

## AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA COM O PRÉ-AQUECIMENTO DO AR E DO GÁS ATRAVÉS DA RECUPERAÇÃO DO CALOR DOS GASES DE EXAUSTÃO DOS REGENERADORES DO ALTO FORNO\*

Joaquim Luiz Monteiro de Barros<sup>1</sup>  
Reinaldo Pereira Patto<sup>2</sup>  
Paulo Victor da Silva Gandra<sup>3</sup>

### Resumo

Com base na atual situação de restrição de disponibilidade e do custo da energia no Brasil, sistemas tipo Heat Pipe (tubos de calor) tendem a ser cada vez mais utilizados na recuperação do calor dos gases de exaustão nos processos de produção de gusa, para o pré-aquecimento de ar/gás, aumentando a eficiência energética global do sistema e reduzindo o consumo de combustível. Esta tecnologia agrega uma série de vantagens, quando comparada com os trocadores de calor tradicionais, pois possui um design compacto, transferência de calor uniforme em toda a área de troca térmica, alto grau de vedação, de forma a evitar o risco de vazamento e mistura/contaminação entre os fluidos quente e frio.

**Palavras-chave:** Heat pipe; Tubos de calor; Recuperação de calor; Eficiência energética; Alto forno.

### INCREASE OF ENERGETIC EFFICIENCY WITH AIR AND GAS PRE-HEATING THROUGH HEAT RECOVERY FROM EXHAUSTION GASES OF BLAST FURNACES REGENERATORS

### Abstract

Based on the present situation of availability limitation and the high cost of energy in Brazil, Heat Pipe systems can be more used in the heat recovery from exhaust gases in iron production processes, for air and gas preheating, increasing the global energy efficiency of the system and reducing fuel consumption. This technology brings a number of advantages compared to the traditional heat exchangers, since it has a compact design, uniform heat transfer across the heat exchange area, high degree of sealing, in order to prevent risk of leaking and mixing/contamination between hot and cold fluids.

**Keywords:** Heat pipe; Heat recovery; Energetic efficiency; Blast furnace.

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre em Economia com ênfase em energia, Pós-Graduado em Eficiência Energética, Diretor de Desenvolvimento de Negócios, Kuttner do Brasil, BH, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Gerente de Núcleo de Meio ambiente e Energia, Kuttner do Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Estudante Engenharia Mecânica PUC-MG, Estagiário de Desenvolvimento de Negócios, Kuttner do Brasil, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Atingir uma maior eficiência energética no Alto Forno, reduzindo a necessidade de queima de combustível para o pré-aquecimento do ar de combustão e até mesmo o consumo de coque ou carvão vegetal é uma meta operacional em todas as usinas siderúrgicas, seja por motivos econômicos ou por pressões advindas das demandas ambientais.

A tecnologia de recuperação de calor através de Heat Pipe (Tubos de Calor) vem de encontro ao atendimento destas demandas operacionais, com vantagens técnicas e alta eficiência, conforme será apresentado neste trabalho.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O intuito deste trabalho é apresentar de forma didática e prática a aplicação da tecnologia Heat Pipe (Tubos de Calor), suas características e vantagens, no pré-aquecimento do ar de combustão e do gás de alto forno, através da recuperação de calor dos gases de exaustão dos regeneradores (Cowpers) com o objetivo de aumentar a eficiência reduzindo o consumo de gás combustível no processo de produção de gusa.

### 2.1 Heat Pipe

Equipamento projetado para transferir calor de um fluido quente para um fluido frio através da evaporação e condensação isotérmica de um fluido de trabalho específico e adequado para cada aplicação, fluido este que se encontra confinado no interior do feixe tubular. O Heat Pipe é um equipamento com alta eficiência, compacto e próprio para trabalhar com diversos tipos de fluidos e uma ampla faixa de temperatura.

