

# MISTURA DO GÁS DE ALTO-FORNO PARA ECONOMIZAR GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO<sup>1</sup>

*Isac Quintão Pessoa<sup>2</sup>  
Luiz Duarte Lage<sup>3</sup>  
Péricles da Silva Alves<sup>4</sup>  
Benjamin Fulim Junior<sup>5</sup>  
Reginaldo Frinhani Carlos<sup>6</sup>  
Luciano Lelis Miranda de Brito<sup>7</sup>  
Silvano Fonseca Paganoto<sup>8</sup>  
David Fagundes Fabri<sup>9</sup>*

## Resumo

Durante a produção do ferro-gusa nos altos-fornos, ocorrem à geração de gases que são reaproveitados como combustível no processo produtivo das indústrias siderúrgicas. A ArcelorMittal Inox Brasil é responsável pela fabricação de aços inoxidáveis e silicíosos; tem um alto-forno a carvão vegetal e um alto-forno a coque, gerando gás com poder calorífico inferior (PCI) médio de 1.150kcal/Nm<sup>3</sup> e 750kcal/Nm<sup>3</sup>, respectivamente, que são consumidos internamente ou queimados em torres. Este trabalho tem como objetivo monitorar e intervir na mistura do gás do alto-forno 1 com o alto-forno 2, para manter o poder calorífico inferior do gás de alto-forno (GAF) em valores altos e constantes. O projeto proporcionará uma redução no consumo de GLP nos fornos de laminação de 2.206 toneladas por ano quando comparada ao sistema que vinha sendo operado.

**Palavras-chave:** Gás de alto-forno; Gás liquefeito de petróleo; Poder calorífico inferior.

## MIXTURING BLAST FURNACE GAS FOR CUTTING DOWN LIQUIFIED PETROL GAS

### Abstract

During production of pig iron in blast furnaces, gases are generated and are reused as fuel in the production processes of steelworks. ArcelorMittal Inox Brasil is responsible for the manufacturing of stainless and silicon steel grades; has a charcoal-fuelled blast furnace and a coke-fuelled blast furnace, generating gases with average net heating value (NHV) of 1,150kcal/Nm<sup>3</sup> and 750kcal/Nm<sup>3</sup>, respectively, which are used internally or flared. This paper aims at monitoring and acting on the mix gas from No. 01 and No. 02 blast furnaces, so as to maintain the gas net heating value (BFG) within high and constant values. The project will leads to a LPG consumption reduction in the furnaces from the rolling facility of 2,206 ton a year, when compared to the system as it was being operated.

**Key words:** Blast furnace gas; Liquefied petrol gas; Net heating value.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 29º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades,, 13 a 15 de agosto de 2008, Porto Seguro, BA*

<sup>2</sup> *Engenheiro Mecânico, Coordenação de Eficiência Energética*

<sup>3</sup> *Engenheiro Mecânico, Assistente Técnico da Gerência de Utilidades*

<sup>4</sup> *Engenheiro Mecânico, Gerente da Distribuição de Fluidos*

<sup>5</sup> *Engenheiro Mecânico, Gerente da Laminação de Tiras a Quente*

<sup>6</sup> *Técnico Mecânico, Analista Técnico de Processo da Distribuição de Fluidos*

<sup>7</sup> *Engenheiro Mecânico, Assistente Técnico da Laminação de Tiras a Quente*

<sup>8</sup> *Engenheiro Eletricista, Assistente Técnico da Automação*

<sup>9</sup> *Engenheiro Eletricista, Assistente Técnico da Utilidade*

## 1 INTRODUÇÃO

Na siderurgia, durante a produção do ferro-gusa nos altos-fornos, são gerados subprodutos chamados de escória, que é beneficiada e vendida a terceiros para a produção de cimento e Gás de Alto-forno (GAF). Este GAF passa por um sistema de limpeza para ser reaproveitado como combustível em outras etapas dos processos produtivos, economizando a queima de gás liquefeito de petróleo (GLP) nos fornos, sendo o objeto do nosso trabalho.

O GAF produzido em um alto-forno alimentado por coque possui um PCI em torno de 700 a 900 kcal/Nm<sup>3</sup> enquanto que o GAF proveniente da queima de carvão vegetal tem um PCI entre 900 a 1300 kcal/Nm<sup>3</sup>.

Atualmente na ArcelorMittal Inox Brasil, o GAF é produzido no alto-forno nº1, que utiliza carvão vegetal como combustível e agente redutor e, no alto-forno nº2, é empregado o coque. Desta forma, o PCI do GAF distribuído pode variar de 700 a 1300 kcal/Nm<sup>3</sup>, porque o sistema de distribuição não é dotado de recursos que permitam controlar a mistura dos dois gases.

