

# ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO DE GÁS DE COQUERIA POR GÁS MISTO NO FORNO DE REAQUECIMENTO DE PLACAS DA LAMINAÇÃO DE TIRAS A QUENTE DA COSIPA<sup>(1)</sup>

Marcos Noboru Arima<sup>(2)</sup>; Nelson Seiji Yokaichyia<sup>(3)</sup>; Luiz Cláudio Farias<sup>(4)</sup>

**RESUMO** – Este trabalho apresenta a metodologia e os principais resultados da análise de substituição do gás de coqueria por gás misto (gás natural + N<sub>2</sub>) nos fornos de reaquecimento de placas da laminação de tiras a quente da COSIPA. Esta análise teve como motivação a necessidade de diminuir o consumo específico destes fornos quando estes operam com gás misto. Haja visto que, o consumo específico com gás misto era superior àquele com gás de coqueria. Foi utilizada uma metodologia experimental na qual os períodos de estabilidade foram identificados por meio do monitoramento da produção de placas, da potência fornecida e da temperatura do forno. Devido às diferenças de excesso de ar e de produção de placas entre os períodos de estabilidade com gás de coqueria e com gás misto com 25% de N<sub>2</sub>, o consumo específico registrado durante estas duas condições não são comparáveis. No entanto, por meio de observações visuais e argumentos teóricos, foi possível concluir que o consumo específico do forno operando com gás misto com concentrações de N<sub>2</sub> reduzidas (20% e 15%) deve ser igual ou inferior àquele com gás de coqueria. Além disto, este trabalho evidenciou que durante os períodos nos quais a composição do combustível varia com frequências e amplitudes elevadas, a malha de controle de regulagem dos queimadores é inadequada. Isto implica consumos específicos mais elevados. Portanto, tem-se duas alternativas de solução: manter a composição do combustível estável, ou aperfeiçoar a malha de controle de regulagem dos queimadores.

**PALAVRAS CHAVE** – forno de reaquecimento

(1) 25<sup>o</sup> SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES / 19<sup>o</sup> ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS – 24 a 26 de agosto de 2004 – Florianópolis – SC

(2) Engenheiro Mecânico, Mestre - IPT/DME/AET

(3) Engenheiro Mecânico - IPT/DME/AET

(4) Técnico Metalurgista - COSIPA/LTQ

## **1 – INTRODUÇÃO**

Na linha de produção de Tiras a Quente da Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), existem três fornos de reaquecimento de placas de aço (Fornos LTQ), que abastecem a laminadora. Após a substituição parcial do gás de coqueria (GCO) pelo gás misto (GM), que é uma mistura de gás natural (GN) com N<sub>2</sub>, foi observada uma elevação do consumo específico desta aplicação. A COSIPA, considerando que: (A) a unidade de mistura teve sua capacidade aumentada de 10.000 m<sub>n</sub><sup>3</sup> / h; (B) os fornos LTQ são o gargalo da linha de Laminação de Tiras a Quente; solicitou à COMGÁS a contratação do IPT para a realização do estudo relatado no presente trabalho.

## **2 – OBJETIVO**

O objetivo do estudo relatado no presente trabalho foi analisar os efeitos decorrentes da complementação da demanda de GCO por GM sobre a operação dos Fornos LTQ. Assim como, sugerir medidas que proporcionem a diminuição do consumo específico dos fornos LTQ quando estes operam com GM. Para tanto, foi definido um critério de estabilidade para o forno e uma metodologia de medição e de cálculo para a realização de balanços térmicos.

