabalho real de um compressor (processo politrópico). O trabalho real é obtido a partir de medidas efetuadas durante o funcionamento da máquina. Os parâmetros a serem medidos são :

$$P_1, v_1, T_1, P_2, v_2, T_2$$

Utilizando-se as equações :

$$P_1 \cdot v_1^n = P_2 \cdot v_2^n;$$

$$P_1 \cdot v_1 = RT_1;$$

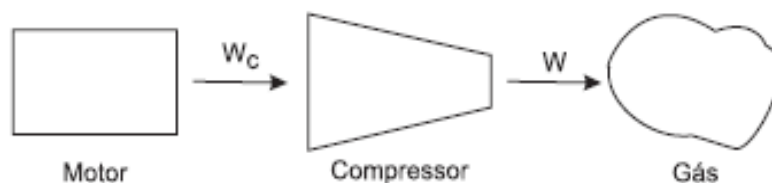
$$P_2 \cdot v_2 = RT_2$$

obtém-se:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\log\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}{\log\left(\frac{P_2}{P_1}\right)}$$

Substituindo o valor n calculado ($1 < n < 1,4$) na equação de W_{th} , obtém-se o valor de W .

Rendimento Mecânico. Durante a transmissão de energia do acionador para o compressor ocorrem inevitáveis dissipações (perdas), provocadas pelo atrito mecânico. Dessa forma, como indica o esquema da figura abaixo, apenas uma parte do trabalho recebido pelo compressor é transferido ao gás.



Para que esse efeito seja computado nos cálculos do trabalho de compressão, utilizamos o rendimento mecânico η_{mec} , com valores típicos entre 0,92 a 0,98, cuja definição é dada pela equação :

$$\eta_{mec} = \frac{W}{W_c}$$

Sendo o W trabalho efetivamente fornecido ao gás, o W_c trabalho entregue pelo motor elétrico ao compressor, devido ao rendimento mecânico $W_c > W$.

Como Potência é o trabalho (energia) pela unidade de tempo, a mesma definição poderia ser apresentada em termos de potência consumida.



Potência de Compressão. Compressores são equipamentos caracterizados termodinamicamente como volumes de controle, cujo desempenho deve ser analisado por meio da identificação de fluxo de energia e massa. Por isso que neste estudo são feitas referências muito mais freqüentes a potência do que ao trabalho de compressão. Para o cálculo da potência, utiliza-se a seguinte equação :

$$\dot{W}_c = \frac{\dot{m} w_{th}}{\eta_{th} \eta_{mec}}$$

em que,

\dot{m} = Vazão mássica do gás	[kg/s];
w_{th} = Trabalho ideal por unidade de massa	[kJ/kg];
η_{th} = Rendimento termodinâmico	[-];
η_{mec} = Rendimento mecânico	[-]; e
\dot{W}_c = Potência requerida pelo compressor	[kW].

Consumo específico de energia (kWh/m³). É um índice de referência da eficiência de um compressor. Na pratica, para o seu cálculo é necessário a potencia (kW) para a compressão e a vazão (m³/h) volumétrica de ar.

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}} \quad [\text{kWh/m}^3] \quad \text{e} \quad \dot{Q} = \dot{m} \cdot v \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

em que:

$$v - \text{volume específico do gás} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

Observação:

$$\text{Consumo específico de energia} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{Q}} \quad [\text{kW.h/Nm}^3]$$

em que:

$$v - \text{volume específico normalizado do gás} \quad [\text{Nm}^3/\text{kg}]$$

Para converter m³/h em Nm³/h: [Nm³/h] = [m³/h] x [273/(273+T1)] x P1/1,033

Em que o índice 1 indica as condições especificadas para o ar do equipamento.