Os principais consumidores do GAF na ArcelorMittal Inox Brasil são as caldeiras, fornos de reaquecimento de placas das laminações a quente e fornos de recozimento da laminação a frio de inox e silício.

Os fornos da laminação a quente e a frio, por fabricarem aços especiais, necessitam de uma boa estabilidade para não comprometerem a qualidade da bobina produzida e, portanto, requerem a combustão de um gás com PCI estável.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo, estabilizar o PCI do GAF em um valor elevado e, conseqüentemente, reduzir o consumo de combustível derivado de petróleo, GLP, por meio da análise e monitoramento do circuito de Gás de Alto-Forno (GAF) da ArcelorMittal Inox Brasil, visando a sua distribuição de forma adequada para as diversas fases do processo. O trabalho deverá ser desenvolvido sem a realização de investimentos

## 3 MATERIAL E MÉTODO

### 3.1 Alto-forno

O alto-forno, equipamento industrial como objetivo principal de produção de ferro-gusa a partir do minério de ferro é uma estrutura alta feita com tijolos refratários. Coque ou carvão vegetal, fundentes e minério de ferro (óxido de ferro) são inseridos no topo. O ar é alimentado pela base. Este fornecimento de ar permite a queima do combustível no seu interior. Isto reduz o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a metal (Fe) que, sendo mais denso, se concentra na parte inferior do forno. Como o carbono proveniente do combustível é determinante tanto na produção de calor via combustão quanto nas reações de redução do ferro, é natural que este esteja em excesso no processo. Dessa forma, é esperado que ocorra queima incompleta do combustível alimentado gerando emissões de CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> gases combustíveis possíveis de serem aproveitados. Estes gases provenientes da queima incompleta no alto-forno compõem o chamado gás de alto-forno (GAF), objeto de estudo do presente trabalho.

### 3.2 Gás de alto forno (GAF)

Em 1832, na Alemanha, Fabre du Faur obteve a patente do processo de aplicação do gás de alto-forno para pré-aquecer o ar soprado. Em 1857, Alfred Cowper<sup>(1)</sup> utilizou, pela primeira vez, regeneradores cheios de tijolos refratários, queimando o gás do próprio alto-forno para elevar a temperatura de sopro.

Bell, em 1884, descobriu que havia relação entre a proporção de CO e de CO<sub>2</sub> no gás e a produtividade do forno. Antes, em 1838, Von Bunsen havia coletado amostras de gases através de um tubo introduzido a partir do topo do forno. O objetivo, no entanto, era o de tentar aproveitá-lo como combustível em caldeiras. Os primeiros dados, criteriosamente catalogados, aplicáveis ao processo, apareceram com Darken e Gurry, em 1946.<sup>(2)</sup>

O gás de alto-forno, um subproduto da fabricação do ferro gusa, é composto dos seguintes componentes:

- monóxido de carbono (CO): oriundo de reações incompletas do carbono proveniente do combustível (coque ou carvão vegetal) com o oxigênio do ar que é injetado nas ventaneiras;
- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): oriundo de reações completas do carbono proveniente do combustível com o oxigênio do ar ou do minério de ferro;
- hidrogênio (H<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>): proveniente do combustível (coque ou carvão vegetal), carga metálica (minério e fundentes) e do ar;
- nitrogênio (N<sub>2</sub>): gás inerte, presente no ar, injetado na ventaneira do alto-forno;
- água (H<sub>2</sub>O): Sai no topo do alto-forno na forma de vapor; é proveniente da reação do CH<sub>4</sub> ou do H<sub>2</sub>.

O gás de topo de um alto-forno sempre terá CO em sua composição. Isso porque o carbono, além de redutor, é o combustível do processo e uma quantidade maior de carbono é necessária para gerar calor do que a quantidade necessária para reduzir todos os óxidos de ferro. Vale ressaltar que o sensor principal para detectar a eficiência de um alto-forno é a composição e a temperatura do próprio gás de topo.

#### 3.2.1 Principais características do gás de alto-forno

No gás de alto-forno podemos concluir que somente o CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> são combustíveis, e que o PCI do GAF pode ser obtido a partir da seguinte equação (1):

$$PCI_{GAF} = 2,598X_{H_2} + 3,020X_{CO} + 8,593X_{CH_4} \quad (1)$$

em que:

PCI<sub>GAF</sub> = Poder calorífico inferior do gás de alto-forno,

X<sub>H<sub>2</sub></sub> = Fração molar de hidrogênio no GAF, em base volumétrica,

X<sub>CO</sub> = Fração molar de monóxido de carbono no GAF, em base volumétrica,

e,

X<sub>CH<sub>4</sub></sub> = Fração molar de metano no GAF em base volumétrica.

