

ROTEIRO ORIENTATIVO PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM ESTUDO BÁSICO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE SISTEMAS DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E/OU COGERAÇÃO*

Joaquim Luiz Monteiro de Barros¹
Fabiana Moreira Costa²

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar de forma didática, e com exemplos práticos, um roteiro orientativo para o desenvolvimento de um estudo básico de viabilidade técnica de sistemas de recuperação de energia térmica e/ou cogeração a fim de se obter resultados confiáveis que possam apoiar o processo decisório.

Palavras-chave: Recuperação de Calor; Energia Térmica; Cogeração.

GUIDE FOR DEVELOPING A BASIC TECHNICAL FEASIBILITY STUDY FOR THERMAL ENERGY RECOVERY AND/OR COGENERATION SYSTEMS

Abstract

The purpose of this paper is to present in a didactic way and with practical examples, a guide for developing a basic technical feasibility study for thermal energy recovery and cogeneration systems, in order to obtain reliable results that can support the decision-making process.

Keywords: Heat Recovery; Thermal Energy; Cogeneration.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestre em Economia com ênfase em energia, Pós-Graduado em Eficiência Energética, COO, Kuttner do Brasil, Contagem, MG, Brasil.

² Engenheira de Energia, Engenheira Eletricista PUC-MG, Analista de Projetos, Kuttner do Brasil, Contagem, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A utilização eficiente da energia é, e será cada vez mais, um objetivo das empresas em seus processos produtivos. Com isto, a implantação de Sistemas de Recuperação de Energia Térmica e/ou Cogeração com a aplicação de tecnologias adequadas, definidas através de estudos técnicos e econômicos, pode ser uma solução para a redução do consumo de energia ou aumento da disponibilidade da mesma e que garante o aumento da competitividade da planta produtiva como um todo.

Sistemas de Recuperação de Calor utilizam equipamentos especificamente projetados 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 fluido térmico, da geração de vapor ou da geração de frio (através do processo de absorção), reintegrando a energia recuperada ao processo produtivo.

Como cogeração, de forma simplificada, pode-se dizer que a produção simultânea e de forma sequenciada, de duas ou mais formas de energia a partir de um único *input* energético.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Um estudo básico deve ser o primeiro passo no intuito de se determinar a viabilidade técnica da implantação de um Sistema de Recuperação de Calor e/ou Cogeração. Desta forma, a seguir será apresentado de forma simplificada e didática um roteiro resumido que possa servir como uma orientação geral a ser seguido para as mais diversas aplicações. Com certeza, com poucas e pequenas alterações em virtude de possíveis especificidades de alguns sistemas especiais, esta metodologia poder ser utilizada para diversos estudos de casos.

2.1 Roteiro Orientativo para Estudo Técnico Básico de Implantação de Recuperação de Energia Térmica e/ou Cogeração

1ª Etapa:

a. Definição da área do estudo (volume de controle)

Exemplo: Área de utilidades, Fornos X e Y, Setor de tratamento térmico, etc;

b. Levantamento dos INPUTS e OUTPUTS energéticos

Exemplo:



Figura 1. Inputs e Outputs energéticos

c. Levantamento dos equipamentos / sistemas térmicos com seus dados operacionais;
Exemplo: Lista dos equipamentos / sistemas;
Folha de Dados dos equipamentos;

d. Levantamento e definição dos ciclos operacionais dos equipamentos / sistemas térmicos;

Exemplo: Gráficos potência e/ou consumo x tempo;

e. Consolidação das informações / dados levantados e/ou definidos em um relatório básico preliminar – 1ª Etapa

2ª Etapa:

a. Preparação de um fluxograma básico de processo com os processos térmicos existentes;

Exemplo:

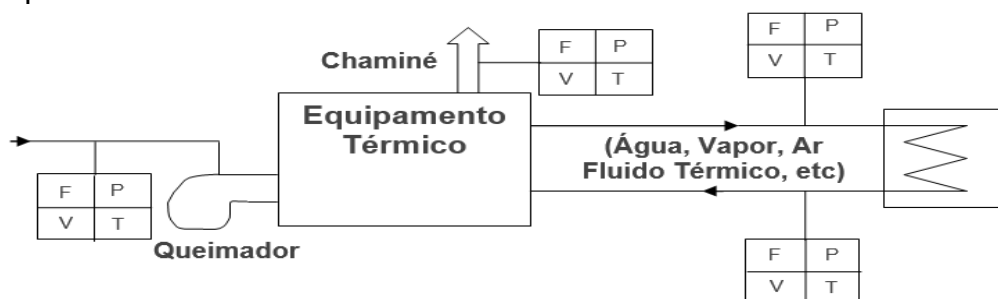


Figura 2. Fluxograma básico de processo

b. Preparação do(s) balanço(s) de massa e térmico da área de estudo e/ou seus subsistemas;

c. Estudo e análise das alternativas de aproveitamento de energia térmica, baseado nos dados obtidos e nas necessidades da planta industrial;

d. Definição da alternativa a ser adotada / estudada;

e. Consolidação das informações / dados levantados e das definições fixadas nesta etapa em um relatório básico preliminar – 2ª Etapa;

3ª Etapa:

a. Preparação de um fluxograma básico do(s) novo(s) processo(s) térmico(s) da área de estudo;

b. Preparação de um descritivo básico e resumido das modificações e alterações físicas e de processo;

c. Preparação de um descritivo básico dos novos equipamentos necessários para a implantação do projeto;

d. Preparação de um layout básico dos novos sistemas / equipamentos;

- e. Levantamento estimativo dos custos de modificação dos equipamentos / sistemas existentes;
- f. Levantamento estimativo do investimento necessário em novos equipamentos;
- g. Estudo básico de viabilidade econômica;
- h. Consolidação das informações, dados levantados, definições e conclusões fixadas neste estudo em um relatório final.

2.2 Cálculo Teórico do Calor (Energia) Recuperável

Para se calcular a quantidade de energia recuperável através do aproveitamento do calor dos gases quentes da exaustão de um forno, caldeira, motor, turbina ou outro equipamento térmico, utiliza-se a expressão matemática abaixo:

$$Q = \dot{m} \cdot cp \cdot (t_E - t_S)$$

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 no recuperador de calor.

2.3 Cálculo Aproximado da Economia de Combustível Obtida Através da Recuperação de Calor

Uma vez calculado a quantidade de calor recuperado no processo 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 com base na equação abaixo.

$$\dot{m} = \frac{Q - \text{perdas}}{PCI}$$

Onde:

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

Q = quantidade de calor recuperável;

PCI = poder calorífico inferior do combustível.

2.4 Dimensionamento Básico de Recuperador de Calor

O dimensionamento básico é dado pela expressão a seguir:

$$Q = U \cdot A \cdot DTML$$

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:

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

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

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

$$DTML = \frac{(T_{qs} - T_{fs}) - (T_{qe} - T_{fe})}{\ln \left[\frac{(T_{qs} - T_{fs})}{(T_{qe} - T_{fe})} \right]}$$

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:

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot DTML$$

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 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:

$$IF = \frac{1}{U_{SUJO}} - \frac{1}{U_{LIMPO}}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados resumos de estudos de 4 casos reais, no intuito de exemplificar a metodologia apresentada no item 2 deste trabalho.

3.1 Recuperação de Calor dos Gases de Exaustão dos Regeneradores do Alto Forno

O objetivo deste estudo foi a verificação da viabilidade técnica da instalação de recuperadores de calor para o aumento da 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.

3.1.1 Primeira e Segunda Etapas do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação Existente

- 1 Alto Forno;
- 4 Regeneradores (Cowpers);
- Gás combustível queimado nos regeneradores: gás misto (GOC + GAF);
- Vazão dos gases de exaustão dos regeneradores: 360.000 Nm³/h;
- Temperatura dos gases de exaustão dos regeneradores: 315 °C;
- Taxa de enriquecimento de GOC no GAF para atendimento da demanda térmica: 13.000 Nm³/h;
- Vazão do ar de combustão: 160.000 Nm³/h;
- Operação Contínua 24h/dia.