## **3 – DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO E METODOLOGIA**

### *3.1 – Instalação de Fornecimento de Gás Combustível*

O gás combustível fornecido aos fornos LTQ (GLTQ) é caracterizado por sucessivas variações de composição decorrentes de misturas com diferentes proporções de GCO e GM. Isto ocorre devido a flutuações na carga dos equipamentos da siderúrgica, mormente: fornos de coqueria, fornos de laminação de chapas grossas (LCG), e fornos de tratamento térmico (FTT). Apesar da existência de dois gasômetros na linha de gás de coqueria da COSIPA, estes não são suficientes para absorver as grandes variações de consumo e fornecimento deste gás. Este fato é agravado pelo posicionamento das entradas de GCO e GM na linha que abastece os fornos LTQ, fornos LCG e FTT, conforme ilustrado na Figura 1. Através desta figura, é possível observar que: (A) as entradas de GM e GCO estão fisicamente distantes entre si; (B) os fornos LCG e FTT estão posicionados do lado da entrada de GM e os fornos LTQ estão do lado da entrada de GCO. Estas características de posicionamento físico, juntamente com o fato do consumo de gás dos fornos LCG e FTT ser normalmente instável, implicam a impossibilidade de medir a composição da proporção de GCO e GM no GLTQ por meio das medições de vazões nestes equipamentos e nas entradas de GCO e GM, pois o padrão do escoamento na tubulação é instável;

### *3.2 – Fornos LTQ*

Os fornos da linha de produção de Tiras a Quente são do tipo empurradores de placas, sendo que os Fornos 1 e 2, semelhantes entre si, têm 3 zonas cada um, e o Forno 3 tem 5 zonas. Os Fornos 1 e 2 são os que limitam o aumento da produção de placas aquecidas e, durante o período dos trabalhos de medições, o Forno 1 estava em reforma. Portanto, o Forno 2 foi utilizado para realização do presente trabalho.

Os produtos de combustão após a saída do forno entram em um conjunto de 4 recuperadores de calor (RCN1, RCS1, RCN2, RCS2) e em seguida são descarregados na atmosfera através de 2 chaminés (CHN, CHS). O ar de combustão é fornecido por um ventilador de tiragem forçada (VT), passa nos recuperadores de calor, onde é pré-aquecido, e em seguida é distribuído para cada zona do forno. Os gases combustíveis (GLTQ) são distribuídos para cada zona do forno através de trechos de tubulação que partem de uma tubulação geral, que atende todos os fornos LTQ.

As variáveis de processo do Forno 2 que são monitoradas pela COSIPA, assim como, suas respectivas siglas adotadas neste relatório, são mostradas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1:** Variáveis de processo do Forno 2 monitoradas pela COSIPA e suas respectivas siglas.

Sigla	Variável
V_AC1	Vazão de ar de combustão na zona 1
V_AC2	Vazão de ar de combustão na zona 2
V_AC3	Vazão de ar de combustão na zona 3
V_GC1	Vazão de gás combustível na zona 1
V_GC2	Vazão de gás combustível na zona 2
V_GC3	Vazão de gás combustível na zona 3
T_N1	Temperatura da zona 1 no lado norte
T_S1	Temperatura da zona 1 no lado sul
T_N2	Temperatura da zona 2 no lado norte
T_S2	Temperatura da zona 2 no lado sul
T_N3	Temperatura da zona 3 no lado norte
T_S3	Temperatura da zona 3 no lado sul
T_PN1	Temperatura dos produtos de combustão na saída norte do forno
T_PS1	Temperatura dos produtos de combustão na saída sul do forno
T_PN2	Temperatura dos produtos de combustão na saída do RCN2
T_PS2	Temperatura dos produtos de combustão na saída do RCS2
T_AN1	Temperatura do ar de combustão na entrada do RCN1
T_AS1	Temperatura do ar de combustão na entrada do RCS1
T_SK1	Temperatura de saída da água do "skid" 1
T_SK2	Temperatura de saída da água do "skid" 2
T_SK3	Temperatura de saída da água do "skid" 3
T_SK4	Temperatura de saída da água do "skid" 4

### 3.3 – Instrumentação utilizada pelo IPT

Além da instrumentação de monitoramento do Forno 2, utilizada normalmente pela COSIPA e listada na Tabela 3.1, o IPT/DME/AET utilizou 3 sondas de coleta de produtos de combustão resfriadas à água. Estas sondas foram instaladas na saída de cada zona do Forno 2, adentrando cerca de 2.500 mm para o interior deste. No caso do GLTQ, a amostragem deste foi feita em um ponto localizado na tubulação geral que alimenta o Forno 2. Os gases analisados foram O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO(%) e CO(ppm), no caso de produtos de combustão, e CH<sub>4</sub>, CO e H<sub>2</sub>, no caso de GLTQ. Com o auxílio desta instrumentação e da instrumentação discriminada na Tabela

3.1, o IPT/DME/AET avaliou a qualidade de regulagem dos queimadores, assim como, executou cálculos de consumo específico do forno 2.