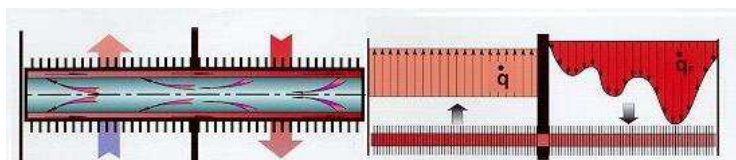


Figura 1. Diagrama operacional simplificado de um Heat Pipe

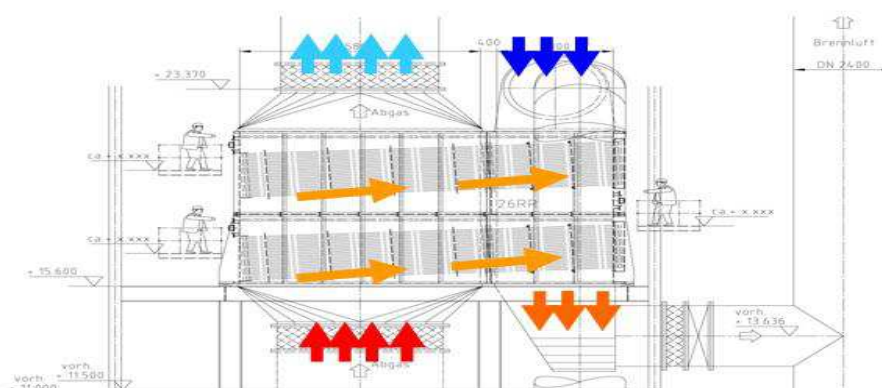


Figura 2. Heat Pipe-Fluxo de massa, calor e design

## 2.2 Características

Equipamento adequado para pré-aquecimento de ar, gases combustíveis e outros fluidos, através da recuperação do calor dos gases quentes. Seu feixe tubular pode trabalhar tanto na posição horizontal quanto vertical, de forma a atender as necessidades específicas de cada instalação.

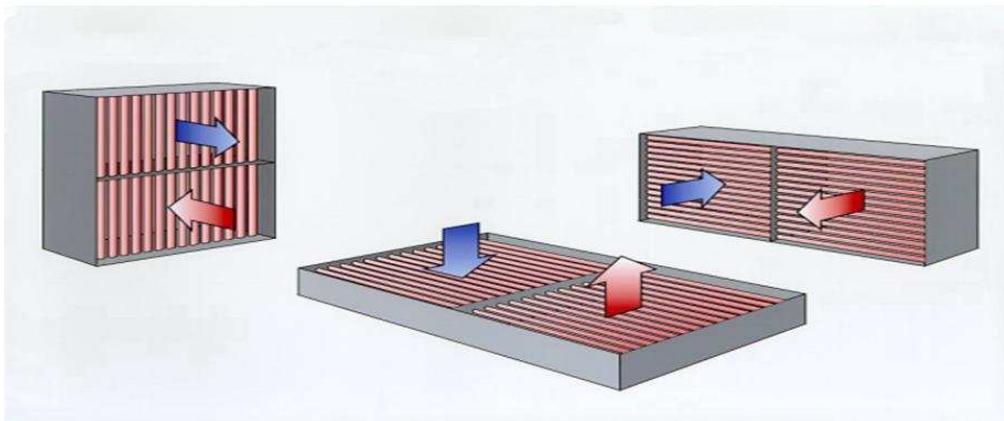


Figura 3. Posições de trabalho do feixe tubular

## 2.3 Vantagens Operacionais do Heat Pipe

- . Design compacto
- . Sistema modular
- . Facilidade de montagem e desmontagem
- . Facilidade de inspeção e manutenção
- . Alta confiabilidade
- . Alta disponibilidade
- . Baixa perda de carga
- . Feixe tubular com tubos independentes
- . Sem partes móveis
- . Alto grau de vedação
- . Baixíssimo risco de mistura/contaminação entre os fluidos quente e frio

## 2.4 Fluidos de Trabalho e Temperaturas Críticas

Existe uma ampla gama de substâncias que podem ser utilizadas como fluido de trabalho, devendo o mesmo atender as necessidades operacionais específicas de cada sistema.