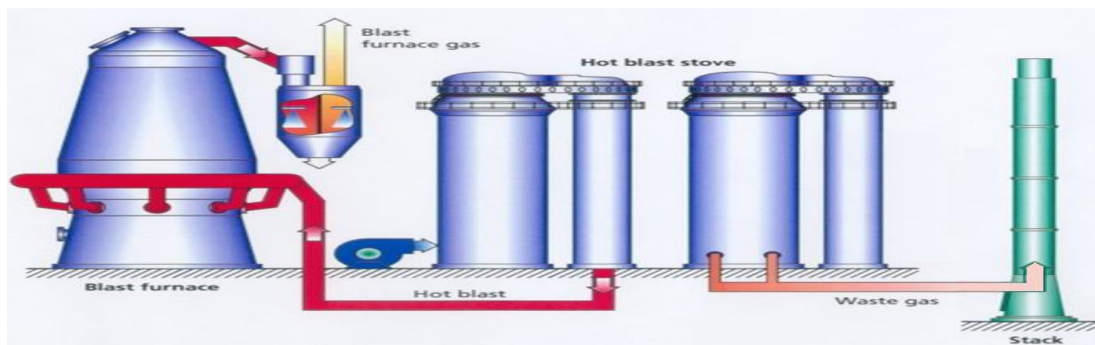


Figura 3. Área / Equipamentos do Estudo

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.

3.1.2 Terceira Etapa do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação com a Implantação dos Recuperadores de Calor

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;
- Performance aproximada: 21,2 MW.

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;
- Performance aproximada: 13,7 MW.

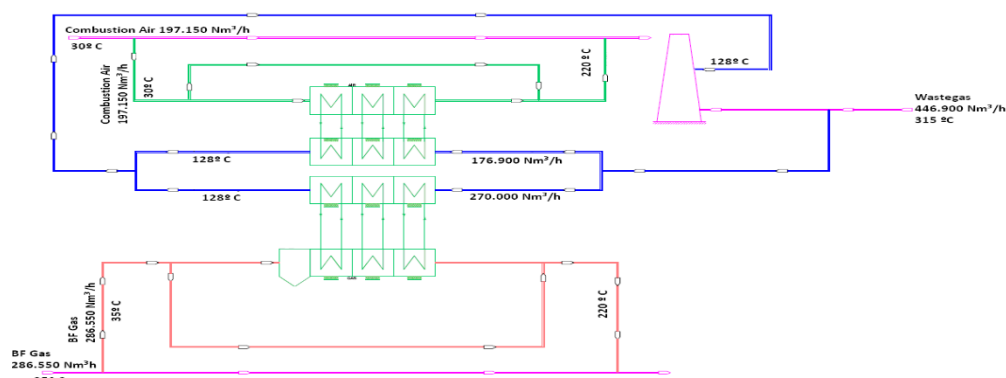


Figura 4. Fluxograma ilustrativo da Alternativa Adotada

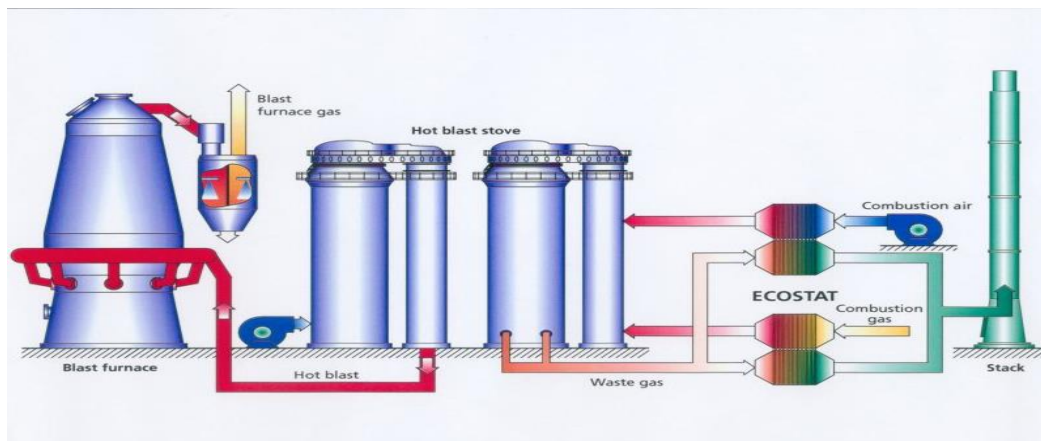


Figura 5. Ilustração da Alternativa Adotada

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.

