

IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA EM FORNO CADINHO DE FUSÃO DE ZINCO OPERANDO COM GÁS NATURAL¹

Renato Vergnhanini Filho²
Luiz Spegiorin³

Resumo

Na área de concessão da Comgás, várias empresas relativamente pequenas produzem óxido de zinco através de processo industrial no qual o gás natural (GN) é o insumo energético principal. A parte principal do processo é aquela em que lingotes de zinco são fundidos em forno do tipo cadinho. Os gases de combustão efluentes do forno são descarregados sem qualquer recuperação de energia na atmosfera por meio de uma chaminé. Algumas possibilidades para a recuperação dessa energia não aproveitada podem ser vislumbradas, mas a principal delas é o preaquecimento do ar de combustão. A equipe do Laboratório de Energia Térmica, Motores, Combustíveis e Emissões (LETMCE) do IPT, com recursos da Comgás, dentro do "Programa Anual de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico e de Conservação e Racionalização do Uso do Gás em São Paulo", implantou sistema de preaquecimento do ar de combustão do forno 3 da empresa Brazinco visando à redução do consumo de gás natural. O sistema de preaquecimento teve um custo de R\$ 112.000,00 e resultou na temperatura de 370 °C do ar admitido ao forno, o que levou a redução de 28% no consumo de gás natural, que representa economia de R\$ 5.800,00 / mês para a empresa.

Palavras-chave: Forno de fusão de zinco; Eficiência energética; Gás natural.

IMPLEMENTATION OF ENERGY RECOVERY SYSTEM IN CRUCIBLE FURNACE MELTING OF ZINC OPERATING WITH NATURAL GAS

Abstract

In the concession area Comgás, many relatively small companies produce zinc oxide through an industrial process in which natural gas (NG) is the main source of energy. The main part of the process is one in which zinc ingots are melted in a furnace-type crucible. The effluent gases from the furnace are discharged without any energy recovery into the atmosphere through a chimney. Some possibilities for the recovery of this non-utilized energy can be envisioned, but the main one is to preheat combustion air. The team of the Laboratory of Thermal Energy, Engines, Fuel and Emissions (LETMCE) of IPT, with resources of Comgás within the "Annual Program for Research and Technological Development and Conservation and Rational Use of Gas in Sao Paulo," deployed system preheat combustion air furnace 3 of Brazinco company aiming to reduce consumption of natural gas. The preheating system at a cost of R\$ 112,000.00 and resulted in the temperature of 370 °C air admitted to the furnace, which led to 28% reduction in natural gas consumption, which represents savings of R\$ 5,800.00 / month for the company.

Keywords: Zinc smelting furnace; Energy efficiency; Natural gas.

¹ *Contribuição técnica ao 34º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.*

² *Engenheiro Químico, pesquisador, IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.*

³ *Engenheiro Mecânico, consultor técnico, COMGÁS - Companhia de Gás de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A empresa Brazinco possui três fornos semelhantes de produção de óxido de zinco. No processo, o zinco metálico é introduzido em lingotes no cadinho de grafite, que é circundado por gases de combustão gerados na queima de gás natural, que transferem o calor necessário à fusão dos lingotes. Depois de circular pelo canal anular formado externamente pelo refratário do forno e, internamente, pela parede externa do cadinho, os gases de combustão se dirigem à chaminé à temperatura elevada. O objetivo deste trabalho foi projetar, construir, instalar e testar um trocador de calor para o aproveitamento da entalpia desses gases no preaquecimento do ar de combustão.

2 LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS TÍPICAS DOS FORNOS

Para o dimensionamento do trocador de calor, foi realizado levantamento experimental no forno 3 da Brazinco (Figura 1), com duração aproximada de 48 horas, correspondente a quatro ciclos de operação com 6 horas de duração cada. No ensaio, além da carga de zinco do forno, foram medidas, a cada 30 minutos, as seguintes variáveis: consumo totalizado de gás natural; teor de oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) e temperatura dos gases na saída da câmara de combustão e na chaminé, e pressão efetiva da câmara de combustão, na posição de saída dos gases.

A Figura 2 apresenta os teores medidos de O_2 e CO_2 , bem como o excesso de ar de combustão, calculado tanto pelo teor de O_2 dos gases como pelo de CO_2 . Os excessos de ar obtidos das duas maneiras não coincidem precisamente, mas existe uma correspondência entre eles. O instrumento utilizado é mais preciso para a análise do teor de O_2 e foi utilizado como referência. Pode-se observar que o excesso de ar médio é de aproximadamente 10%.

A Figura 3 apresenta a vazão medida de gás natural. O consumo total de gás em 48 horas foi de $761,8 \text{ m}^3$ (m^3 tal qual medido no medidor), correspondendo a uma vazão média volumétrica de $15,87 \text{ m}^3/\text{h}$.



Figura 1. Forno 3 da Brazinco.

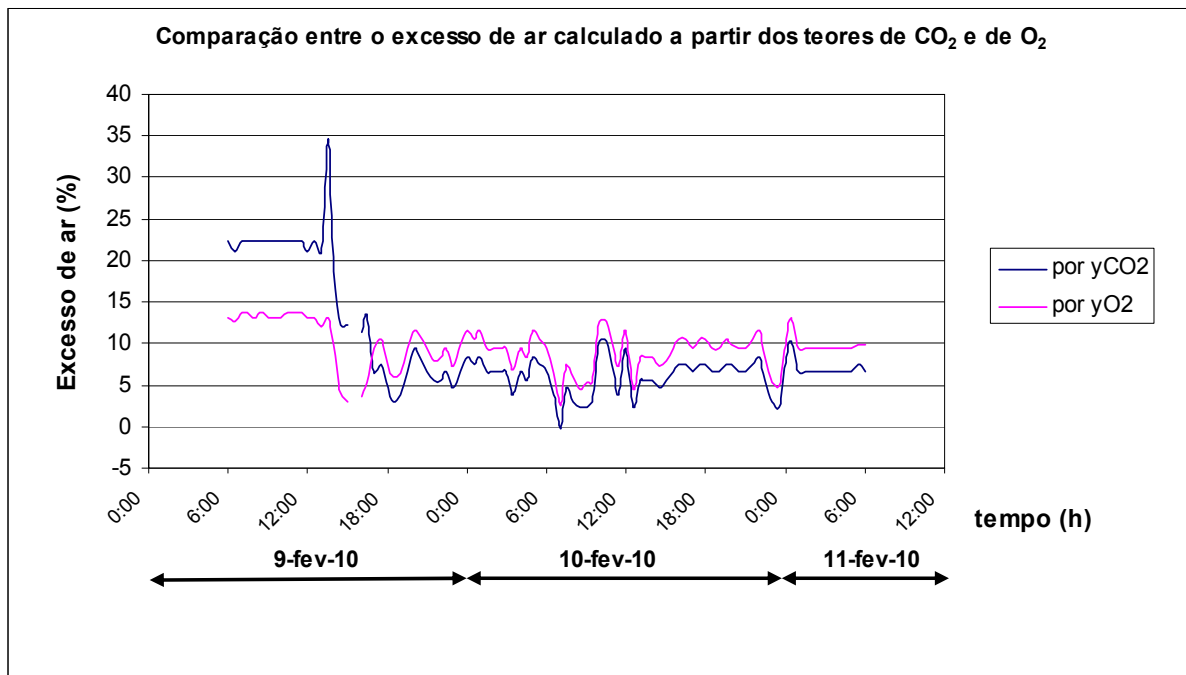


Figura 2. Teores de O_2 e CO_2 medidos e excessos de ar calculados.