A utilização de água purificada como fluido de trabalho tem uma vasta aplicabilidade, além de uma facilidade operacional. O limite para a aplicação deste fluido de trabalho é balizado pela temperatura crítica da água (374,15 °C) e de uma maneira geral pode-se considerar que a máxima temperatura de filme no lado quente do sistema está em torno de 400 °C e no lado frio é de aproximadamente 280 °C.

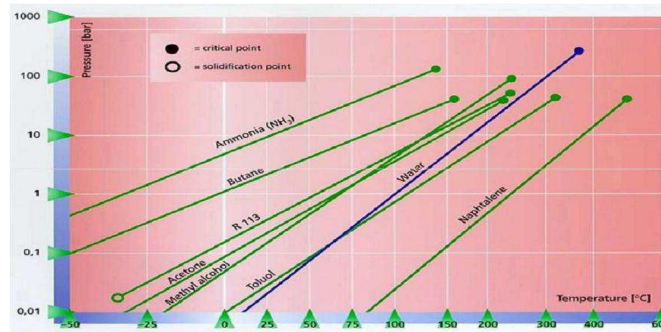


Figura 4. Fluidos de trabalho e temperaturas críticas

## 2.5 Características Construtivas

Trata-se de um sistema modular, com design flexível e adaptável a cada tipo de instalação.



