

SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA COM A TECNOLOGIA HEAT PIPE: UMA SOLUÇÃO TÉCNICA, SEGURA E EFICIENTE¹

Joaquim Luiz Monteiro de Barros²
Fabiana Moreira Costa³

Resumo

Uma maior eficiência energética, com redução da queima de combustível ou o consumo de energia elétrica é uma meta em todas as plantas de fundição, seja por demandas operacionais ou econômicas. O objetivo deste trabalho é apresentar um resumo técnico sobre o processo de recuperação de calor e demonstrar que a tecnologia de trocadores de calor tipo Heat Pipe (Tubos de Calor) pode atender estas demandas operacionais e econômicas, com diversas vantagens técnicas e alta eficiência.

Palavras-chave: Heat pipe; Tubos de calor; Recuperação de calor; Fundição.

THERMAL ENERGY RECOVERY SYSTEMS WITH HEAT PIPE TECHNOLOGY: A TECHNICAL, SAFE AND EFFICIENT SOLUTION

Abstract

More energy efficiency with fuel burner reduction or electrical energy consumption is the aim in all Foundry plants, whether it be for operational or economical demands. The purpose of this paper is to present a technical summary about heat recovery process and show that Heat Pipe technology can meet operational and economic demands, with several technical advantages and high efficiency.

Key words: Heat pipe; Heat recovery; Foundry.

¹ 18º Congresso de Fundição – CONAF, São Paulo, setembro de 2019.

² Engenheiro Mecânico, Mestre em Economia com ênfase em Energia, Pós Graduado em Eficiência Energética, Diretor de Desenvolvimento de Negócios (Kuttner do Brasil).

³ Engenheira de Energia e Engenheira Eletricista - PUC-MG, Analista de Desenvolvimento de Negócios (Kuttner do Brasil).

1 INTRODUÇÃO

Recuperador de calor é um dispositivo especificamente projetado para aproveitar a energia residual, em forma de calor, contida nos gases quentes da exaustão de fornos, caldeiras, aquecedores, motores, turbinas, entre outros equipamentos térmicos. O reaproveitamento desta energia normalmente se dá através do aquecimento do ar, de combustíveis, da água, de fluidos térmicos, da geração de vapor ou da geração de frio através do processo de absorção. Desta forma, reintegra-se a energia recuperada ao processo produtivo, aumentando a eficiência global do mesmo.

A utilização da tecnologia Heat Pipe (Tubos de Calor) tende a ser cada vez mais empregada na recuperação de energia dos gases quentes de exaustão, para o pré-aquecimento do ar e dos gases combustíveis, posto que a mesma agrega uma série de vantagens, quando comparada com os trocadores de calor tradicionais. Com um design compacto, transferência de calor uniforme em toda a área de troca térmica, alto grau de vedação entre os fluidos quente e frio, o Heat Pipe é uma solução eficiente e operacionalmente segura nas mais diversas aplicações.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Resumo Técnico Teórico sobre Recuperação de Calor

2.1.1 Cálculo do Calor (Energia) Recuperável

Para se calcular a quantidade de energia recuperável através do aproveitamento do calor dos gases quentes da exaustão de um equipamento térmico, deve-se utilizar a expressão matemática abaixo:

$$Q = \dot{m} \times c_p (t_E - t_S) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- Q = quantidade de calor recuperável por unidade de tempo (potência térmica);
- \dot{m} = vazão mássica dos gases quentes;
- c_p = 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 no recuperador de calor.

2.1.2 Dimensionamento Básico de Recuperador

De forma geral, nos recuperadores utilizados nos diversos processos industriais, a transferência de calor se dá predominantemente através da condução e convecção. Desta forma, o seu dimensionamento básico é dado pelas expressões a seguir:

$$Q = U \times A \times DTML \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- Q = quantidade de calor trocado por unidade de tempo;
- 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 em paredes planas pode ser calculado conforme abaixo:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\square_1} + \frac{\Delta x}{K} + \frac{1}{\square_2}} \quad (\text{Equação 3})$$

Para um trocador de calor com feixe tubular, a fórmula básica para o cálculo do coeficiente global de calor é apresentada abaixo:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\square_i} + \frac{A \times \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi KL} + \frac{A_i}{A_e} \times \frac{1}{\square_e}} \quad (\text{Equação 4})$$

Somente com o caráter orientativo, abaixo é apresentado uma tabela com valores práticos dos coeficientes globais de transferência de calor, para algumas aplicações usuais:

Tabela 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 |

2.1.3 Cálculo do Fator de Correção (IF)

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.