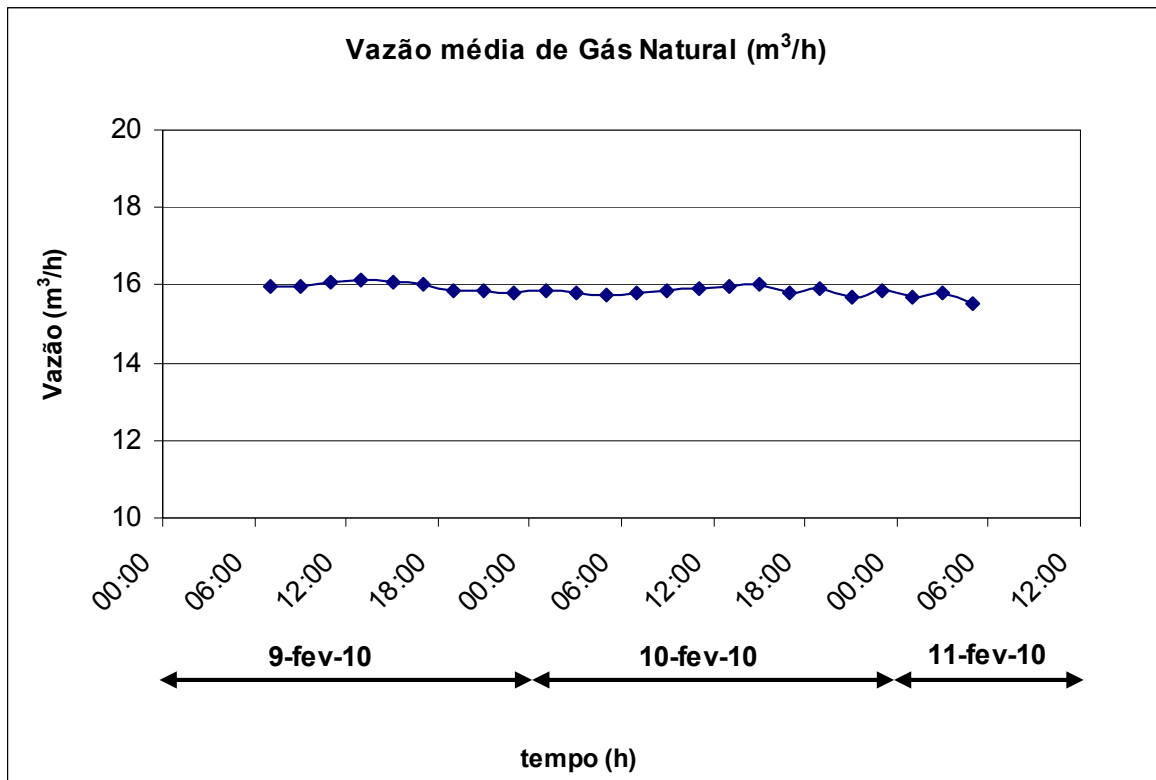


Figura 3. Vazão de gás natural.

A Figura 4 apresenta as temperaturas medidas dos gases de combustão; média de 1089 e 436 °C na saída do forno e na chaminé, respectivamente.

A carga total de zinco foi de 3.550 kg, distribuída ao longo do ensaio, o que representa uma média aproximada de 74 kg/h e a pressão da câmara de combustão oscilou entre 4 e 10 mm.c.a.

Portanto, no processamento de 3.550 kg de zinco foram consumidos 761,8 m³ de gás natural, indicando um consumo específico de 0,215 m³ de gás por kg de zinco.

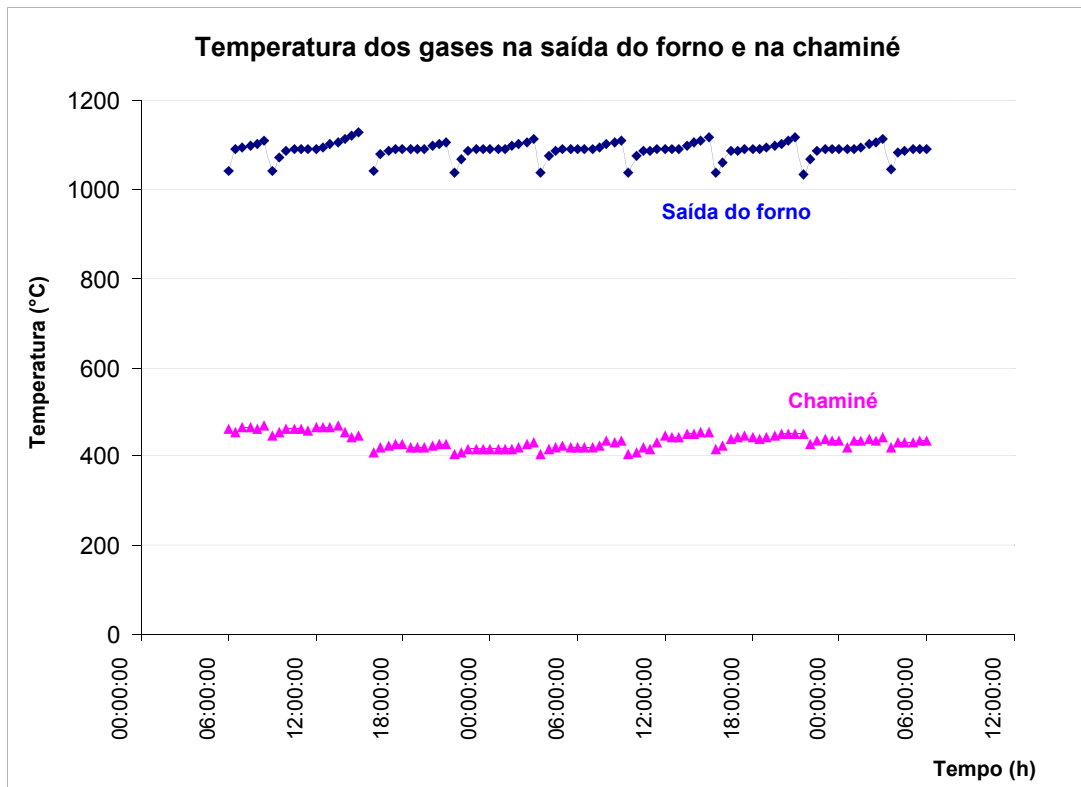


Figura 4. Temperatura dos gases de combustão na saída do forno e na chaminé.