Figura 5. Exemplos de instalação



Figura 6. Sistema modular



Figura 7. Montagem do feixe tubular/espelho





Figura 8. Manutenção do feixe tubular

## 2.6 Figuras Ilustrativas da Aplicação de Heat Pipes na Recuperação de Calor dos Gases de Exaustão dos Cowpers

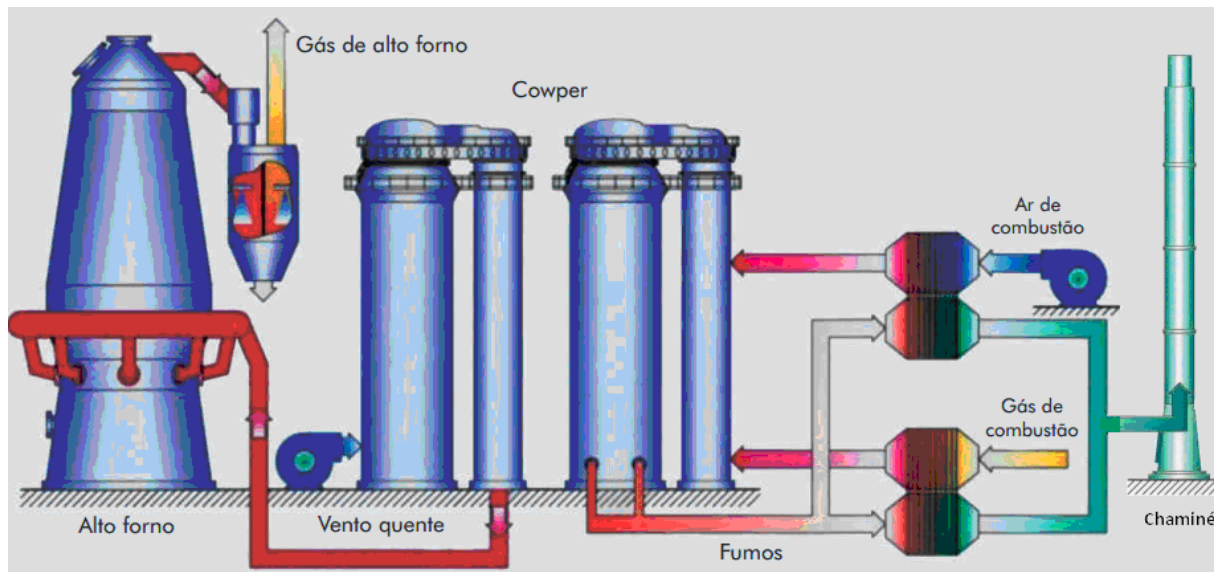


Figura 9. Desenho esquemático da aplicação do Heat Pipe

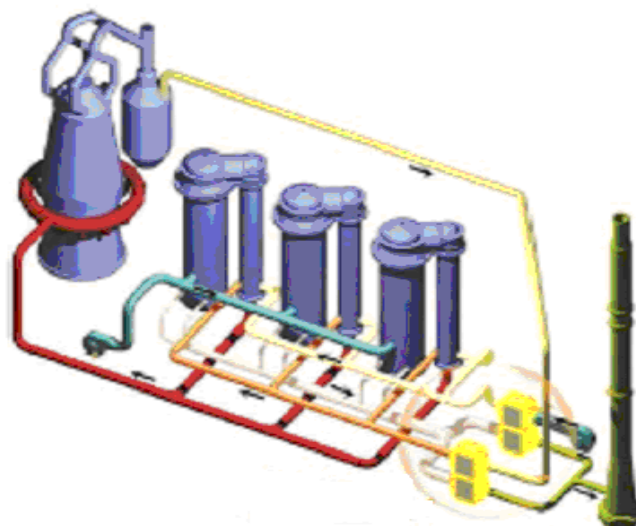


Figura 10. Isométrico esquemático da aplicação do Heat Pipe

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO (Caso Real)

#### 3.1 Objetivo

Aumentar a eficiência energética do sistema de regeneradores (Cowpers) no intuito de se reduzir ao máximo o consumo de COG sem alteração dos parâmetros metalúrgicos da produção de gusa e sem incremento do consumo de coque no Alto Forno.

#### 3.2 Dados da Instalação Existente

- 1 Atlo Forno;
- 4 Regeneradores (Cowpers);
- Gás combustível queimado nos regeneradores: gás misto (GOC + GAF);
- Vazão dos gases de exaustão dos regeneradores: 360.000 Nm<sup>3</sup>/h;
- Temperatura dos gases de exaustão dos regeneradores: 315 °C;
- Taxa de enriquecimento de GOC no GAF para atendimento da demanda térmica: 13.000 Nm<sup>3</sup>/h;
- Vazão do ar de combustão: 160.000 Nm<sup>3</sup>/h.

#### 3.3 Solução Adotada

Instalação de dois recuperadores de calor tipo Heat Pipe para pré-aquecimento do ar de combustão e do gás combustível através de troca de calor com os gases de exaustão dos quatro Cowpers existentes.

#### 3.4 Dados da Instalação com a Implantação dos Recuperadores de Calor

##### 3.4.1 Heat Pipe – Pré-Aquecedor de gás

- Vazão dos gases de exaustão: 270.000 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura dos gases de exaustão na entrada do Heat Pipe: 315°C
- Temperatura dos gases de exaustão na saída do Heat Pipe: 128°C
- Vazão do gás combustível: 286.550 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura do gás combustível na entrada do Heat Pipe: 35°C
- Temperatura do gás combustível na saída do Heat Pipe: 220°C
- Performance aproximada: 21,2 MW

##### 3.4.2 Heat Pipe – Pré-Aquecedor de Ar

- Vazão dos gases de exaustão: 176.900 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura dos gases de exaustão na entrada do Heat Pipe: 315°C
- Temperatura dos gases de exaustão na saída do Heat Pipe: 128°C
- Vazão do ar combustível: 197.150 Nm<sup>3</sup>/h
- Temperatura do ar combustível na entrada do Heat Pipe: 30°C
- Temperatura do ar combustível na saída do Heat Pipe: 220°C
- Performance aproximada: 13,7 MW