#### 4 – RESULTADOS E ANÁLISE

Um queimador, regulado para uma determinada composição de combustível, pode operar inadequadamente se a composição do combustível variar e, dependendo do grau de variação desta composição é necessária uma nova regulagem. A desregulagem dos queimadores dos fornos LTQ é percebida por meio dos seguintes sintomas: (A) alteração da cor (escurecimento) dos gases efluentes da chaminé do forno; (B) elevação ou diminuição da temperatura dos fornos.

A regulagem dos queimadores é efetuada através da avaliação visual da chama. Sendo que, nos períodos com composição de GLTQ estável, os operadores do forno conseguem uma boa regulagem de queimadores, obtendo concentrações de O<sub>2</sub> nos produtos de combustão da ordem de aproximadamente 1%. Este valor de concentração de O<sub>2</sub> significa que os queimadores estão operando com excesso de ar reduzido. Como consequência disto, tem-se pseudo-temperaturas de chama adiabáticas mais elevadas e, portanto, maiores eficiências de troca de calor entre a chama e as placas de aço.

Durante os períodos nos quais a composição de GLTQ varia freqüentemente, os operadores do forno são obrigados a trabalhar com excessos de ar mais elevados para evitar o escurecimento dos gases efluentes da chaminé do forno. Este enegrecimento ocorre quando os queimadores estão regulados com baixo excesso de ar na operação com gás combustível constituído predominantemente por GCO e a composição desse passa a ter predominância de GM. Haja visto que, as razões (ar/combustível) / poder calorífico do GCO e do GM são diferentes.

Além do excesso de ar, a pseudo-temperatura de chama adiabática (T<sub>AF</sub>) também é influenciada pela composição do gás combustível. Desta forma, as chamas de GCO apresentam T<sub>AF</sub> superior ao do GM. Esta característica favorece a transferência de calor das chamas de GCO para as placas em relação às chamas de GM. No entanto, visualmente, as chamas de GCO são menos emissivas que as de GM e, esta característica desfavorece a transferência de calor das chamas de GCO para as placas.

A operação do Forno 2 foi considerada estável apenas nos períodos nos quais a produção; a potência fornecida e a temperatura do forno mantiveram-se estáveis. Segundo este critério, apenas os períodos das 8:53 às 10:58 do dia 09/12/2001 e das 16:14 às 17:15 do dia 10/12/2001 podem ser considerados estáveis, respectivamente, Figuras 3 e 4. No entanto, estes períodos não são diretamente comparados entre si, pois o valor do excesso de ar ( $L_{bda}$ ), não permaneceu constante. Quanto menor o valor do excesso de ar ( $L_{bda}$ ) maior será a pseudo-temperatura de chama adiabática (T<sub>AF</sub>) e, portanto, a eficiência de transferência de calor dos gases para as placas é intensificada. A Tabela 4.1 mostra as principais variáveis que caracterizam o desempenho do Forno 2 durante os períodos de estabilidade. Notar que os valores de consumo específico ( $H_{comb} / Prod_{aço}$ ) mostrados nesta tabela referem-se a períodos de estabilidade e, portanto, não consideram as paradas para trocas de cilindros e/ou manutenção. Assim sendo, são menores que os valores normalmente relatados para esta variável.