Um PCI elevado do GAF é consequência de uma relação mais alta de carvão ou coque, minério de ferro e também está ligado a algumas condições operacionais do alto-forno como: permeabilidade da carga, taxa de finos de carvão injetada nas ventaneiras e qualidade da carga.

Outra informação importante é que as características e composições do carvão vegetal tendem a ser muito mais heterogêneos que os do coque, gerando assim um gás de alto forno com mais oscilações em sua composição e, conseqüentemente, no PCI.

A redução do consumo de carvão ou coque depende principalmente do aumento da eficiência da troca gasosa no interior do alto-forno, o que implica diretamente no aumento do rendimento da combustão do alto-forno, conforme a Equação (2), e conseqüentemente, na queda do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás.

$$\eta = \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \quad (2)$$

Conclui-se, portanto, que a melhora na produção do ferro-gusa, implica na disponibilidade de um gás mais pobre para a utilização em outros pontos da fábrica. Do total de gás produzido, parte é utilizada nos regeneradores (*cowpers*) do próprio alto-forno, estando o restante disponível para outros setores da fábrica.

### 3.3 O Sistema de Distribuição de GAF da ArcelorMittal Inox Brasil

A mistura de GAF utilizada nas caldeiras, laminações e demais setores do processo siderúrgico da ArcelorMittal Inox Brasil., como já mencionado, provém dos dois alto-fornos em operação na unidade industrial. O sistema de distribuição de GAF tem como objetivo fornecer a fábrica este combustível de forma a manter seu PCI e queima o mais estável possível nos processos em que será utilizado.

Abaixo são descritos os principais equipamentos que compõe o sistema de distribuição de GAF.

#### 3.3.1 Gasômetro

O gasômetro tem por finalidade estabilizar a pressão do gás na linha e funcionar como armazenador, podendo absorver gás quando a geração for maior que o consumo, ou fornecer quando ocorrer o contrário. É o nível do gasômetro que define a abertura ou fechamento das torres de queima. É um equipamento do tipo "calota flutuante", constituído basicamente por dois cilindros circulares, retos, de diâmetros diferentes, fechados em uma de suas extremidades, sendo o cilindro de maior diâmetro montado de boca para cima (balão fixo – reservatório de água de selagem) e o outro montado de boca para baixo (balão móvel – câmara de gás), inserido no primeiro. A subida ou descida da parte móvel do gasômetro é conseqüência da maior ou menor pressão do gás em seu interior. O gasômetro possui duas entradas/saídas de gás interligadas com os altos-fornos 1 e 2 e com os *boosters* 2A/B.

#### 3.3.2 Torres de queima

As torres de queima têm a função de regular o nível do gasômetro e aliviar a pressão da rede de gás, conferindo maior estabilidade ao sistema, bem como efetuar a queima de todo o excesso de GAF. Atualmente, estão instaladas quatro torres de queima, sendo duas no circuito do alto-forno 1 e duas no circuito do alto-forno 2. Cada torre é dotada de uma válvula de controle comandada por meio de um controlador digital, localizado no centro de energia. A medição da vazão de gás através das torres de queima é realizada pela diferença entre a geração líquida e o consumo de gás.

### 3.3.3 Booster

Tem a função de elevar a pressão do gás de alto-forno de 280 mmca para 1.500 mmca. Atualmente, a ArcelorMittal Inox Brasil tem dois boosters instalados, sendo um de reserva, denominados 2 A/B, com uma vazão nominal de 55.000 Nm<sup>3</sup>/h cada. Além das proteções elétricas normais, estes boosters são equipados individualmente com transmissores de pressão de sucção, detector de temperatura de gás de sucção, válvula de bloqueio na saída, registro radial para controle de vazão e válvula de controle de vazão de recirculação.

### 3.3.4 Sifão

O sifão é uma tubulação da rede de gás com formato tipo U cuja função é bloquear a passagem de gás por meio de uma coluna de água. Para garantir a estanqueidade do gás, normalmente adota-se uma vez e meia a pressão do gás para a definição da altura da coluna de água. Na planta industrial da ArcelorMittal Inox Brasil existem mais de 100 sifões instalados em todo o circuito de gás de alto-forno.