3 CÁLCULO DA REDUÇÃO ESPERADA DO CONSUMO DE GÁS NATURAL COM O PREAQUECIMENTO DO AR DE COMBUSTÃO

O preaquecimento do ar de combustão pode propiciar significativa redução do consumo de combustível. A equação abaixo apresenta o balanço de energia do forno cadinho:

$$\underbrace{\dot{E}_{gn} + \dot{E}_{ar}}_{\text{Entradas de energia}} = \underbrace{\dot{E}_{gases} + \dot{Q}_{util} + \dot{Q}_{perdas}}_{\text{Saídas de energia}}$$

onde:

- \dot{E}_{gn} potência térmica provida pela queima de gás natural;
- \dot{E}_{ar} potência térmica provida pela energia interna do ar de combustão;
- \dot{E}_{gases} fluxo energético correspondente à energia interna dos gases de combustão à saída do forno;
- \dot{Q}_{util} taxa de calor transferido à carga do forno e
- \dot{Q}_{perdas} taxa de calor transferido ao ambiente pelas paredes do forno (“perdas”).

O emprego da equação acima com os dados obtidos no levantamento experimental, permite avaliar a influência da temperatura do ar de combustão sobre o consumo de gás natural. A Figura 5 apresenta os resultados dos cálculos efetuados para várias temperaturas de preaquecimento do ar. Para a temperatura de 800 °C, a redução do consumo de gás natural é de cerca de 43%. Não obstante, foi feita uma consulta ao fabricante do queimador (Rayburners Sistemas de Combustão), que sugeriu a

temperatura máxima de 500 °C, por restrições relacionadas aos materiais utilizados no modelo de queimador disponível. Nesse caso, a redução de consumo estimada é de cerca de 32%.

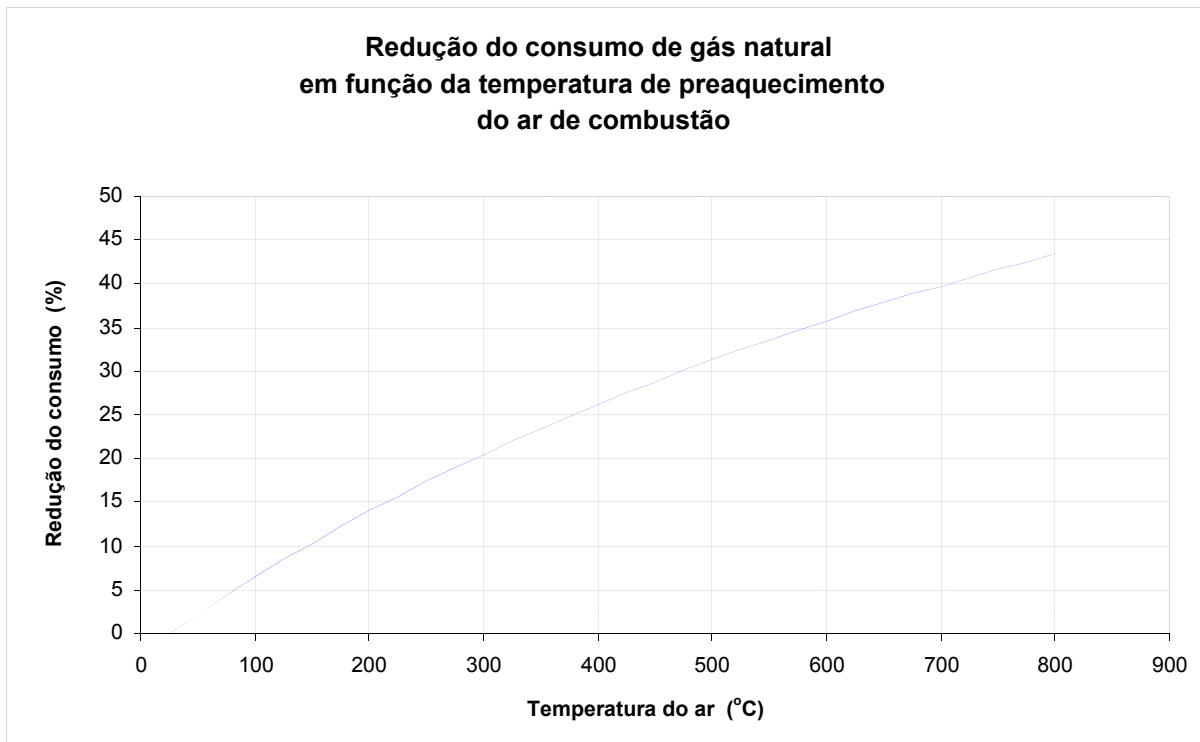


Figura 5. Redução de consumo de gás natural em função da temperatura de preaquecimento do ar de combustão.

4 ESCOLHA DO PRAQUECEDOR DE AR

O preaquecedor de ar escolhido inicialmente foi o do tipo de transferência de calor por radiação, com as correntes fluidas em fluxo paralelo. O trocador de calor de radiação é basicamente constituído por dois tubos concêntricos. Pelo tubo central circulam os gases de combustão e pelo espaço formado entre os dois tubos, o ar de combustão.

Foi elaborado modelo matemático para o dimensionamento do trocador; as dimensões principais são as seguintes: comprimento do trocador = 6 m; diâmetro nominal do tubo interno de passagem dos gases = 12"; vão de passagem (área anular) da camisa de ar = 8 mm e espessura de isolamento do trocador = 3".

Na Figura 6, desenho esquemático do trocador concebido pelo IPT.

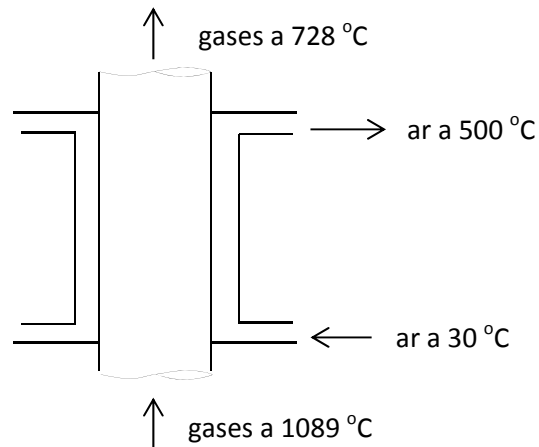


Figura 6. Desenho esquemático do trocador de calor do tipo de radiação concebido pelo IPT.