### 3.4.3 Fluxograma Ilustrativo da Instalação Proposta

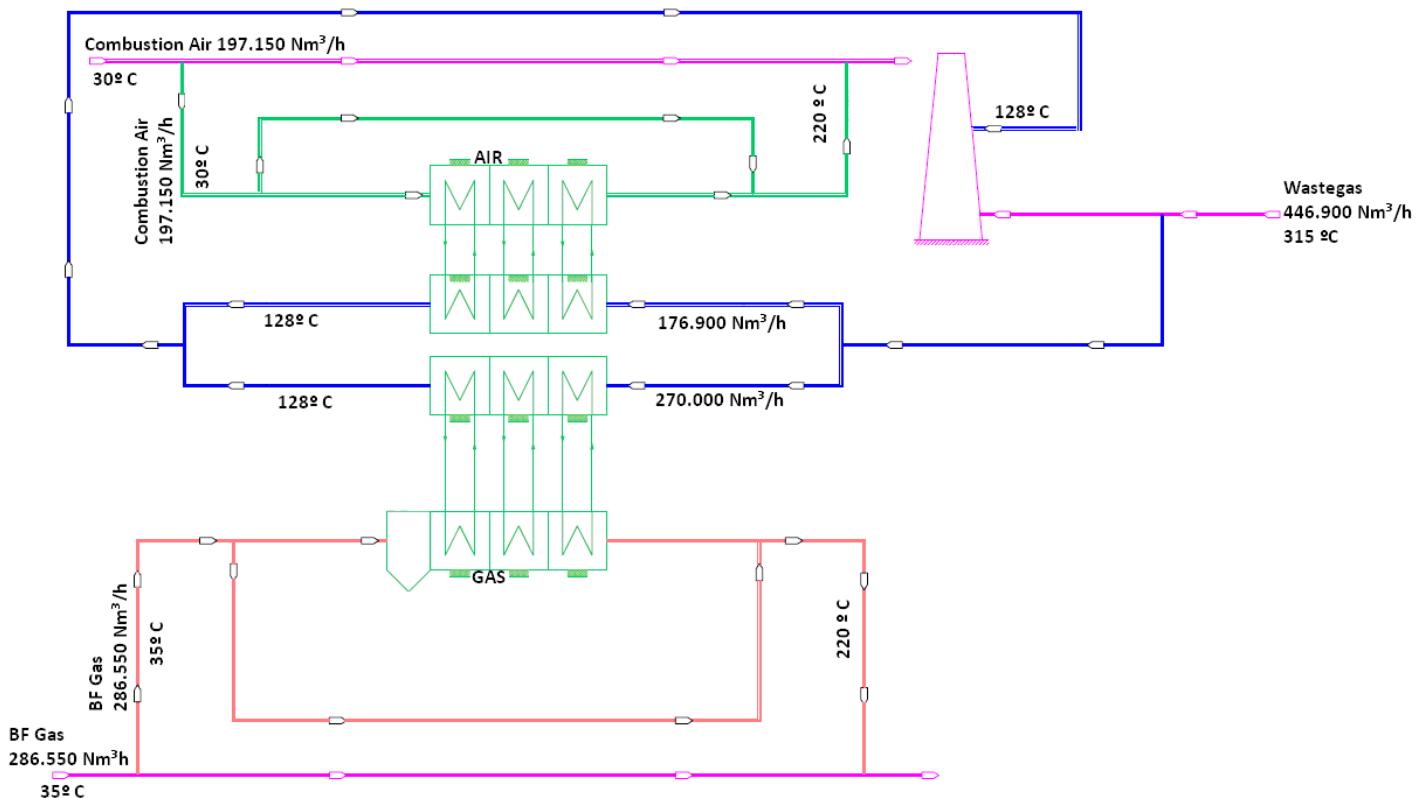


Figura 11. Fluxograma ilustrativo da instalação do Heat Pipe

### 3.4.4 Estudo Resumido de Viabilidade Econômica

Para a base deste estudo foram consideradas as premissas abaixo:

- Vida útil da instalação: 10 anos (para efeito de cálculo econômico);
- Custo do capital: 12% aa;
- Investimento: R\$ 60.000.000;

Para o estudo econômico foi considerado um valor de custo do gás combustível de R\$ 20,00/MMBTU

$$\text{Receita} = 13.000 \left( \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) \times 4.350 \left( \frac{\text{Kcal}}{\text{Nm}^3} \right) \times \left( \frac{3.968(\text{BTU})}{1.000.000} \right) \times 20,00 \left( \frac{\text{R\$}}{\text{MMBTU}} \right)$$

R\$ 4.488 / hora

R\$ 107.707 / dia

R\$ 3.231.222 / mês

Considerando-se uma disponibilidade de 95%, tem-se:

Receita Anual = 12x R\$ 3.231.222 x 0,95 = R\$ 36.835.928.