3.2 Recuperação de Calor na Sinterização (Sinter Cooler)

O objetivo deste estudo foi a verificação da viabilidade técnica da utilização da energia térmica recuperável no sinter cooler para geração de vapor a ser utilizado no processo de produção de aço.

3.2.1 Primeira e Segunda Etapas do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação Existente

Tabela 3. GASES DE EXAUSTÃO DO SINTER COOLER	
Vazão	320.000 kg/h
Temperatura	350 °C
Particulados	10 mg/Nm ³

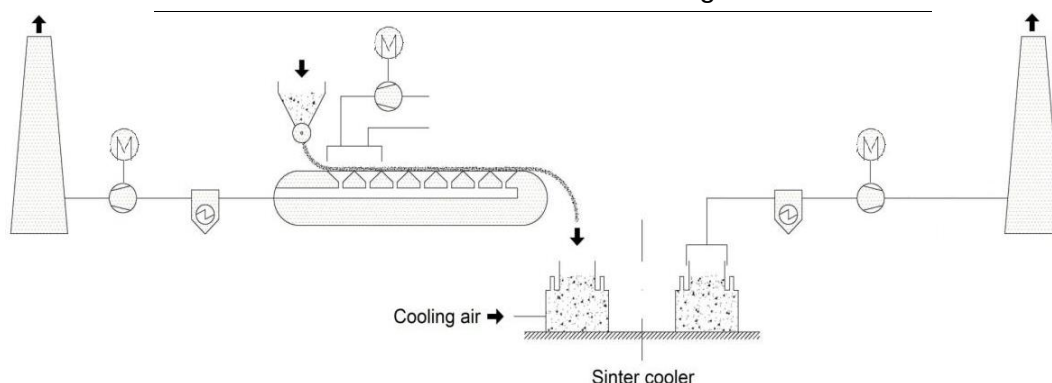


Figura 6. Área / Equipamentos do Estudo

Determinação da Aplicação da Energia Térmica Recuperável

Devido a necessidade interna do processo produtivo e após uma pesquisa das diversas alternativas foi definido que a geração de vapor seria a melhor aplicação para a energia térmica disponível, posto que a unidade estava iniciando o processo de compra de 1 caldeira com queima de gás natural para suprir tal necessidade.

3.2.2 Terceira Etapa do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação com a Implantação do Recuperador de Calor (Gerador de Vapor)

Tabela 4. GERADOR DE VAPOR RECUPERATIVO	
Vazão dos gases de exaustão	320.000 kg/h
Temperatura de entrada dos gases	350 °C
Temperatura de saída dos gases	169 °C
Capacidade térmica aproximada	16,7 MW
Vazão de vapor gerado	24,3 t/h
Pressão do vapor gerado	12 bar
Temperatura do vapor gerado	250 °C