Se a referência é nas condições de padrão normal, denomina-se **vazão**, ou **descarga padrão normal** (Nm³/h)



3.0 Por que RECUPERAR essa Energia Térmica ?

Recuperar essa energia é importante para o aumento da eficiência energética da indústria, a **qualquer tempo**, não somente nos tempos de crise e de energia elétrica cara, qualquer desperdício deve ser evitado ou reduzido:

PONTOS POSITIVOS

- # Aumento da eficiência energética da planta industrial;
- # Aproveitamento de uma energia térmica que seria descartada;
- # Redução de consumo de outras fontes energéticas (gás natural / óleo combustível / etc...), para gerar esta energia térmica que seria descartada;
- # Conseqüente redução de emissão de CO² (efeito estufa), ecologicamente correto;
- # Em sistemas com rejeição de calor por água (torres), redução de reposição (consumo) de água, pois menos energia a ser rejeitada = menos água a ser evaporada;
- # Conseqüente redução de tratamento químico nas torres, ecologicamente correto;
- # Em sistema com rejeição de calor por água (torres), menor volume de água de resfriamento em circulação (< m³/h), redução do consumo elétrico das bombas de água de resfriamento;

PONTOS NEGATIVOS

- # Investimento financeiro para instalação dos equipamentos do sistema de recuperação de energia;
- # Alteração no tratamento químico da água (sistema com rejeição de calor por água) para prevenir possíveis incrustações de cálcio (tubulação / equipamentos) devido a elevação da temperatura de trabalho (~90,0 °C), facilmente administrável pelas empresas de tratamento químico;

4.0 Como RECUPERAR essa Energia Térmica ?

As unidades de compressão de ar são fabricadas em sua grande maioria com duas formas de rejeição do calor transmitido ao ar comprimido : para o AR atmosférico ou para a ÁGUA de resfriamento.

Recuperar o calor da compressão do ar em unidades com rejeição por AR atmosférico até é possível, mas devido à faixa de temperatura que o AR atmosférico sai dos trocadores de calor das unidades (< 50,0 °C), podemos classificar esta energia como de baixa intensidade, dispendiosa de ser recuperada e de pouca aplicabilidade na maioria dos processos industriais.

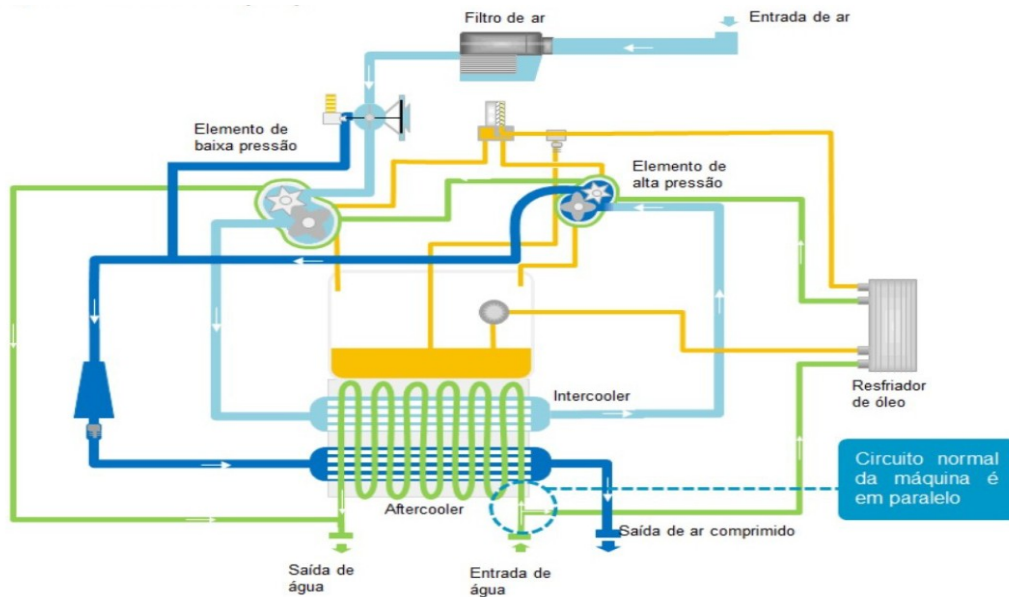
Recuperar o calor da compressão do ar em unidades com rejeição por ÁGUA, em **unidades compressoras padrões** é quase impossível, devido à faixa de temperatura que a ÁGUA sai dos trocadores de calor das unidades (< 40,0 °C), podemos classificar essa energia como de baixa intensidade, dispendiosa de ser recuperada e de pouca aplicabilidade na maioria dos processos industriais.