**Tabela 4.1:** Principais variáveis de performance do Forno 2 durante os períodos de estabilidade.

Variável	Unidade	09/12/2001 - 8:53 às 10:58	10/12/2001 - 16:14 às 17:15
Prod_ aço	Ton. / h	88,162	76,144
f_COG	-	0,942	0,398
T_AF	K	2403	2132
Lbda	-	1,102	1,235
H_comb / Prod_ aço	MJ / ton.	1142	1373
	Mcal / ton	273	328

Devido às diferenças operacionais entre os períodos estáveis, não é possível quantificar as afirmações qualitativas feitas nos parágrafos anteriores através, apenas, da análise dos dados experimentais. Para tanto, é necessário construir um modelo numérico validado pelos dados experimentais deste trabalho.

No dia 13/12/2001, durante os períodos das 15:37 às 16h10, das 16h16 às 17h00 e 17h08 às 17h32, os Fornos LTQ operaram apenas com GM, o qual possuía frações molares de N<sub>2</sub> de 20%, 15% e 10%, respectivamente. Neste teste foi observado que as chamas de GM com frações molares de N<sub>2</sub> menores apresentavam-se longas e estáveis, características desejáveis para este tipo de aplicação. Desta forma, ficou comprovado que os queimadores do Forno 2 possuem flexibilidade suficiente para operarem com GCO e GM com 10% de N<sub>2</sub>. As vantagens de operar os fornos LTQ com GM com frações molares de N<sub>2</sub> reduzidas em relação ao GM com 25% de N<sub>2</sub> são as seguintes: (A) redução do fluxo de entalpia dos gases efluentes do forno; (B) aumento da eficiência de transferência de calor da chama para as placas devido à elevação da pseudo-temperatura de chama adiabática (T\_AF) e da emissividade dos gases no interior do forno; (C) redução do consumo de N<sub>2</sub> da siderúrgica.

A Tabela 4.2 mostra os valores de excesso de ar (Lbda) e de pseudo-temperatura de chama adiabática (T\_AF) obtidos neste teste. Comparando estes valores com os da Tabela 4.1, é possível afirmar que as chamas de GM com 20% de N<sub>2</sub> (GM\_20) e 15% de N<sub>2</sub> (GM\_15) possuem eficiências de transferência de calor para as placas iguais ou maiores que as chamas produzidas durante o período de 8:53 às 10:58 do dia 09/12/2001. Ou seja, o consumo específico com GM\_20 e GM\_15 deve ser igual ou menor que o consumo específico do dia 09/12/2001.

A operação com GM com frações molares de N<sub>2</sub> reduzidas tem como principal desvantagem a necessidade de aumentar a frequência de regulagem dos queimadores. Isto ocorre porque a medida que a fração molar de N<sub>2</sub> diminui, os valores do índice de Wobbe e da razão (ar/combustível) / poder calorífico referentes ao GM distanciam-se dos valores referentes ao GCO. A falta de regulagem dos queimadores de acordo com as mudanças de proporção de GM e GCO no GLTQ pode anular as vantagens do GM com frações de N<sub>2</sub> reduzidas. Portanto, esta solução deverá ser antecedida por um sistema automatizado de regulagem de queimadores que utilize a composição do gás combustível como sinal de controle. Na falta deste sistema, a estratégia da COSIPA de misturar N<sub>2</sub> com gás natural para obtenção de GM com índice de Wobbe próximo ao do GCO é plenamente justificável.

**Tabela 4.2:** Valores de  $Lbda$  e  $T_{AF}$  para GM\_20 e GM\_15

Variável	Unidade	13/12/2001 – 15:37 às 16:10 – GM_20	13/12/2001 - 16:16 às 17:00 – GM_15
$T_{AF}$	K	2388	2560
$Lbda$	-	1,103	1,075

## 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantificação do desempenho do Forno 2 em função do combustível, do excesso de ar e da produção de placas deve ser executada por meio de um modelo numérico validado pelos dados deste trabalho.

Este trabalho evidenciou que quanto maior a frequência e a amplitude de variação da composição do gás combustível, maior a necessidade de operar o forno com excessos de ar elevados. Excessos de ar elevados implicam pseudo-temperaturas de chama adiabáticas menores e, por consequência, consumo específico maior. Como alternativas de solução para este problema, tem-se: (A) manter a composição do gás combustível estável; ou (B) automatizar o procedimento de regulagem dos queimadores por meio de um sistema de controle que utilize um sinal de composição de gás combustível.