### Cálculo do valor presente líquido (VPL)

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t}$$

Onde: I = investimento;

FC = fluxo de caixa;

K = custo de capital;

t= tempo; vida útil do empreendimento;

n = vida útil do empreendimento

**VPL = R\$ 148.000.000**

### Cálculo da taxa interna de retorno (TIR)

$$I = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t}$$

Onde: n = vida útil do empreendimento;  
FC = fluxo de caixa;  
TIR = taxa interna de retorno;  
t = tempo; vida útil do empreendimento;  
I = investimento

**TIR = 61%**

### Cálculo de Payback

**Payback = 1,9 anos**

## 3.5 Resultados

Com o pré-aquecimento do ar e gás de combustão a 220 °C, temos um incremento energético no sistema de 34,9 MW e com base no novo balanço térmico e de massa do sistema, a necessidade de gás para enriquecimento de combustível queimado nos Cowpers foi zerada, ou seja, os regeneradores são aquecidos nas temperaturas previstas apenas com a combustão do gás de alto forno. Desta forma além, de uma redução específica do consumo de combustível no processo de produção de gusa, foi gerado uma disponibilidade energética do COG para aplicação em outros processos da planta siderúrgica, seja para a produção de aço e/ou na geração de energia elétrica.

## 3.6 Outras Referências / Exemplos de Instalações Existentes

Tabela 1. Referências

SIDERURGIA ALTO FORNO	TEMPERATURA DOS GASES DE EXAUSTÃO DO COWPER	RECUPERAÇÃO DE CALOR	CAPACIDADE (KW)
Thyssen Stahl AG AF4	230 °C	Pré-aquecimento de ar e gás	12.300
Hoesch Stahl AG AF 7	258 °C	Pré-aquecimento de ar gás	8.970
Thyssen Stahl AG AF 1	340 °C	Geração de água quente	24.000
Peine Salzgitter Stalweike AF A	400 °C	Pré-aquecimento de ar e gás	22.160
Sidmar N. V. AF A e B	285 °C	Pré-aquecimento de ar e gás	30.100
China Steel AF 1	300 °C	Pré-aquecimento de ar e gás	15.615



## 4 CONCLUSÃO

O sistema Heat Pipe apresenta uma alta flexibilidade operacional, alta segurança, confiabilidade e alta disponibilidade, sendo um equipamento modular e de fácil manutenção. Através de uma análise técnica, com balanços térmico e de massa, baseados em dados operacionais do alto forno é possível se dimensionar e instalar sistemas de recuperação de calor eficientes e tecnicamente adequados, reduzindo os custos operacionais, aumentando a eficiência global do sistema, de forma a se obter um significativo ganho energético e uma redução do consumo de gás combustível necessário no processo de produção de gusa.

## REFERÊNCIAS

- 1 Incropera FP, Dewitt DP. Fundamentals of Heat transfer. New York: John Wiley & Sons; 1981.
- 2 Van Wylen G, Sonntag R, Borgnakke C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 4ª edição. São Paulo: Edgard Blücher; 1995.
- 3 Barros Jr JLM. Integração de Utilidades, Recuperação de Calor e Cogeração em Sistemas de aquecimento de fluido térmico (pós-graduação). Rio de Janeiro: CEFET; 2002.
- 4 Praeger J. Waste Heat Recovery Systems\_Ecostat and Ecoflow. Essen: Kuettner Energy; 2012.
- 5 Barros Jr JLM. Heat Pipe: Uma Alternativa tecnológica operacional no aquecimento de ar e gás. BH: Kuttner do Brasil; 2014.
- 6 Blast Furnace Theory and Practice – Gordon and Breach Science Publishers – Dwight C. Brown, Terence E. Dancy and Robert L. Stephenson.
- 7 Foundations of Iron and Steel Metallurgy – Elsevier Publishing Co. LTD. - W. H. Dennis.
- 8 Metallurgy and Metallurgical Engineering Series – McGraw Hill Book Company – Allison Butts.