Na consulta às empresas para o fornecimento do equipamento, os critérios preço e tipo de trocador de calor, levaram a escolha de um tipo diferente do projetado. O trocador de calor escolhido, ofertado pela empresa Rayburners, é do tipo de convecção de duplo tubo aletado. O tubo é formado por anéis que são justapostos para obtenção da área de transferência de calor desejada. Essa configuração pode ser considerada inovadora, pois permite que o desempenho do equipamento seja aumentado com relativa facilidade pela inserção de anéis adicionais. O trocador que havia sido projetado pelo IPT, do tipo de transferência de calor por radiação, não possui tal característica.

A Rayburners utilizou parâmetros não divulgados para dimensionamento do trocador de calor; no entanto, a empresa garantiu a mesma performance que a do equipamento concebido pelo IPT. A Figura 7 mostra desenho esquemático do trocador de calor fornecido pela Rayburners.

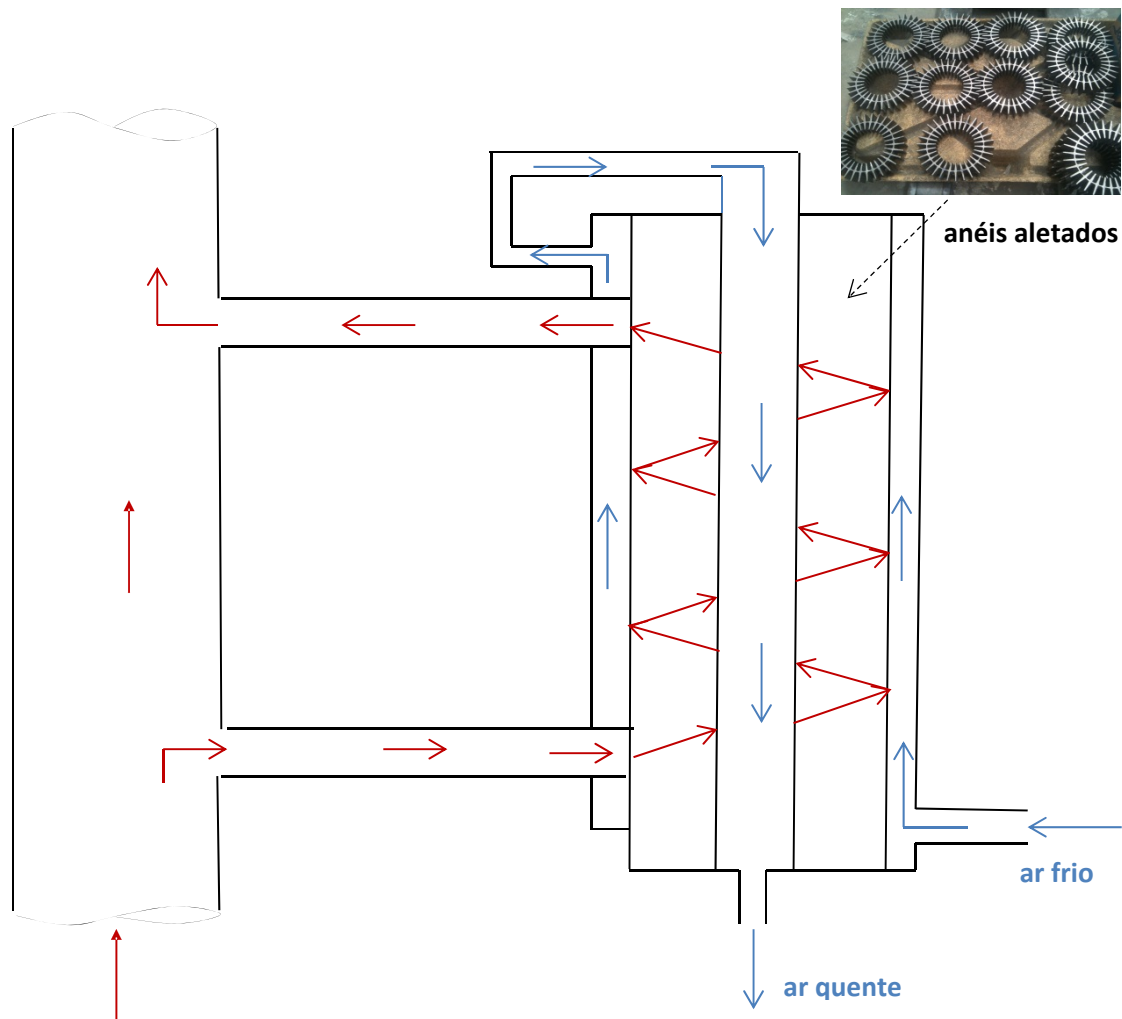


Figura 7. Desenho esquemático do trocador de calor fornecido pela Rayburners.

5 LEVANTAMENTO EXPERIMENTAL PARA VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO FORNO 3 COM O PRAQUECEDOR DE AR INSTALADO

Foram realizadas medições no forno 3 na Brazinco (Figura 8) para a verificação da redução obtida no consumo de gás natural devido ao preaquecimento do ar de combustão. Uma sonda de amostragem, refrigerada a água, foi instalada na chaminé da fornalha. Os gases seguem da sonda para o Laboratório Móvel do IPT (Figura 9), onde estão montados sistemas de: sucção e condicionamento de amostra; análise contínua de gases (O_2 , CO_2 , NO e CO) e sistema de aquisição e visualização de dados (Figura 10), que recebia sinais elétricos dos analisadores e do painel de controle do forno (um conjunto de fios foi estendido ligando o painel ao Laboratório), permitindo o registro e acompanhamento das temperaturas de entrada e saída dos gases do trocador ("T2" e "T1"), de saída do ar do trocador ("T3") e do interior da fornalha ("T4"). Foram registrados, manualmente: o volume de gás natural alimentado ao forno e a quantidade de zinco processada.