Quanto à operação com GM com frações de  $N_2$  reduzidas, é possível afirmar, baseado nos valores de pseudo-temperaturas de chamas adiabáticas, que o consumo específico com estes gases será igual ou menor que o consumo específico com GCO. Portanto, é recomendável que a fração molar de  $N_2$  no GM seja reduzida o máximo possível. Lembrar que, esta redução deve ser antecedida pela implementação de um sistema automatizado de regulagem de queimadores.

A execução de análises baseadas em metodologias numéricas e experimentais e a implementação de sistemas de controle para regulagem de queimadores fazem parte das capacitações do IPT/DME/AET.

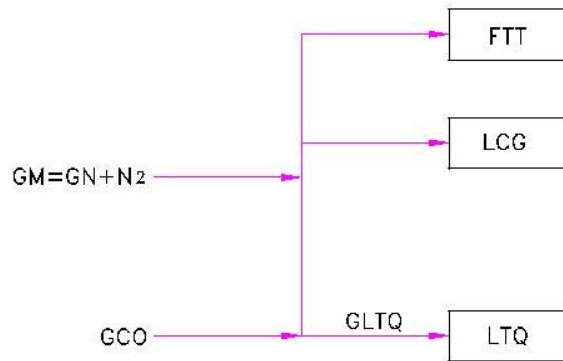
### Agradecimentos

- Engs. José Roberto Nunes e Roberto Kawanami (COMGÁS) pelas articulações que resultaram neste trabalho.
- Engs. Herbert e Sadao Shiratsu (COSIPA) pelo interesse e reconhecimento dados ao IPT/DME/AET.
- Chefes de turno e de fornos e operadores do LTQ (COSIPA) pelo suporte e companheirismo dados durante a execução dos trabalhos experimentais.