3.2.3 Fluxograma Orientativo

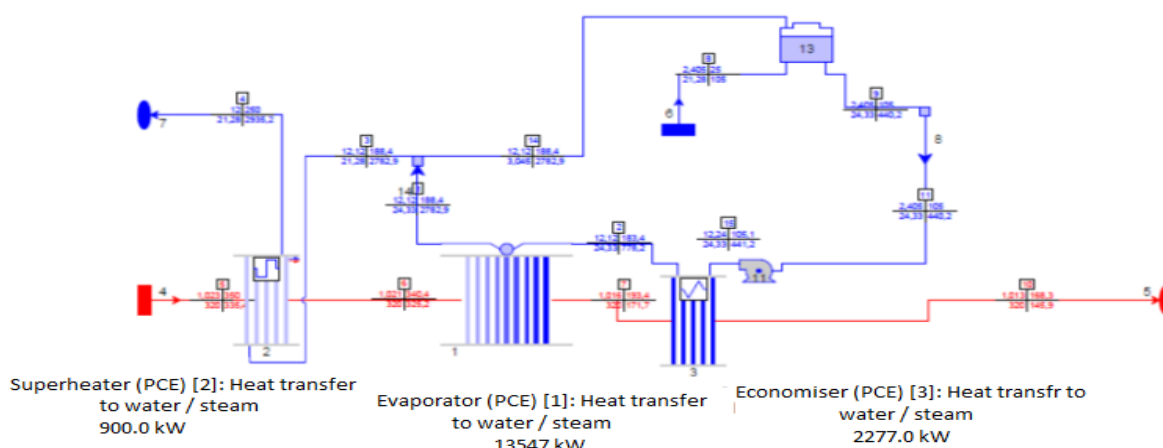


Figura 7. Fluxograma da Alternativa Adotada

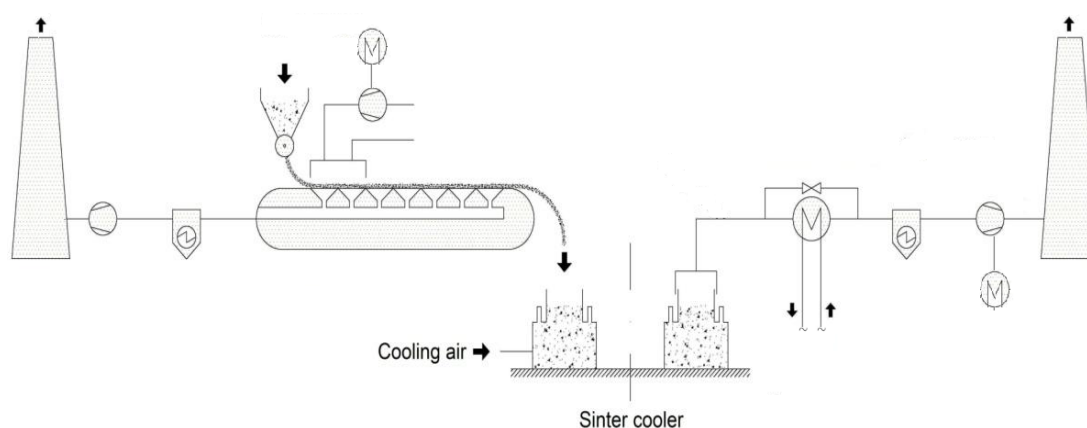


Figura 8. Ilustração da Alternativa Adotada

3.3 Recuperação de Calor no Forno de Forjamento

O objetivo deste estudo foi a verificação da viabilidade técnica da instalação de um recuperador de calor para o aumento da eficiência energética do Forno de Forjamento no intuito de reduzir o consumo de gás natural.

3.3.1 Primeira e Segunda Etapas do Roteiro de Dados da Instalação Existente

- Potência bruta do Forno: 10.000 kW
- Combustível: Gás Natural
- Consumo de Gás Natural: 1.000 Nm³/h
- Vazão do Ar de Combustão: 10.000 Nm³/h
- Temperatura do Ar de Combustão: 20 °C
- Vazão dos gases de Combustão: 65.000 m³/h
- Temperatura dos gases de Combustão: 810 °C
- Pressão dos gases de Combustão: 0,5mbar

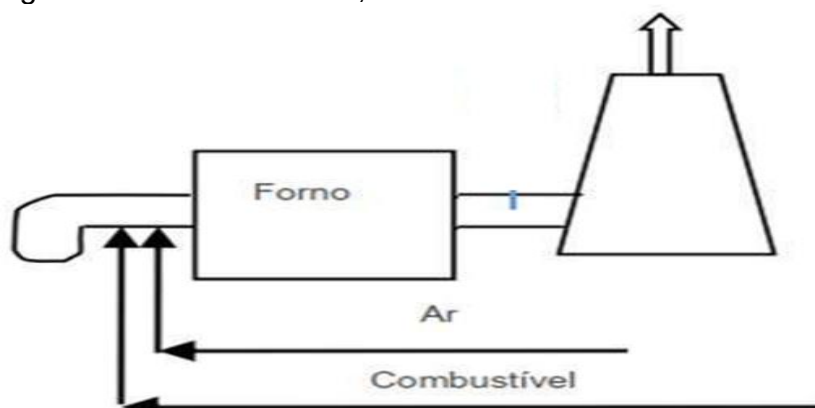


Figura 9. Ilustração da Instalação Existente

Solução Adotada

Instalação de um Pré-Aquecedor do Ar de Combustão Instalada na saída dos gases combustos do Forno de Forjamento.