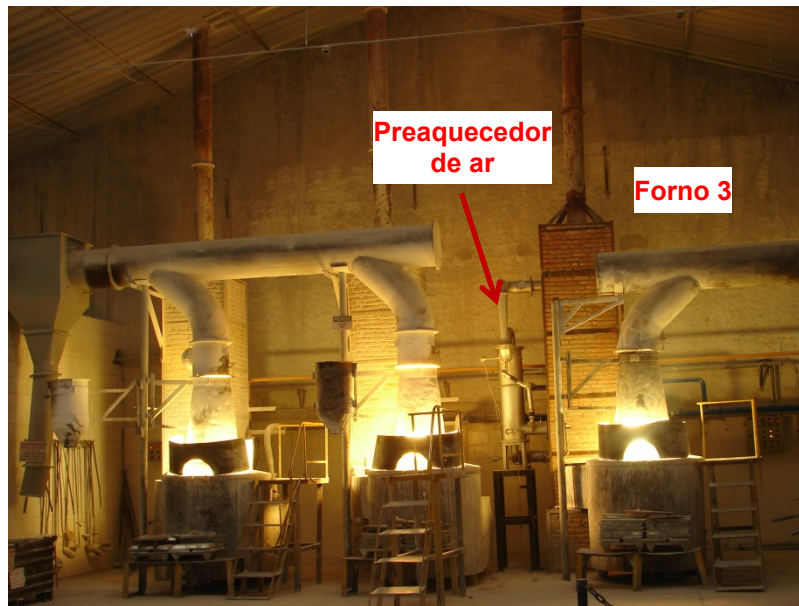


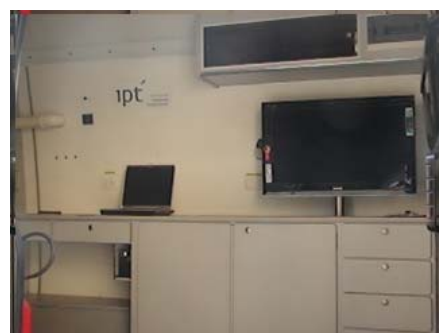
Figura 8. Forno 3 da Brazinco com o preaquecedor de ar instalado.



a



b



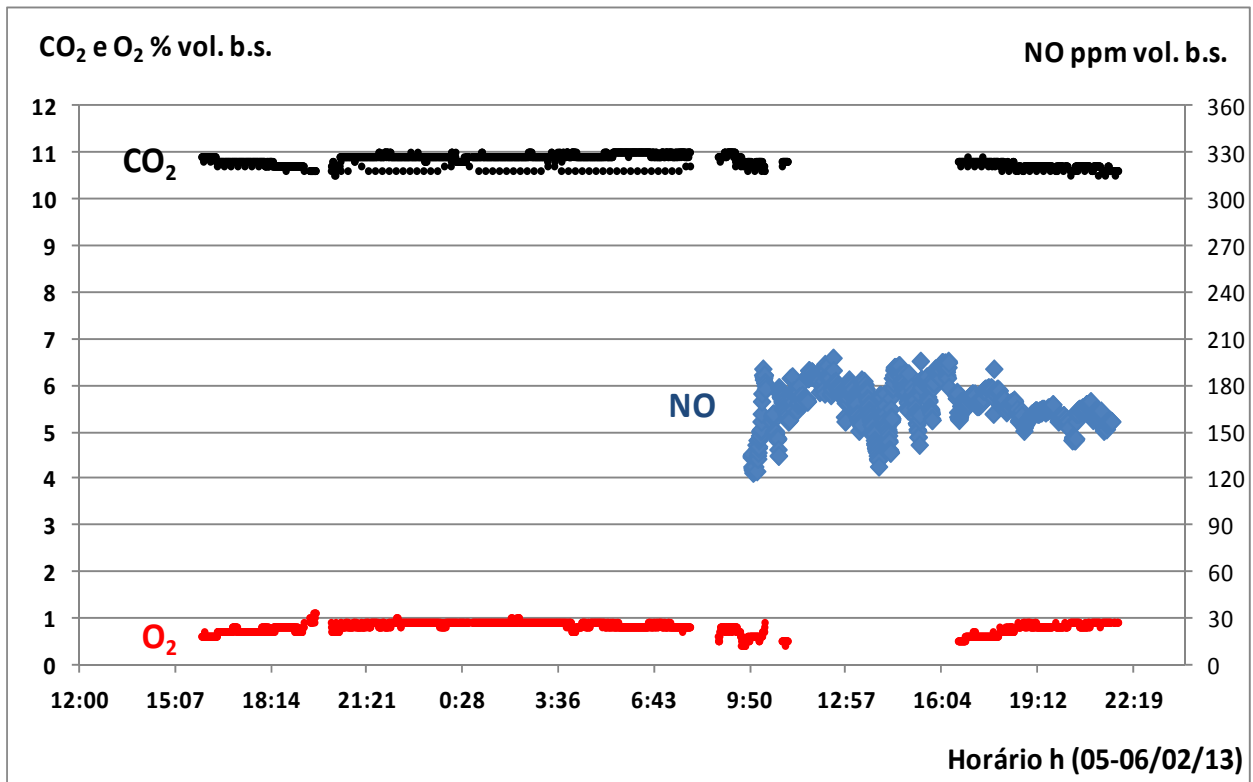
c

Figura 9. Laboratório Móvel do IPT: a - Laboratório Móvel na Brazinco; b e c - Interior do Laboratório Móvel.