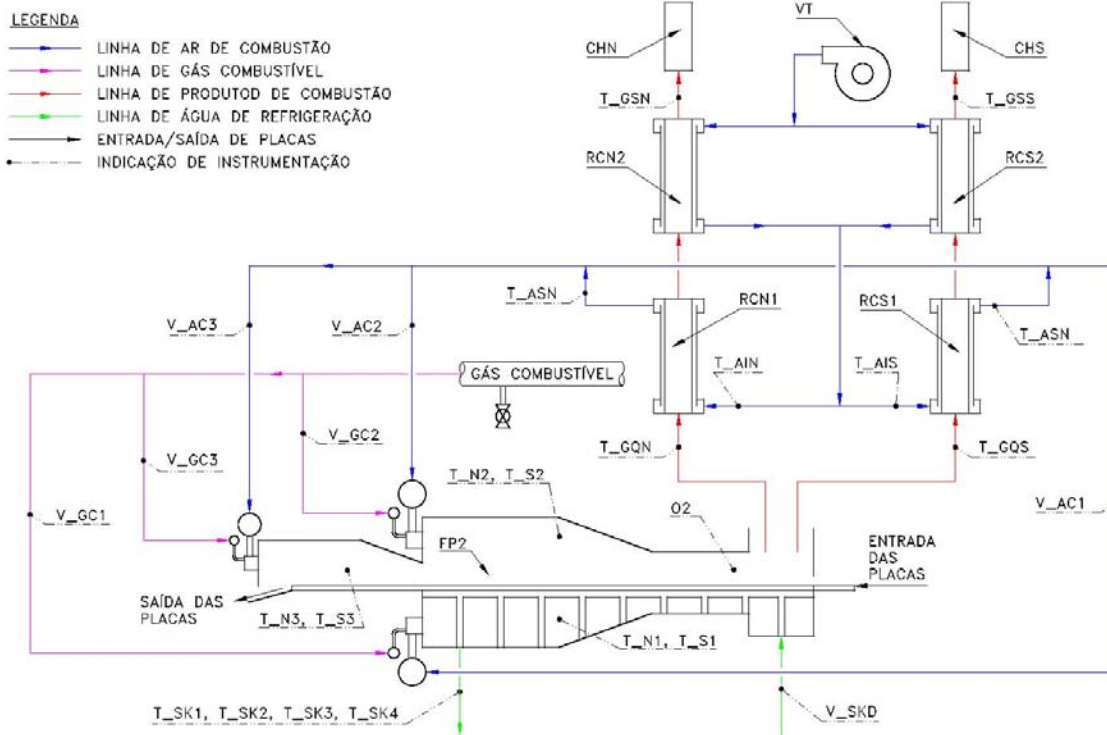
### Bibliografia

- 1 – Hottel, H.C.; Sarofim, A.F.; “Radiative Transfer”; MacGraw-Hill Book Company, 1967.
- 2 – IPT/DME/AET; “Análise da Substituição de Gás de Coqueria por Gás Natural no Forno de Reaquecimento de Placas (LTQ) da COSIPA”; N° 57 677; 2002.

## Figuras



**Figura 1:** Fluxograma da linha de gás combustível que abastece os fornos LTQ, forno LCG e FTT.



**Figura 2:** Fluxograma do Forno 2 com a instrumentação da COSIPA.

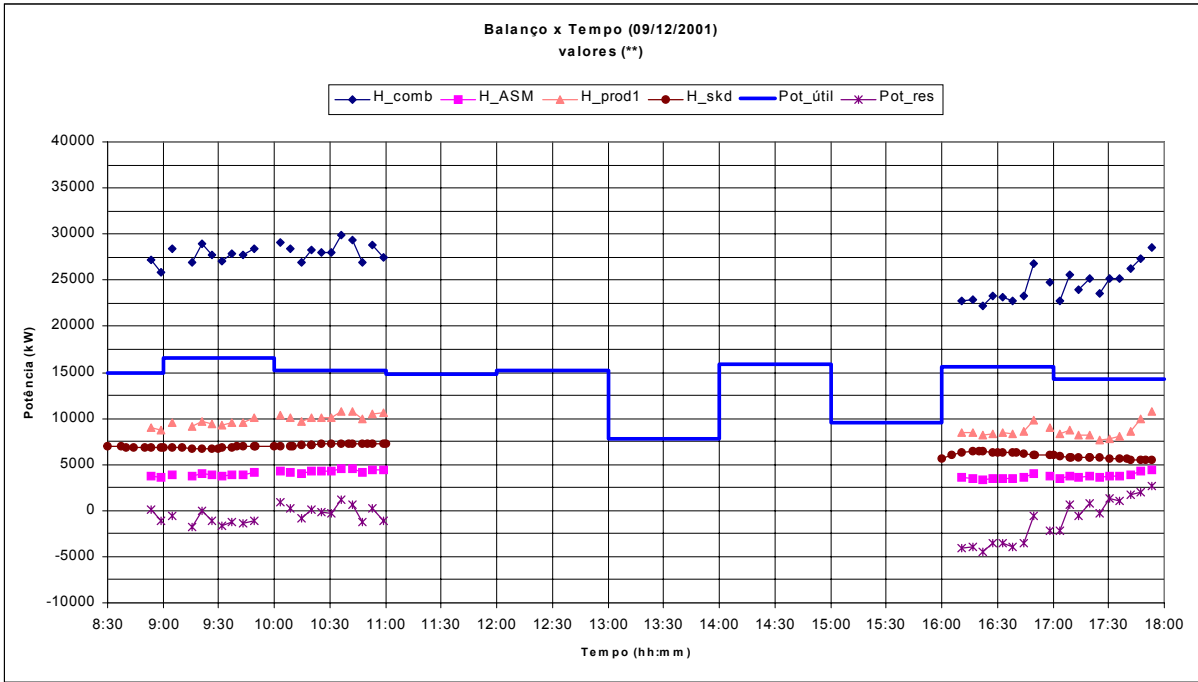


Figura 3: Balanço térmico do Forno 2 sem recuperadores de calor (09/12/2001).