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 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:

$$IF = \frac{1}{U_{SUJO}} - \frac{1}{U_{LIMPO}} \quad (\text{Equação 5})$$

2.1.4 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 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.

$$\dot{m} = \frac{Q - \text{perdas}}{PCI} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

- \dot{m} = quantidade de combustível por unidade de tempo;
- Q = quantidade de calor recuperável por unidade de tempo;
- PCI = poder calorífico inferior do combustível.

2.2 Estudo Técnico Resumido da Tecnologia Heat Pipe

2.2.1 Geral

Equipamento projetado para transferir calor de um fluido quente para um fluido frio através da evaporação e condensação 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.

2.2.2 Transferência de Calor

A transferência de calor para o fluido frio é uniforme ao longo do feixe tubular resultando na inexistência de “pontos quentes”, reduzindo o valor máximo da temperatura de filme, acarretando em uma operação mais eficiente e segura.

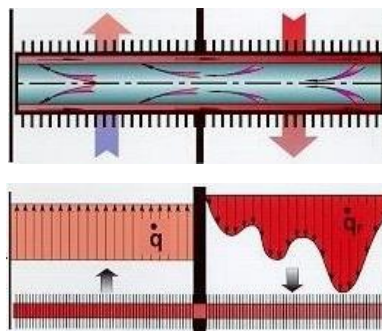


Figura 1. Diagrama simplificado de transferência de calor no Heat Pipe

2.2.3 Design – Fluxo de Massa e de Calor

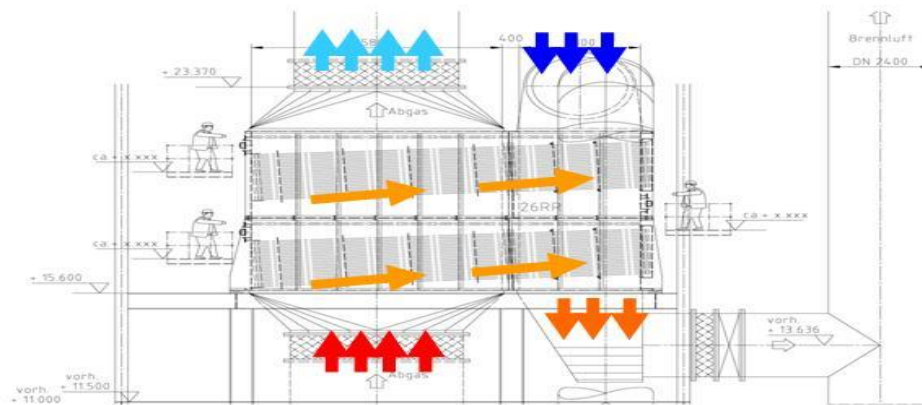


Figura 2. Desenho esquemático com fluxo de massa e calor

2.2.4 Flexibilidade Operacional do Feixe Tubular

Seu feixe tubular pode trabalhar tanto na posição horizontal quanto vertical, de forma a atender as necessidades específicas de cada instalação.

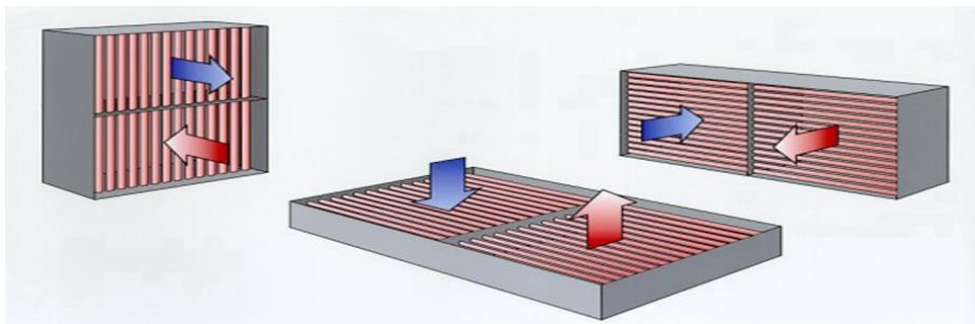


Figura 3. Posições de trabalho do feixe tubular

2.2.5 Aplicações

Equipamento adequado para pré-aquecimento de ar, gases combustíveis e outros fluidos, através da recuperação do calor dos gases de exaustão de processos térmicos.

Com uma ampla gama de aplicações, tem-se sistemas Heat Pipe operando na siderurgia, fundição, indústrias de vidro, cimento, química, em plantas de queima de resíduos, termoeletricas, etc.