3.3.2 Terceira Etapa do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação com a implantação do Pré-Aquecedor de Ar de Combustão.

- Gases de Combustão
 - Vazão: 65.000 m³/h;
 - Temperatura na entrada do Pré-Aquecedor de Ar 810 °C;
 - Temperatura na saída do Pré-Aquecedor de 622 °C.
- Ar de Combustão
 - Vazão: 10.000 m³/h;
 - Temperatura na entrada do Pré-Aquecedor: 20 °C;
 - Temperatura na saída do Pré-Aquecedor: 400 °C.
- Gás Natural
 - Economia de Gás Natural prevista: 121 Nm³/h.

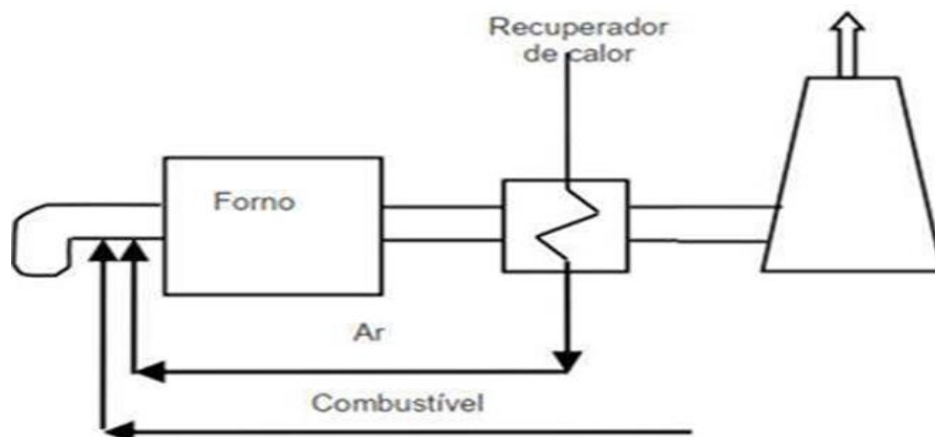


Figura 10. Ilustração da Instalação com Pré-Aquecedor de Ar de Combustão

3.4 Cogeração com Turbina TRT

O objetivo deste estudo foi a verificação da viabilidade técnica da instalação de uma turbina de recuperação de gás do topo do Alto Forno – TRT. Sabendo-se que esta é uma turbina de expansão que ao ser acoplada a um gerador, transforma a energia de pressão e cinética dos gases do Alto Forno em energia elétrica.

A TRT normalmente, é instalada após o sistema de limpeza do gás do Alto Forno e não requer nenhum combustível adicional em sua operação.

3.4.1 Primeira e Segunda Etapas do Roteiro Orientativo

Dados da Instalação Existente

- Vazão dos gases no topo do AF: 870.000 Nm³/h
- Pressão dos gases no topo do AF: 2,35 °C
- Temperatura normal de trabalho dos gases: 65 °C
- Temperatura máxima operacional: 100 °C