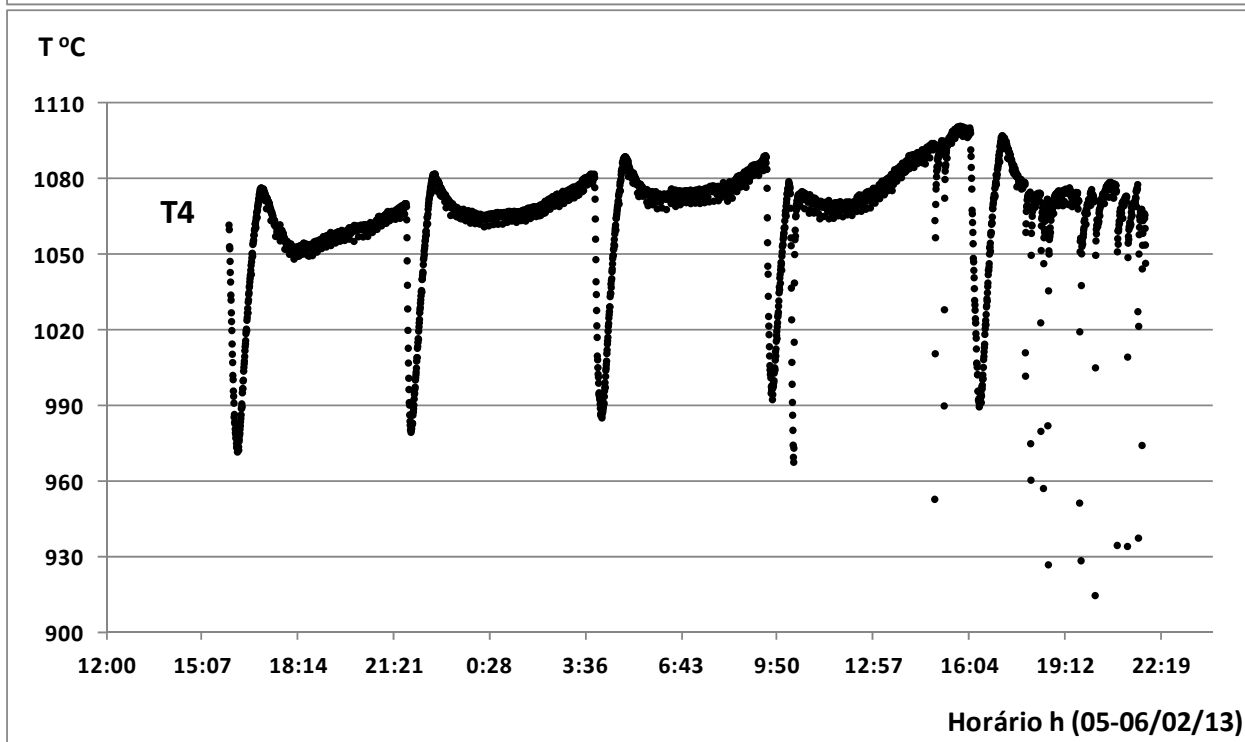
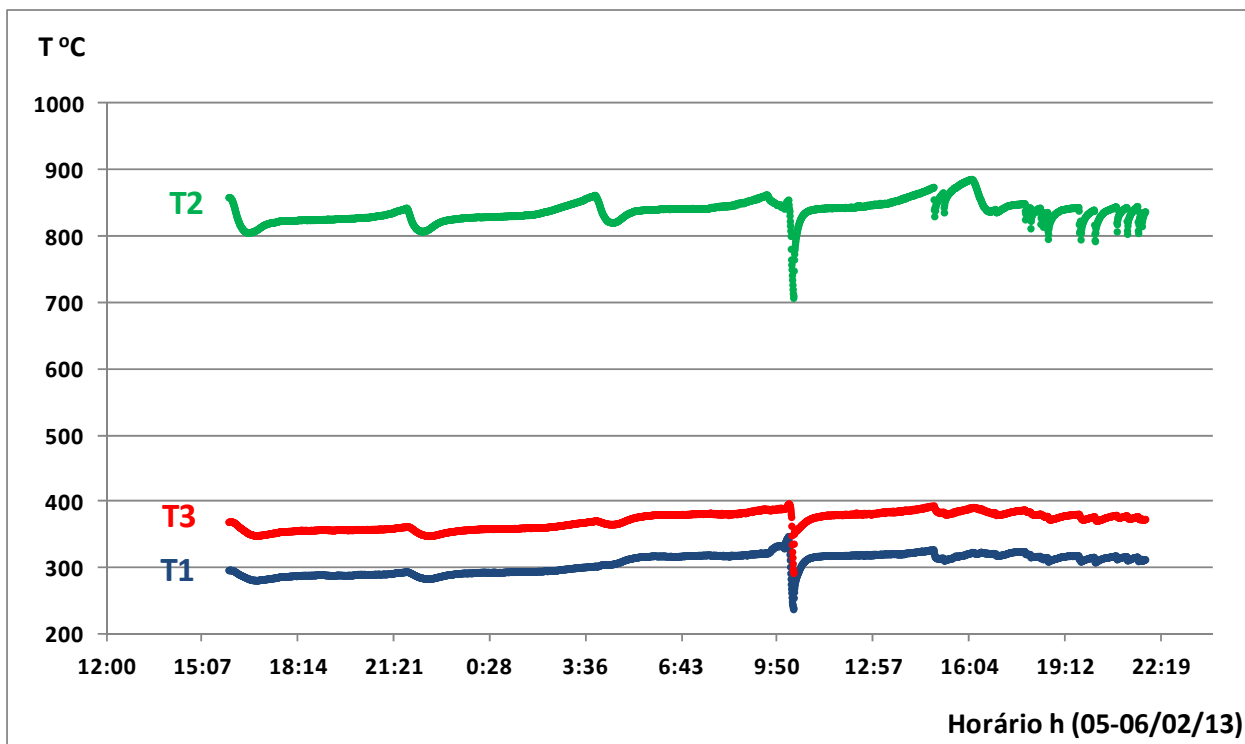
Figura 10. Tela de visualização de dados.

Antes do ensaio propriamente, buscou-se ajustar a relação ar - gás natural do forno de forma a se obter o menor teor de O_2 dos gases (ou seja, menor excesso de ar) sem a presença de CO, que é um indicativo da qualidade da combustão. O ensaio teve a duração aproximada de 30 horas (cinco ciclos de operação do forno). Nas Figuras 11 e 12 são apresentados, respectivamente, os valores medidos de composição e de temperaturas dos gases.



CO_2 – teor de CO_2 dos gases - média: 10,8%; NO – teor de NO dos gases - média: 169 ppm; O_2 – teor de O_2 dos gases - média: 0,8%

Figura 11. Teores de O_2 , CO_2 e NO dos gases de combustão.



T1 – temperatura dos gases na saída do trocador - média: 306 °C; **T2** – temperatura dos gases na entrada do trocador - média: 837 °C; **T3** – temperatura do ar na saída do trocador - média: 370 °C; **T4** – temperatura dos gases no interior da fornalha - média: 1.065 °C

Figura 12. Temperaturas do ar e dos gases de combustão.

No período de ensaio, 2.610 kg de zinco foram alimentados ao forno 3, produzidos 2.991 kg de óxido de zinco e consumidos 403,9 m³ de gás natural, indicando um consumo específico de 0,155 m³ de gás por kg de zinco. Este consumo é cerca de 28% inferior ao verificado no ensaio anterior - 0,215 m³ de gás natural por kg de zinco.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A redução obtida no consumo de gás natural pode ser atribuída a dois fatores: a operação do equipamento com menor excesso de ar - de 10 para 3,6% (teor de O_2 dos gases de 2,1 para 0,8%) e, sobretudo, ao preaquecimento do ar de combustão - de 25 para 370 °C.

A consistência dos valores medidos pode ser avaliada calculando o rendimento térmico do forno em três situações. Na primeira (original), os gases de combustão deixam o “volume de controle” a 837 °C e com teor de O_2 de 2,1% (Figura 13); na segunda, 837 °C e 0,8% (Figura 14) e, na terceira, 306 °C e 0,8% (Figura 15).

