

Recuperação de Calor: Aumento da Eficiência do Processo e Redução dos Custos Operacionais

Joaquim Luiz Monteiro de Barros
 Diretor Desenvolvimento de Negócios da Kuttner do Brasil
 Engenheiro Mecânico
 Pós-graduado em Eficiência Energética
 Mestre em Economia – ênfase na Área de Energia
jl.monteiro@kuttner.com.br

1-Introdução

Uma maior eficiência da energia utilizada será cada vez mais uma meta para todos nós, seja na aplicação em processos produtivos ou mesmo na nossa vida particular. Existe uma demanda energética cada vez maior, aumentando a necessidade de investimentos e os custos envolvidos na geração, transporte e disponibilização das diversas formas de energia, seja para utilização industrial ou doméstica. Esta nova realidade está criando uma consciência quase generalizada, de que devemos utilizar cada vez melhor a energia que consumimos, seja por motivos econômicos, seja por motivos ambientais.

Esta nova realidade nos obriga, na medida do possível, a utilizar a energia disponível de uma forma mais inteligente e completa, tentando sempre aproveitá-la em sua totalidade. Com isto a recuperação do calor residual dos diversos processos industriais, passa a ter uma importância cada vez maior na redução dos custos operacionais e com certeza é uma ótima ferramenta para o aumento da eficiência energética e atendimentos das demandas ambientais.

2-Recuperação de calor

Um recuperador de calor é um equipamento especificamente projetado com o propósito de aproveitar a energia residual, em forma de calor, contida nos gases combustos na exaustão de fornos, caldeiras, aquecedores, motores, turbinas, etc. O aproveitamento desta energia normalmente se dá através do aquecimento do ar, dos combustíveis, da água, de sistemas de fluido térmico, da geração de vapor e da geração de frio através do processo de absorção, reintegrando a energia recuperada ao processo produtivo e aumentando a eficiência global do mesmo.

3-Cálculo do calor (energia) recuperável

Para se calcular a quantidade de energia recuperável através do aproveitamento do calor dos gases de combustão de um forno, uma caldeira, um motor ou turbina, utiliza-se a expressão matemática abaixo:

$$Q = \dot{m}.cp.(t_E - t_S) \tag{Eq 3.1}$$

Onde:

- Q= quantidade de calor recuperável;
- \dot{m} = vazão mássica dos gases quentes;
- cp= calor específico dos gases quentes;
- t_E = temperatura de entrada dos gases quentes no recuperador de calor;
- t_S = temperatura de saída dos gases quentes do recuperador de calor.