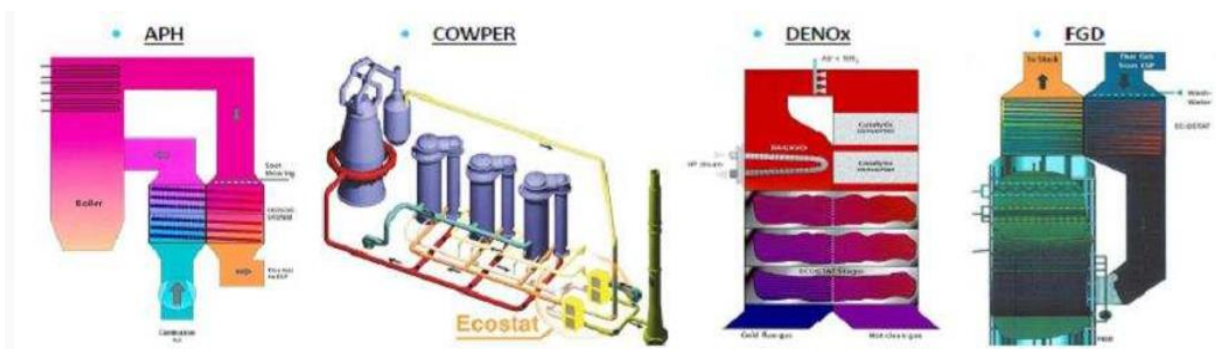


Figura 4. Exemplos de aplicações

2.2.6 Vantagens Técnicas e 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.

2.2.7 Fluidos de Trabalho e Temperaturas Críticas

Existe uma ampla gama de substâncias que podem ser utilizadas como fluido de trabalho, devendo 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.