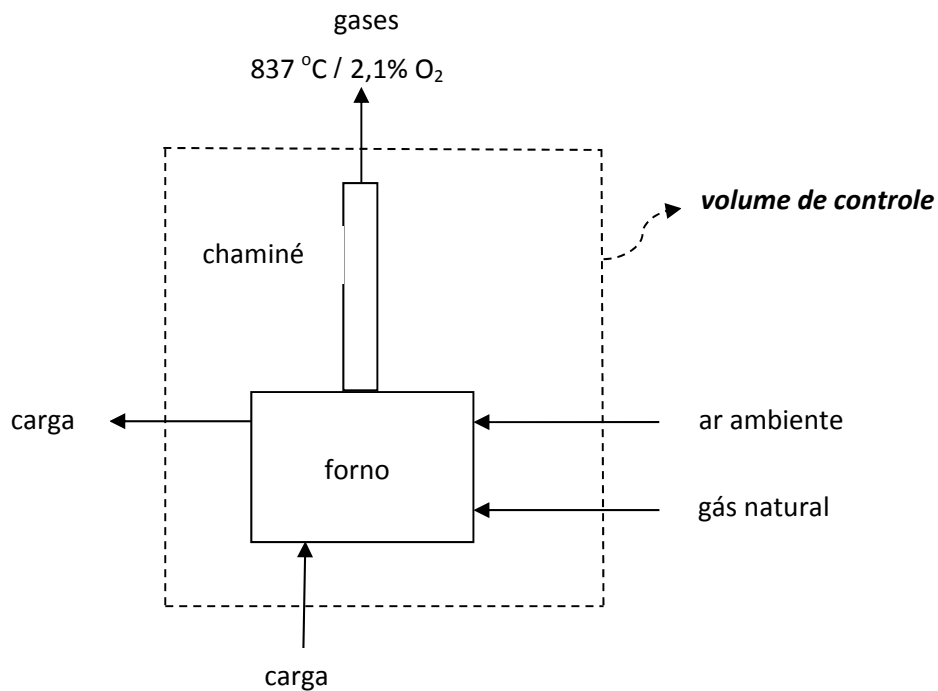


Figura 13. Fluxograma simplificado: forno sem o trocador e gases a 837 °C e 2,1% O₂.

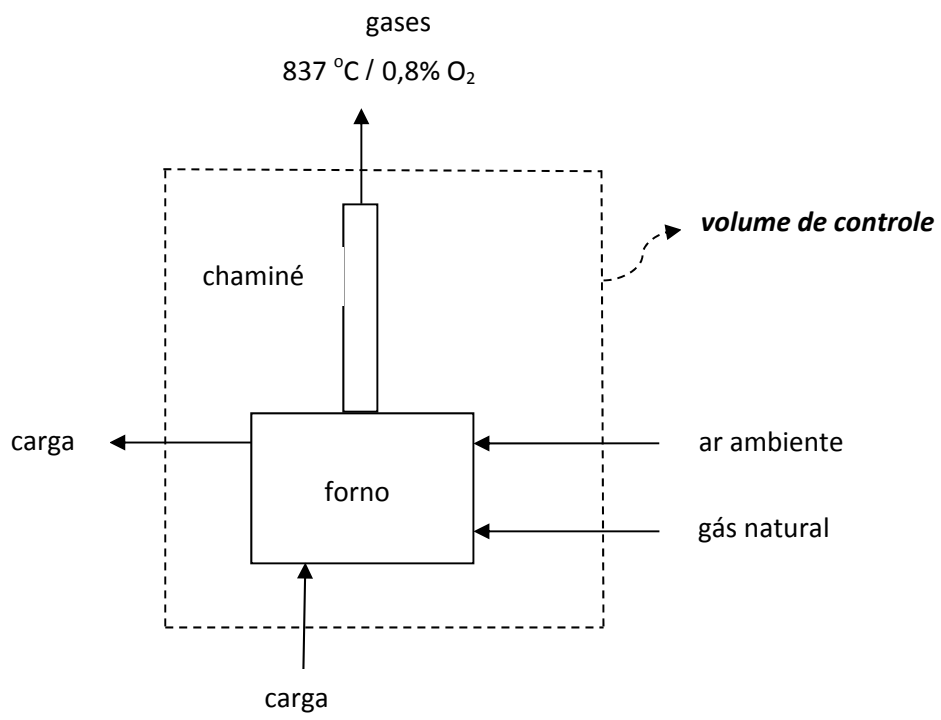


Figura 14. Fluxograma simplificado: forno sem o trocador e gases a 837 °C e 0,8% O₂.