4-Exemplos de sistemas com recuperação de calor e cogeração

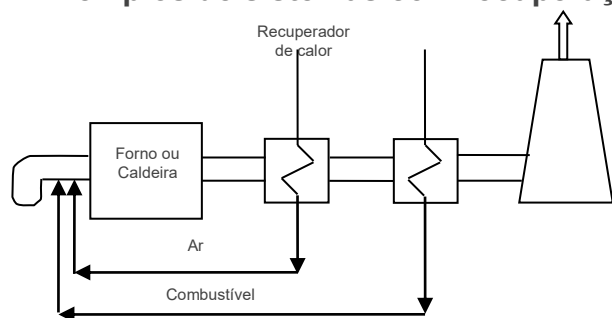


Fig 4.2 Economizador para caldeiras
 Fig 4.1 Recuperação de calor com

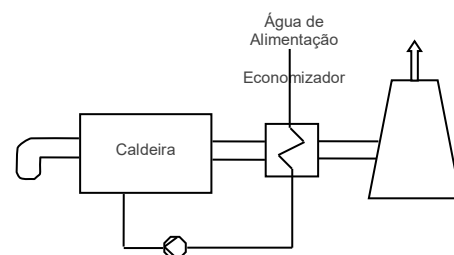


Fig 4.2 Economizador para caldeiras
 Fig 4.1 Recuperação de calor com

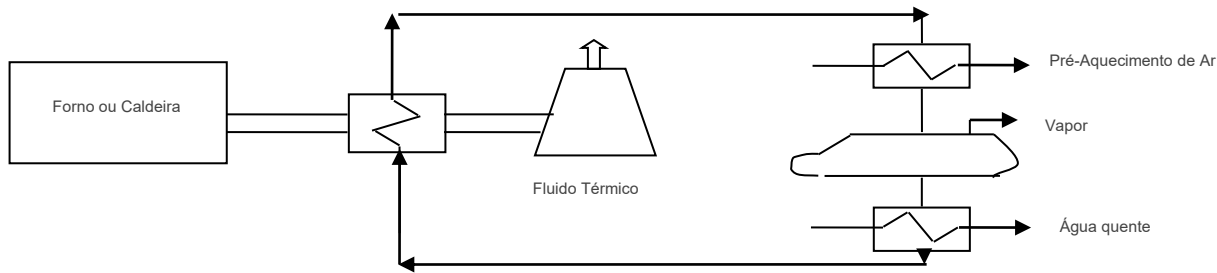


Fig 4.3 Recuperação de calor através de Sistemas de Fluido térmico

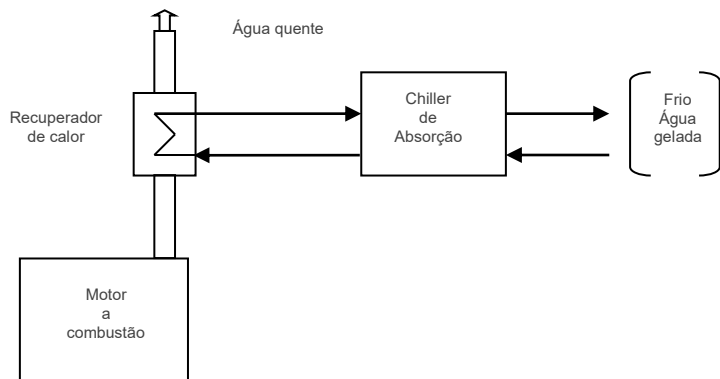


Fig 4.4 Cogeração com produção de frio (água gelada)

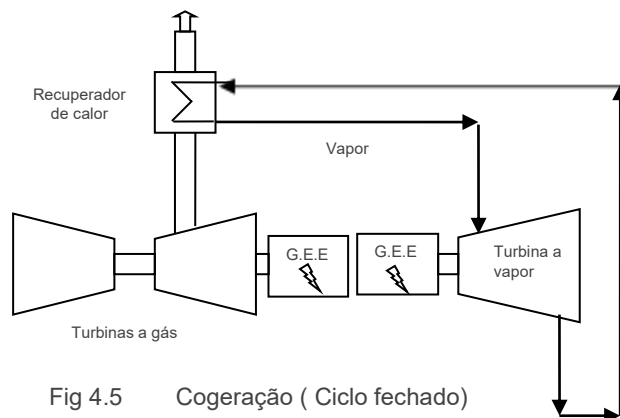


Fig 4.5 Cogeração (Ciclo fechado)

5-Dimensionamento básico de trocadores de calor

Nos trocadores mais utilizados nos processos industriais, a transferência de calor é dada predominantemente através da condução e convecção e sua forma construtiva é projetada para se ter um fluxo cruzado entre os fluidos frios e quentes. Para este tipo de trocador de calor, o dimensionamento básico é dado pela expressão a seguir:

$$Q = U \cdot A \cdot DTML \quad (\text{Eq 5.1})$$

onde:

Q = quantidade de calor trocado;

U = coeficiente global de transferência de calor;

A = área de troca térmica necessária;

DTML = diferença média logarítmica de temperatura;

O coeficiente global de transferência de calor é dado pela seguinte fórmula:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi KL} + \frac{A_e}{A_c} \frac{1}{h_e}}$$

A tabela abaixo apresenta valores práticos dos coeficientes globais de transferência de calor, para algumas aplicações usuais:

Tabela 5.1 – Valores práticos de U

APLICAÇÕES	$U = \left(\frac{w}{m^2 c} \right)$
Trocador de calor AR-AR	10 – 50
Trocador de calor AR-GAS	10 – 50
Trocador de calor Água-Água	900 – 1400
Trocador de calor Água-Óleo	100 – 400
Trocador de calor Vapor-Óleo	60 - 180

A diferença média logarítmica de temperatura pode ser calculada pela expressão abaixo:

$$DTML = \frac{(T_{qS} - T_{fS}) - (T_{qE} - T_{fE})}{\ln \left[\frac{(T_{qS} - T_{fS})}{(T_{qE} - T_{fE})} \right]} \quad (\text{Eq 5.3})$$

onde:

T_{qE} = temperatura do fluido quente na entrada do trocador

T_{qS} = temperatura do fluido quente na saída do trocador

T_{fE} = temperatura do fluido frio na entrada do trocador

T_{fS} = temperatura do fluido frio na saída do trocador

Uma vez que a expressão $Q = U \cdot A \cdot DTML$ é adequada para o dimensionamento de trocadores de calor tipo tubo duplo com o fluido escoando em contra corrente ou corrente paralela, para outras formas construtivas se faz necessário introduzir um fator de correção. Este fator é calculado levando-se em conta as temperaturas de entrada e saída dos fluidos quente e frio e a geometria do equipamento e normalmente varia entre 0,6 e 1,0 sendo obtido através de gráficos específicos.