Então qual é o grande segredo ?

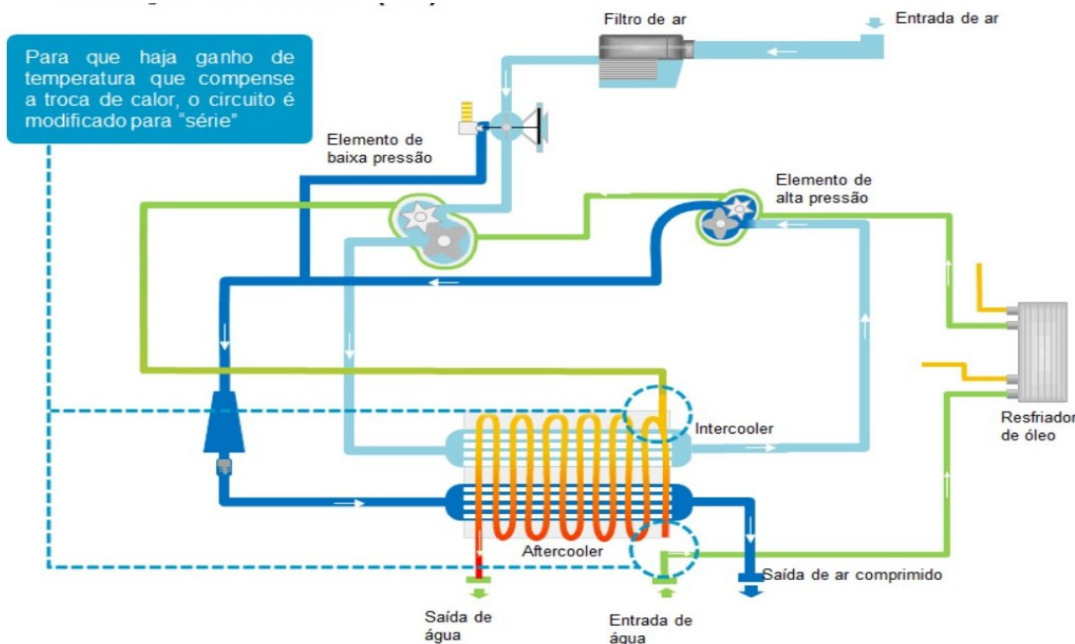
Nas unidades com rejeição de calor por AR atmosférico, não existe comercialmente, tecnologia desenvolvida (economicamente viável) para essa recuperação.

Já nas unidades com rejeição de calor por ÁGUA, é necessário “preparar” a unidade para esta possibilidade. Basicamente essas alterações são feitas no percurso que a água de resfriamento faz no interior da unidade.

Abaixo temos o circuito de água de resfriamento de uma unidade **PADRÃO** Atlas Copco Modelo Linha ZR.



Abaixo temos o circuito de água de resfriamento de uma unidade **ALTERADA** Atlas Copco Modelo Linha ZR.





Observar que no equipamento PADRÃO a circulação de água de resfriamento é em **paralelo**, ou seja, a água de resfriamento passa ao mesmo tempo pelo Aftercooler / Intercooler e o Resfriador de Óleo / Elemento de alta pressão / Elemento de baixa pressão, o que significa uma vazão de água de resfriamento maior (dois caminhos para a água circular).