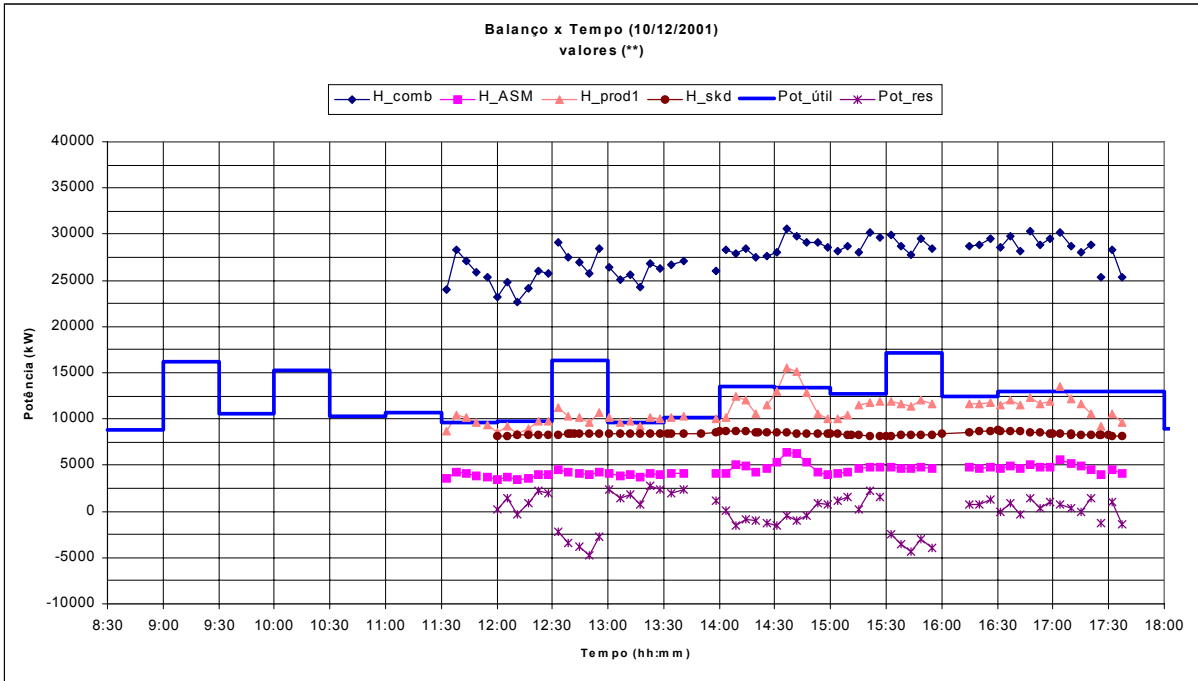


Figura 4: Balanço térmico do Forno 2 sem recuperadores de calor (10/12/2001).



# ANALYSIS OF COKE OVEN GAS SUBSTITUTION BY MIXED GAS IN COSIPA'S HOT STRIP REHEATING FURNACE

*Marcos Noboru Arima; Nelson Seiji Yokaichyia; Luiz Cláudio Farias*

**ABSTRACT** - This work presents the methodology and the major results from the analysis of coke oven gas substitution by mixed gas (natural gas + N<sub>2</sub>) in COSIPA's hot strip reheating furnaces. This analysis had as motivation the necessity of lowering the specific consumptions when these furnaces work with mixed gas. As long as, the specific consumption with the later had been higher than those with coke oven gas. It was used an experimental methodology in which the stability was identified through monitoring plate production, power supplied and furnace temperature. Since there were differences of air excess and plate production among the stability periods with coke oven gas and 25% N<sub>2</sub> mixed gas, the specific consumptions registered during these two conditions are not comparable. However, through visual observations and theoretical arguments, it was possible to conclude that the furnace specific consumptions working with reduced N<sub>2</sub> concentration (20% and 15%) mixed gas must be equal or lower than those with coke oven gas. Furthermore, this work showed that during the periods in which the fuel composition varied with large frequencies and amplitudes, the burner's adjustment control loop is inadequate. This implies higher specific consumption. Therefore, there are two alternatives of solution: keeping the fuel composition stable, or improving the burner's adjustment control loop.

**Key-words** – reheating furnace