Desta forma a expressão geral utilizada para o dimensionamento básico de trocadores de calor para as diversas formas construtivas e variados níveis de temperatura é dada pela equação:

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot DTML \quad (\text{Eq 5.4})$$

onde:

F = fator de correção.

Outro importante ponto que deve ser levado em consideração quando se dimensiona um trocador de calor é que o mesmo durante o seu ciclo operacional pode “sofrer” incrustações em sua área de troca térmica, devido ao contato contínuo com os fluidos de trabalho e que esta camada de incrustação muitas vezes atua como um isolante térmico, reduzindo a capacidade de troca de calor do equipamento.

Isto posto, normalmente é introduzido na expressão matemática de dimensionamento do trocador de calor uma constante que corrige o valor do coeficiente global de transferência de calor.

O fator de incrustação pode ser determinado de forma experimental através da diferença entre os valores do coeficiente global de transferência de calor nas condições iniciais de operação (“trocador limpo”) e após um determinado período operacional onde as superfícies de troca térmica se encontram com algum grau de incrustação oriundo do contato com os fluidos de trabalho. A tabela abaixo retirada da literatura especializada neste tema, apresenta valores normalmente utilizados nos cálculos de trocadores de calor para o fator de incrustação:

Tabela 5.2 – Valores práticos de IF

Tipo de Fluido	$IF \left(m^2 \frac{C}{W} \right)$
Ar	0,0004
Vapor	0,00009
Óleo	0,0007
Gás	0,0005

Uma vez determinado o fator de incrustação adequado para a aplicação específica, pode-se então calcular o valor do coeficiente global de transferência de calor do equipamento, conforme expresso abaixo:

$$IF = \frac{1}{U_{SUJO}} - \frac{1}{U_{LIMPO}} \quad (\text{Eq 5.5})$$

Cabe destacar que para cada aplicação específica tipos de fluidos de trabalho e temperaturas de trabalho do trocador, existe uma metodologia de cálculo mais adequada para se obter valores mais precisos e uma melhor eficiência térmica. A forma construtiva do trocador deve estar totalmente baseada nos cálculos utilizados para o seu dimensionamento e de acordo com as normas existentes para este tipo de equipamento.

6- Cálculo aproximado da economia de combustível obtida através da recuperação de calor

Uma vez calculado a quantidade de calor recuperado no processo, com base na equação 3.1 e obtendo-se do valor encontrado das perdas específicas de cada sistema, pode-se ter uma ordem de grandeza da redução do consumo de combustível em um forno ou uma caldeira.

A equação abaixo apresenta como calcular a economia de combustível por unidade de tempo.

$$\dot{m} = \frac{Q - \text{perdas}}{PCI} \quad (\text{Eq 6.1})$$

onde:

\dot{m} = quantidade de combustível por unidade de tempo;

Q= quantidade de calor recuperável ;

PCI= poder calorífico inferior do combustível.

Tabela 6.1 – PCI (Valores práticos)

COMBUSTÍVEL	PCI
Álcool	5.500 kcal / l
Carvão Mineral	4.500 kcal / kg
Carvão Vegetal	7.500 kcal / kg
Gás Natural	9.065 kcal / Nm ³
Lenha	2.300 kcal / kg
Óleo Combustível 2A	9.550 kcal / kg
Óleo Diesel	8.620 kcal / l
Querosene	8.300 kcal / l

7 – Considerações finais

Uma análise técnica ponderada, uma engenharia com balanços de massa e térmico, foco no consumo e no custo dos insumos e combustíveis, dados atualizados e confiáveis e uma avaliação anterior das necessidades energéticas específicas de cada instalação são os principais pontos para se chegar ao correto dimensionamento do sistema de recuperação de calor que proporcione uma real e significativa economia e um aumento da eficiência global do processo produtivo. Para tanto a experiência know-how, o domínio das diversas disciplinas da engenharia térmica e uma visão global e macroeconômica são elementos chaves e que devem sempre permear as tomadas de decisão em todas as etapas do projeto e da implantação de recuperadores de calor nas mais diversas instalações industriais.

Um especialista da Kuttner está a sua disposição para, através de uma análise técnica e econômica de sua planta, verificar o potencial energético para a instalação de um sistema de recuperação de calor, objetivando o aumento da eficiência global e a redução dos custos operacionais.