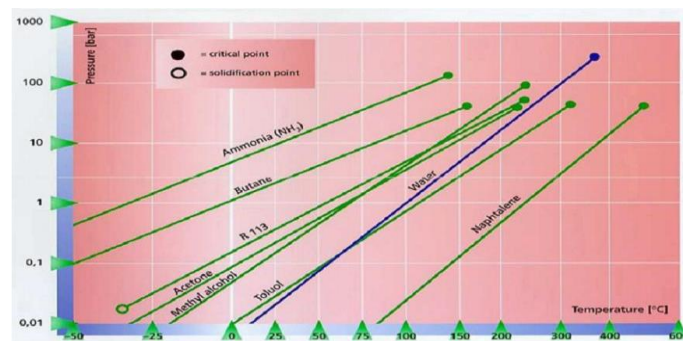


Figura 5. Fluidos de trabalho e temperaturas críticas

2.2.8 Características Construtivas



Figura 6. Exemplo de instalação

2.2.8.1 Sistema Modular



Figura 7. Sistema modular

2.2.8.2 Feixe Tubular de Fácil Montagem e Manutenção



Figura 8. Montagem do feixe tubular/espelho



Figura 9. Manutenção do feixe tubular

2.3 Recuperação de Calor – Pré-Aquecimento Ar e Gás – Alto Forno

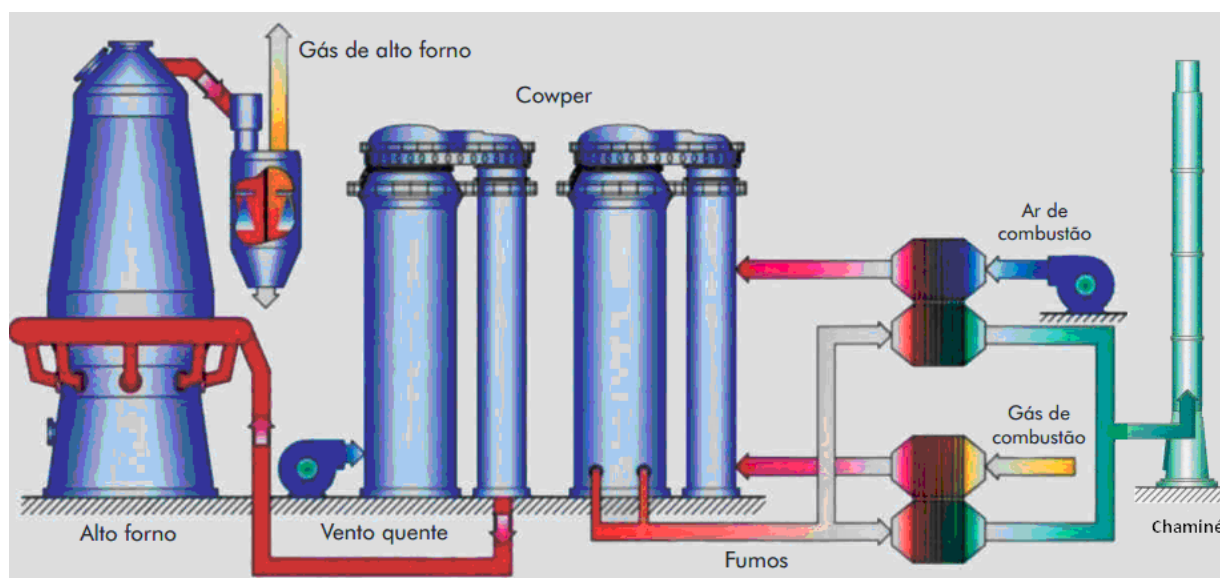


Figura 10. Desenho esquemático da aplicação do Heat Pipe

2.4 Recuperação de Calor – Pré-Aquecimento Ar – Forno Cubilô

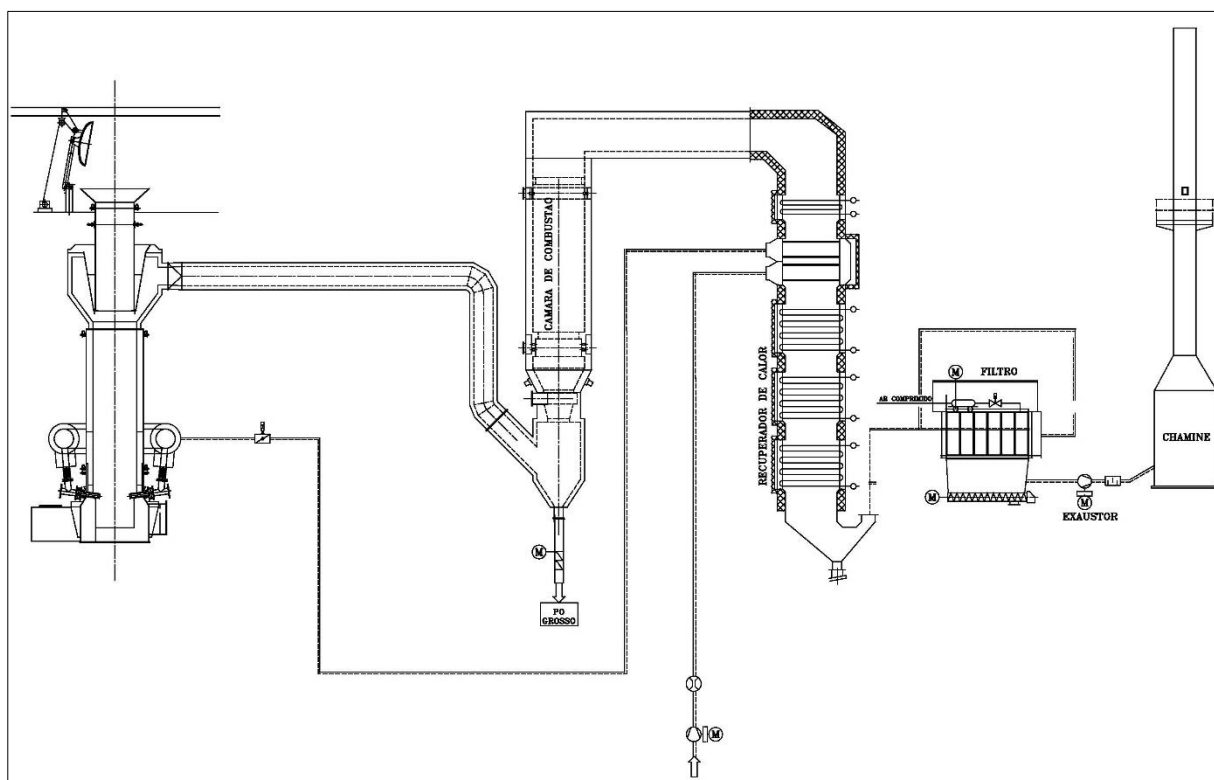


Figura 11. Fluxograma esquemático da aplicação do Heat Pipe

3 RESULTADOS

3.1 Estudo de Caso Real

3.1.1 Dados da Instalação Existente

- 1 Forno;
- Vazão dos gases de exaustão: 360.000 Nm³/h;
- Temperatura dos gases de exaustão: 315 °C;
- Vazão do ar de combustão: 160.000 Nm³/h.

3.1.2 Solução Adotada

Utilizar o calor dos gases de exaustão para pré-aquecimento do ar e do gás combustível, no intuito de aumentar a eficiência do forno e reduzir o consumo energético.