### 3.3.5 Fluxograma Simplificado do Sistema de Distribuição de GAF

A figura 1 ilustra um fluxograma simplificado do sistema de distribuição de GAF da ArcelorMittal Inox Brasil.

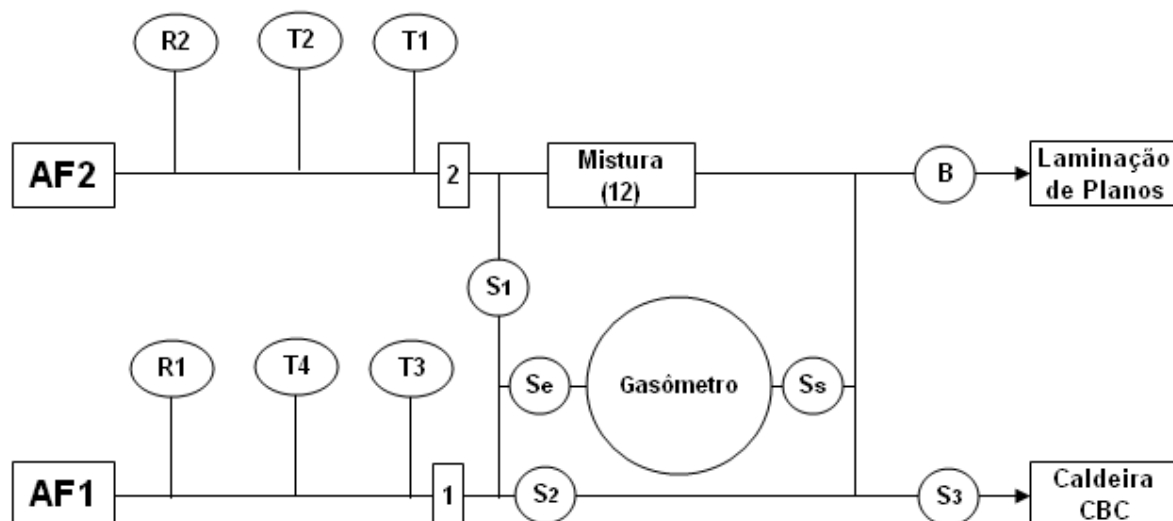


Figura 1: Fluxograma simplificado de distribuição do Gás de Alto-Forno na ArcelorMittal Inox Brasil.

Onde:

- AF1 – Alto-forno 1 a carvão vegetal.
- AF2 – Alto-forno 2 a coque.
- R1 – Consumo de gás dos *Cowpers* do alto-forno 1.
- R2 – Consumo de gás dos *Cowpers* do alto-forno 2.
- T1 – Torre de queima 1 do alto-forno 2.
- T2 – Torre de queima 2 do alto-forno 2.
- T3 – Torre de queima 3 do alto-forno 1.
- T4 – Torre de queima 4 do alto-forno 1.
- 1 – Circuito de gás do alto-forno 1
- 2 – Circuito de gás do alto-forno 2.
- Mistura (12) – Circuito de mistura do gás do alto-forno 1 e alto-forno 2.
- S2 – Sifão de *by-pass* do gasômetro.

- Se – Sifão de entrada do gasômetro.
- S1 – Sifão de interligação do circuito do AF1 e AF2.
- Ss – Sifão de saída do gasômetro.
- S3 – Sifão de alimentação da caldeira.
- B – *Booster* de alimentação de GAF da laminação de planos.

### 3.4 Metodologia

O trabalho foi dividido em três etapas, a saber:

- Análise do sistema de distribuição do GAF.
- Determinação da melhor forma de queima do GAF de forma a manter o PCI alto e estável.
- Cálculo da quantidade de GLP a ser introduzida na mistura do GAF de forma a quantificar os ganhos nos equipamentos.

#### 3.4.1 Análise do sistema de distribuição do GAF

O gás que é gerado pelos altos-fornos segue para o consumo da usina e para os *cowpers*. Inicialmente, ele pode ser queimado nas torres ou ser armazenado no gasômetro, conforme Equação (3).

$$V_{AF} = V + V_R + V_T \pm V_E \quad (3)$$

em que:

$V_{AF}$  = Geração total de GAF

$V$  = Vazão de GAF que está sendo consumida na usina

$V_R$  = Vazão de GAF que está sendo consumida nos *cowpers*

$V_T$  = Vazão de GAF que está sendo queimado nas torres de queima

$V_E$  = Vazão de GAF que entra ou sai do gasômetro.