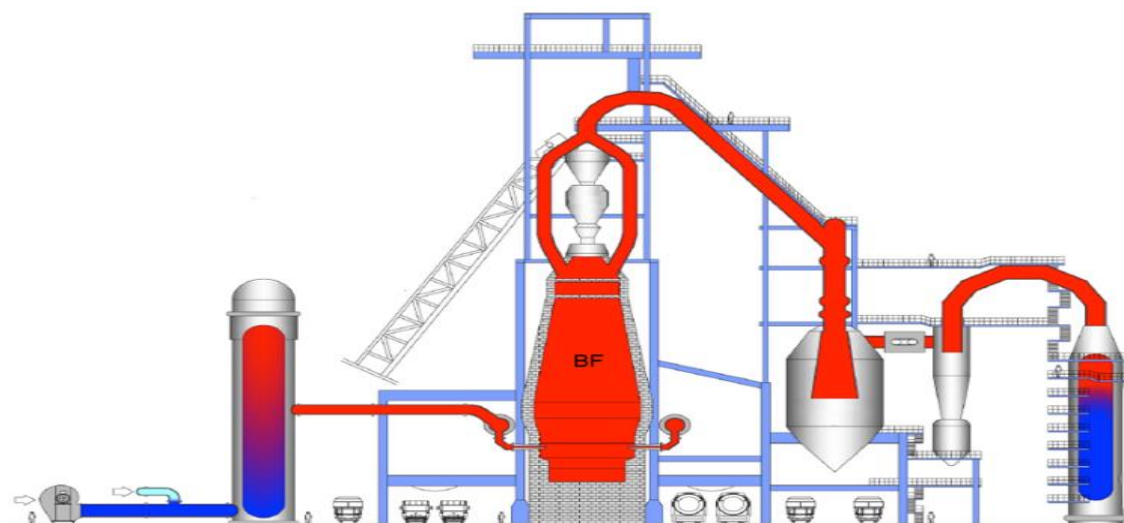


Figura 11. Desenho Esquemático da Instalação Existente

3.4.2 Terceira Etapa do Roteiro Orientativo

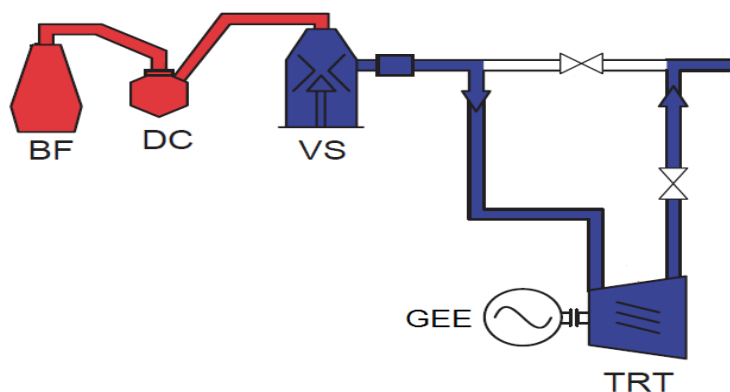


Figura 12. Fluxograma Esquemático da Instalação da TRT.

Onde:

- BF: Alto Forno;
- DC: Coletor de pó;
- VS: Coletor de pó tipo úmido;
- TRT: Turbina de recuperação de pressão de topo;
- GEE: Gerador de energia elétrica.

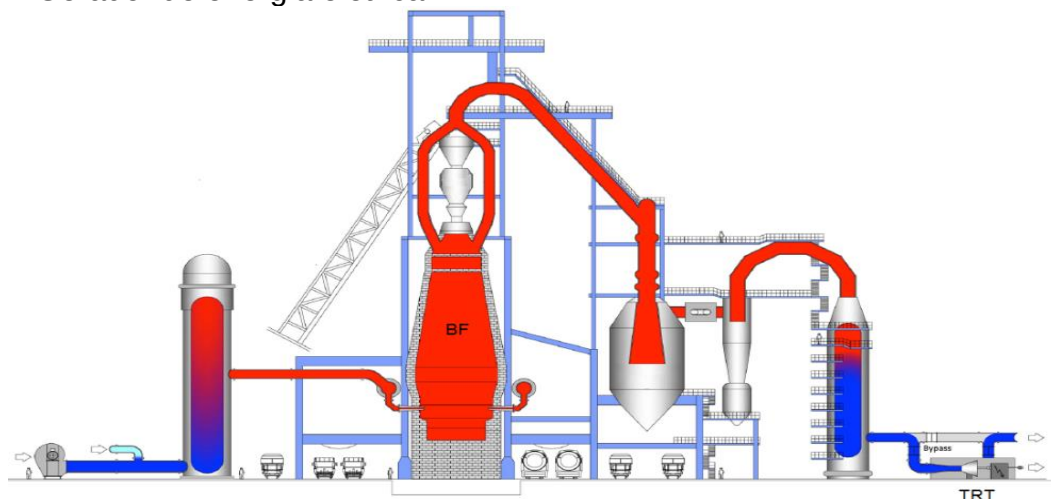


Figura 13. Desenho Esquemático da Instalação da TRT.