3.1.3 Dados da Instalação com a Implantação dos Recuperadores de Calor

3.1.3.1 Heat Pipe – Pré-Aquecedor de Gás

- Vazão dos gases de exaustão: 270.000 Nm³/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 Nm³/h;
- Temperatura do gás combustível na entrada do Heat Pipe: 35°C;
- Temperatura do gás combustível na saída do Heat Pipe: 220°C;
- Potência térmica aproximada: 21,2 MW.

3.1.3.2 Heat Pipe – Pré-Aquecedor de Ar

- Vazão dos gases de exaustão: 176.900 Nm³/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 Nm³/h;
- Temperatura do ar combustível na entrada do Heat Pipe: 30°C;
- Temperatura do ar combustível na saída do Heat Pipe: 220°C;
- Potência térmica aproximada: 13,7 MW.

3.1.4 Fluxograma Ilustrativo da Instalação Proposta

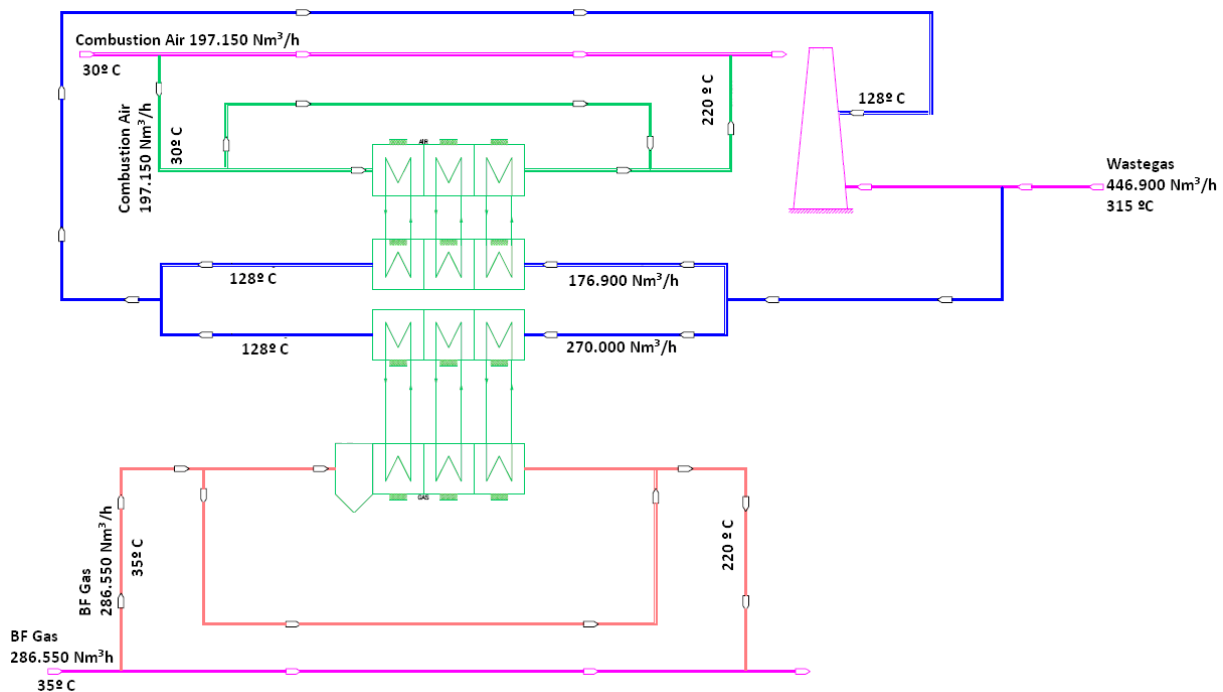


Figura 12. Fluxograma ilustrativo da instalação do Heat Pipe

4 DISCUSSÃO

Com o pré-aquecimento do ar e do gás combustível a 220 °C, tivemos uma recuperação energética da ordem de 34,9 MW e como consequência, uma redução no consumo de gás no forno.

5 CONCLUSÃO

O sistema Heat Pipe apresenta uma alta flexibilidade operacional, alta segurança, alta confiabilidade e disponibilidade, sendo um equipamento modular e de fácil manutenção. Através de uma análise técnica, com balanços térmico e de massa,

baseados em dados operacionais é possível se dimensionar e instalar sistemas de recuperação de calor tipo Heat Pipe eficientes e tecnicamente adequados, reduzindo os custos operacionais, aumentando a eficiência global do sistema, de forma a se obter um significativo ganho energético.

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 andr 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.
- 9 Barros Jr JLM, Patto RP, Gandra PVS. 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. RJ: 36º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 30º Encontro de Produtores de Gases Industriais, parte integrante da ABM Week, 2015.