Já no equipamento ALTERADO a circulação de água de resfriamento é em **série**, ou seja, a água de resfriamento passa primeiramente pelo Resfriador de Óleo / Elemento de alta pressão / Elemento de baixa pressão e posterior pelo Intercooler / Aftercooler, o que significa uma vazão de água de resfriamento bem menor ($\sim \frac{1}{4}$ da vazão original do equipamento padrão).

Atenção especial é dada ao resfriamento do óleo (temperatura $< 36,0$ °C é crucial para um bom funcionamento do compressor) que além de ser o primeiro elemento (Resfriador de Óleo) a receber a água de resfriamento, sendo necessário a substituição do resfriador de óleo original do equipamento por um de maior capacidade térmica e que permita uma vazão de água correta a unidade de compressão de ar.

Agora o mais importante, comparando os dois circuitos, não existe nenhuma alteração no fluxo do ar comprimido, isto significa que **toda a energia a ser recuperada não causa nenhum aumento de energia elétrica consumida pelo compressor para realizar seu trabalho de compressão**. Poderíamos considerar esta energia térmica como “grátis”, pois para os processos industriais envolvidos será necessário manter o compressor de ar em funcionamento com o mesmo consumo de energia elétrica atual da instalação e essa energia térmica, se não for recuperada, terá que ser descartada.

5.0 Como acontece a Recuperação da Energia Térmica ?

Com a redução de vazão de água de resfriamento circulando pelo equipamento há uma **concentração de energia térmica** nessa massa de água.

Das leis da termodinâmica temos :

$$Q = m \cdot cp \cdot \Delta T$$

Onde;

Q - Calor (kcal)

m - massa (kg)

cp - calor específico (kcal/kg °C)

ΔT – Diferencial de Temperatura (°C)



Quando trabalhamos na unidade de tempo (energia/tempo = Potência), temos :

$$\bar{Q} = \dot{m} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Onde;

\bar{Q} - Potência térmica (kcal/h)
 \dot{m} - fluxo volumétrico (m³/h)
 ρ - densidade (kg/m³)
 c_p - calor específico (kcal/kg °C)
 ΔT – Diferencial de Temperatura (°C)

Para água ao nível do mar e temperatura de 20,0 °C, temos :

$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$
 $c_p = 0,9989 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$

$\rho \cdot c_p = 998,2 \times 0,9989 = 997,10 \text{ kcal/m}^3\text{ } ^\circ\text{C}$, usualmente arredondado para : 1000

$$\bar{Q} = \dot{m} \cdot 1000 \cdot \Delta T$$

Conforme apresentado anteriormente, a energia térmica transferida a massa do ar comprimido é a mesma no equipamento padrão ou alterado, portanto :

$$\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 \text{ , porem } \dot{m}_1 = 4 \times \dot{m}_2 :$$

$$\dot{m}_1 \cdot 1000 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot 1000 \cdot \Delta T_2$$

$$4 \times \dot{m}_2 \cdot 1000 \cdot \Delta T_1 = \dot{m}_2 \cdot 1000 \cdot \Delta T_2 \text{ portanto :}$$

$$\Delta T_2 = 4 \times \Delta T_1$$

Isto significa que uma unidade de compressão que esteja operando com :

Temperatura de entrada de água de resfriamento : 27,0 °C
Temperatura de saída de água de resfriamento : 43,0 °C
Diferencial de temperatura $\Delta T = 16,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Após sua alteração irá operar com :

Temperatura de entrada de água de resfriamento : 27,0 °C
Diferencial de temperatura $\Delta T = 4 \times 16,0 \text{ } ^\circ\text{C} = 64,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temperatura de saída de água de resfriamento : 91,0 °C

Essa massa de água de resfriamento a ~90,0 °C é o que interessa para o sistema de recuperação de energia, pois agora a mesma tem alta intensidade e pode ser transferida mais facilmente para algum processo industrial que precise de aquecimento, normalmente através de um trocador de calor intermediário.