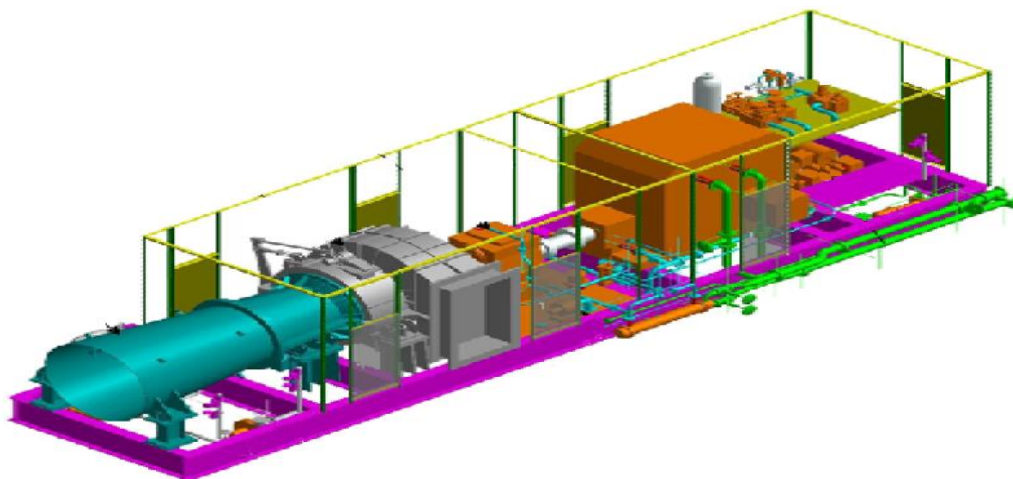


Figura 14. Desenho Esquemático do Conjunto TRT.

Dados da Capacidade de Geração de Energia Elétrica**Tabela 5. DADOS DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE EE**

Itens	Unidade	Valor
Potência	MW	24,00
Garantia Física	MWmed	18,26
GF Ajustada (CG)	MWmed	17,80
Fator Capacidade Máx	%	83
Fator Disponibilidade	%	76,10
Perdas Transmissão	%	2,50

Com base nos dados acima, a instalação de TRT terá disponibilidade máxima de geração bruta de 160.000MWh/ano.

Como disponibilidade de energia exportável, já considerando as perdas de transmissão, tem-se 156.000 MWh/ano como energia vendável.

4 CONCLUSÃO

Um estudo básico de viabilidade técnica para implantação de sistemas de recuperação de energia térmica e/ou cogeração executado corretamente pode ser um decisivo fator para uma correta decisão de investimento em projetos de eficiência energética. Cabendo destacar que o nível de desembolso necessário baixo, quando comparado com o investimento total do projeto e que através de uma análise técnica, com balanços térmicos e de massa, baseados em dados operacionais é possível se dimensionar sistemas eficientes e tecnicamente adequados, reduzindo os custos operacionais, aumentando a eficiência global, de forma a se obter um significativo ganho energético.

REFERÊNCIAS

- 1 Barros Jr, Patto R, Gandra PVS. Aumento da Eficiência com Pré-Aquecimento do Ar e do gás através da Recuperação do Calor dos gases de Exaustão dos Regeneradores do Alto Forno. 43º Seminário de Balanços de Energéticos ABM.2015
- 2 Barros Jr, JLM, Costa FM. Recuperação de Calor na Sintetização: Uma Alternativa Viável para Geração de Energia Térmica e Aumento de Eficiência Global da Planta. 37º Seminário de Balanços Energéticos.2016
- 3 Barros Jr JLM, Costa FM. Turbina de Recuperação de Gás de Topo-TRT: Uma Alternativa Viável para Geração de Energia Elétrica em Plantas Siderúrgicas.38ºSeminário de Balanços Energéticos ABM 2017.
- 4 Barros Jr JLM, Cogeração e Produção Combinada de Calor e Energia.EUREM-RJ 2024.
- 5 Wagner W. Heat Transfer Technique With Organic Media 2º Edição. Germany: Verlag DR Ingo Resch GMBH,1997.
- 6 Incropera FP, Dewitt DP. Fundamentals Of Heat Transfer. New York: John Wiley Sons, 1981.