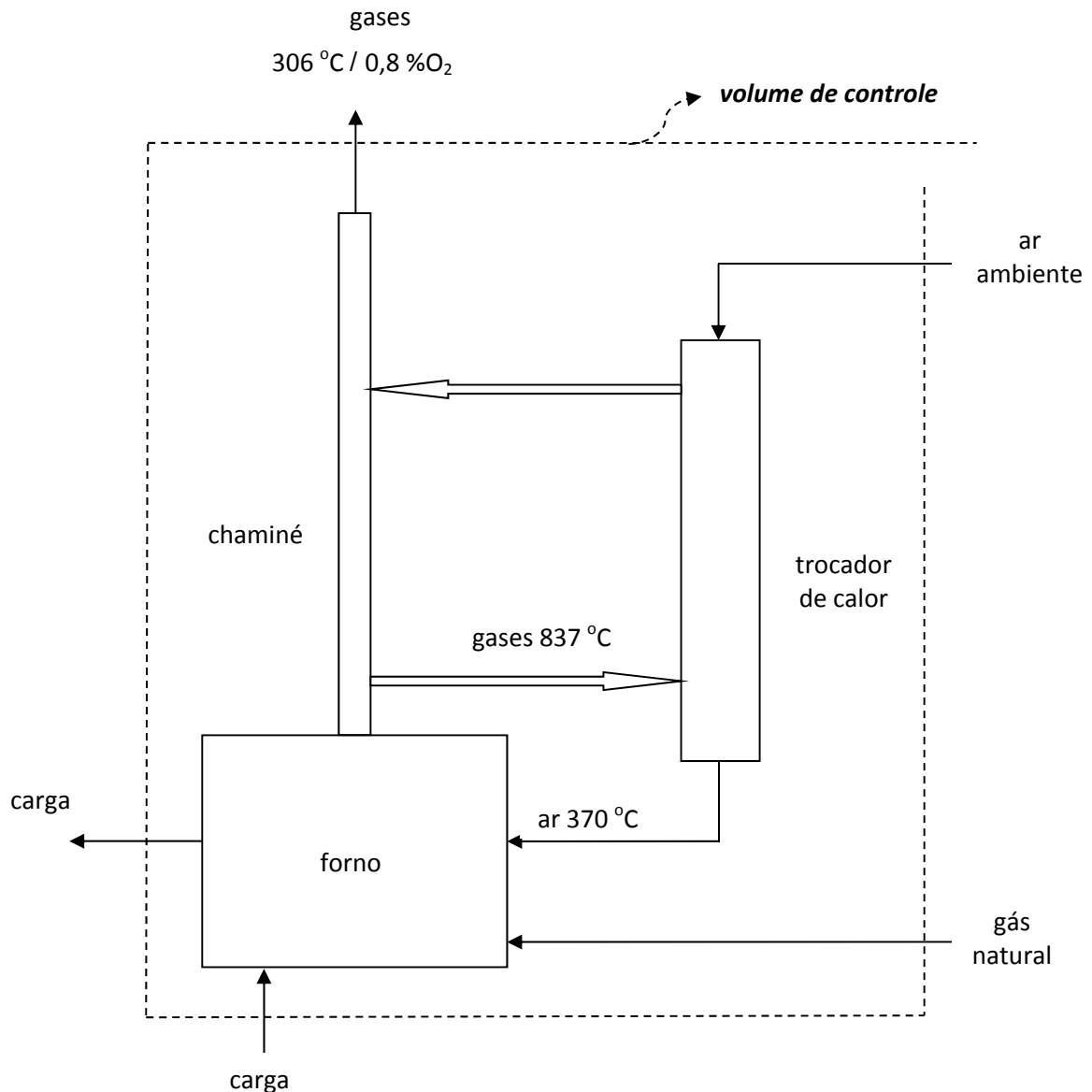


Figura 15. Fluxograma simplificado: forno com o trocador e gases a 306 °C e 0,8% O₂.

De maneira simplificada, o rendimento pode ser calculado pela expressão:

$$\eta = E_u / E_f = 1 - (P / E_f)$$

onde:

η (adim.): rendimento térmico

E_f (kcal/h): potência fornecida ao forno

E_u (kcal/h): potência útil absorvida pela carga

P (kcal/h): potência não aproveitada

A potência não aproveitada corresponde, basicamente, ao fluxo de gases de combustão que deixa o volume de controle numa temperatura acima da ambiente e às trocas de calor entre as superfícies externas aquecidas dos equipamentos (forno, trocador de calor) e componentes (dutos, válvulas, instrumentos) internos ao volume de controle, e o ar ambiente. Admitindo que a “perda” de calor para o ambiente se mantenha inalterada nas três situações, a única “perda” considerada para a comparação entre as situações será a devido aos gases de combustão.

$$P_{\text{gases}} = m_{\text{gases}} * C_{p_{\text{gases}}} * (T_{\text{gases}} - T_{\text{REF.}})$$

onde:

P_{gases} (kcal/h): potência perdida associada aos gases de combustão

m_{gases} (kg/h): vazão mássica dos gases de combustão

T_{gases} ($^{\circ}\text{C}$): temperatura dos gases de combustão

$C_{p_{\text{gases}}}$ (kcal/kg $^{\circ}\text{C}$): calor específico médio dos gases de combustão entre a temperatura de saída do volume de controle e a de referência, a pressão constante

$T_{\text{REF.}}$ ($^{\circ}\text{C}$): temperatura de referência; será adotado o valor de 25 $^{\circ}\text{C}$

A potência fornecida é calculada pela equação:

$$E_f = m_{\text{GN}} * \text{PCI}_{\text{GN}}$$

onde:

m_{GN} (kg/h): vazão mássica do gás natural

PCI_{GN} (kcal/kg): poder calorífico inferior do gás natural; será adotado o valor de 11.476 kcal/kg

portanto:

$$\eta = 1 - (P / E_f) = 1 - \{[m_{\text{gases}} * C_{p_{\text{gases}}} * (T_{\text{gases}} - 25)] / (m_{\text{GN}} * 11.476)\}$$

Tendo o teor de O_2 dos gases, adotando uma composição típica para o gás natural e utilizando aplicativo desenvolvido pelo IPT para a realização de cálculos estequiométricos (“Acomb”), calculam-se os termos “ $C_{p_{\text{gases}}}$ ” e “($m_{\text{gases}} / m_{\text{GN}}$)” para as três situações. Assim:

$$\eta_1 = 1 - \{[19,30 * 0,278 * (837 - 25)] / 11.476\} = 0,62$$

$$\eta_2 = 1 - \{[18,22 * 0,278 * (837 - 25)] / 11.476\} = 0,64$$

$$\eta_3 = 1 - \{[18,22 * 0,277 * (306 - 25)] / 11.476\} = 0,88$$

ou ainda, supondo constante a potência útil absorvida pela carga:

$$\eta_1 = E_u / (m_{\text{GN1}} * \text{PCI}_{\text{GN}}) = \text{constante} * m_{\text{GN1}} = 0,62$$

$$\eta_2 = E_u / (m_{\text{GN2}} * \text{PCI}_{\text{GN}}) = \text{constante} * m_{\text{GN2}} = 0,64$$

$$\eta_3 = E_u / (m_{\text{GN3}} * \text{PCI}_{\text{GN}}) = \text{constante} * m_{\text{GN3}} = 0,88$$

portanto:

$$\eta_1 / \eta_2 = m_{\text{GN2}} / m_{\text{GN1}} = 0,62 / 0,64 = 0,97$$

↳ a redução do excesso de ar de 10 para 3,6% reduz o consumo de gás natural em cerca de 3%

$$\eta_2 / \eta_3 = m_{\text{GN3}} / m_{\text{GN2}} = 0,64 / 0,88 = 0,73$$

↳ o preaquecimento do ar de combustão de 25 para 370 $^{\circ}\text{C}$ reduz o consumo de gás natural em mais 27%, aproximadamente

$$\eta_1 / \eta_3 = m_{\text{GN3}} / m_{\text{GN1}} = 0,62 / 0,88 = 0,70$$

↳ a redução do excesso de ar de 10 para 3,6% combinada com o preaquecimento do ar de combustão de 25 para 370 $^{\circ}\text{C}$ reduz o consumo de gás natural em cerca de 30%

Ou seja, a redução do consumo de combustível, calculada considerando uma série de hipóteses e os valores medidos de temperatura e teor de O_2 dos gases, é semelhante à obtida considerando o consumo de gás natural e a produção do forno durante o ensaio, o que dá consistência aos valores medidos.

7 CONCLUSÕES

A instalação do preaquecedor de ar de combustão no forno 3 da Brazinco somada ao ajuste realizado da relação ar - combustível do queimador resultou na redução de 28% no consumo de gás natural.

A atratividade financeira da medida pode ser avaliada considerando o preço de implantação do sistema - R\$ 112.000,00 - e a economia obtida no consumo de gás natural - R\$ 5.800,00 / mês.