6.0 Como fazer esta Recuperação da Energia Térmica ?

O primeiro passo é contratar uma assessoria na área de Engenharia de Sistemas Térmicos para uma **avaliação do potencial energético envolvido**, tais como :

Numero / Modelo / Capacidades das Unidades de Compressão :

Central de Ar Comprimido muito pequena e conseqüentemente de baixa potência elétrica instalada pode não ser viável economicamente a recuperação de energia.

Regime de operação das Unidades de Compressão:

Central de Ar Comprimido que opere poucas horas por dia ou com baixa carga em relação a potência elétrica instalada pode não ser viável economicamente a recuperação de energia.

Avaliação do Sistema de Água de Resfriamento, quanto a vazão / altura manométrica das bombas / Torres de arrefecimento:

A tendência, como ocorre uma redução de vazão (~ 1/4 da vazão original do equipamento padrão) é que o Sistema de Água de Resfriamento fique superdimensionado, sendo necessário uma adequação ao ponto de operação das bombas (redução de consumo elétrico).

Avaliação do Sistema que irá receber a energia térmica recuperada:

Conhecer o Sistema que irá receber a energia térmica recuperada é de fundamental importância para o sucesso da implantação a ser executada.

Selecionamento dos equipamentos envolvidos (bombas / trocadores de calor / sistema de automação / etc . . .):

Muitas vezes o Sistema que irá receber a energia térmica recuperada não se encontra próximo a Central de Ar Comprimido, sendo necessário o transporte desta energia até sua aplicação final. Trocadores de calor mal dimensionados podem comprometer todo o investimento financeiro. Muitas vezes é necessário uma interação, através dos CLP's já instalados na industria com o Sistema de Automação que irá controlar o Sistema de Recuperação de Energia.

Espaço físico necessário a implantação do Sistema de Recuperação de Energia Térmica:

Apesar do Sistema de Recuperação de Energia não exigir muito espaço físico para ser implantado, possíveis interferências com instalações já existentes pode aumentar o valor de investimento inicial, considerando as possíveis dificuldades apresentadas.

Previsão de custos de investimento inicial:

Fundamental para a tomada de decisão de implantar um Sistema de Recuperação de Energia Térmica.

Previsão de redução dos custos operacionais com outras fontes de energia térmica / água / energia elétrica:

Além de fundamental para a tomada de decisão de implantar um Sistema de Recuperação de Energia Térmica, dará o horizonte de quanto tempo o custo de investimento inicial será amortizado. O "famoso" PayBack.

7.0 Mercado da Recuperação da Energia Térmica ?

No segmento de recuperação de energia térmica proveniente de centrais de ar comprimido a ATLAS COPCO é líder de mercado, pois além de investimento na tecnologia possui uma linha exclusiva de equipamentos com soluções padronizadas.



Unidade ER (Energy Recovery) Atlas Copco

Modelos			
ER 90	ER 275	ER 425	ER 900
●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●
●	●	●	●

Existem 4 tamanhos de unidades de controle, capazes de tratar da energia recuperada de compressores isentos de óleo com até 900 kW.



Em muitas aplicações essas unidades tornam a instalação mais simplificada, por serem equipamentos padrões. Lembrando que existe a necessidade de alteração da unidade de compressão e para isto a Atlas Copco fornece um KIT e mão de obra especializada para as alterações.

Mas algumas aplicações industriais necessitam de instalações customizadas, desenvolvidas com suas necessidades específicas, onde a engenharia de sistemas térmicos é fundamental.

No link descrito abaixo, reportamos uma análise completa de um CASO real de instalação de um Sistema de Recuperação de Energia Térmica de uma Central de Ar Comprimido, com potência elétrica total instalada de 3.900 kW.

www.airconsult.com.br/imformes.

Convidamos a você interessado no assunto, a explorar este caso real implantado no final 2.014.