Obs.: O estoque de gás no gasômetro ( $V_E$ ) é positivo, quando o gasômetro está subindo, ou seja, está armazenando GAF, e é negativo quanto estiver fornecendo GAF para o sistema.

A vazão de gás de alto-forno queimada nas torres ( $V_T$ ) pode ser estimada pelo quadrado percentual de abertura da válvula borboleta da torre de queima (A) de acordo com:

$$V_T = A^2 \cdot 250 \frac{Nm^3}{h} \quad (4)$$

em que:

$V_T$  = Vazão de GAF que está sendo queimado nas torres

A = Percentual de abertura da torre de queima

Foram realizados basicamente três grupos de balanços de massa e energia: alto-forno 1, alto-forno 2 e mistura dos GAF's resultantes destes.

#### Balanço de Massa e Energia do Gás do Alto-forno 1

A vazão de gás disponível para ser distribuído ( $V_1$ ) é a diferença entre a geração bruta do gás do alto-forno1 ( $V_{AF1}$ ) e o somatório do gás que é queimado nas torres ( $V_{T3}+V_{T4}$ ) e nos *cowpers* ( $V_{R1}$ ), conforme Equação (5).

$$V_1 = V_{AF1} - (V_{R1} + V_{T3} + V_{T4}) \quad (5)$$

Onde:

- $V_1$  = Vazão de GAF disponível para ser distribuído no circuito do alto-forno 1.
- $V_{AF1}$  = geração bruta do gás de alto-forno 1.
- $(V_{T3} + V_{T4})$  = gás queimado pelas torres 3 e 4.
- $V_{R1}$  = gás queimado nos *cowpers* do alto-forno 1.

A energia ( $ENERGIA_1$ ) é calculada pela multiplicação da vazão disponível ( $V_1$ ) pelo poder calorífico inferior do alto-forno 1 ( $PCI_{AF1}$ ), conforme Equação (6).

$$ENERGIA_1 = PCI_{AF1} \cdot V_1 \quad (6)$$

### Balanco de Massa e Energia do Gás do Alto-forno 2

Os balanços de massa e energia realizadas para o alto-forno 2 são análogos aos resultantes do alto-forno 1. Assim temos para o alto forno 2 as seguintes equações:

$$V_2 = V_{AF2} - (V_{R2} + V_{T1} + V_{T2}) \quad (7)$$

Onde:

- $V_2$  = Vazão de GAF disponível para ser distribuído no circuito do alto-forno 2.
- $V_{AF2}$  = geração bruta do gás de alto-forno 2.
- $(V_{T1} + V_{T2})$  = gás queimado pelas torres 1 e 2
- $V_{R2}$  = gás queimado nos *cowpers* do alto-forno 2

A energia ( $ENERGIA_2$ ) é calculada pela multiplicação da vazão disponível ( $V_2$ ) pelo poder calorífico inferior do alto-forno 2 ( $PCI_{AF2}$ ), conforme Equação (8).

$$ENERGIA_2 = PCI_{AF2} \cdot V_2 \quad (8)$$

### Balanco de Massa e Energia da Mistura dos Gases dos Altos-Fornos

Por meio das Equações (5) e (7), tem-se o balanço de massa da mistura, conforme a Equação (9).

$$V_{12} = V_1 + V_2 \quad (9)$$

De forma análoga para a energia, expressa em termos de PCI dos alto-fornos, temos que:

$$ENERGIA_{12} = ENERGIA_1 + ENERGIA_2$$

$$PCI_{12} \cdot V_1 + PCI_{12} \cdot V_2 = PCI_{AF1} \cdot V_1 + PCI_{AF2} \cdot V_2$$

$$PCI_{12} (V_1 + V_2) = PCI_{AF1} V_1 + PCI_{AF2} V_2$$

Desta forma, é possível obter o valor do PCI do GAF de mistura a ser consumido pela equação (10):

$$PCI_{12} = \frac{(PCI_{AF1} \cdot V_1) + (PCI_{AF2} \cdot V_2)}{(V_1 + V_2)} \quad (10)$$

### 3.4.2 Determinação da melhor forma de queima do GAF de maneira a mantê-lo com um PCI alto e constante

De posse das equações de balanço de massa e energia, o próximo passo é a realização de simulações em condições reais de operação do sistema de distribuição do gás de alto-forno. Nestas simulações, pretende-se calcular a quantidade de gás a ser queimado nas torres do alto-forno 1 ( $T_3$  e  $T_4$ ) e do alto-forno 2 ( $T_1$  e  $T_2$ ), de forma a controlar o poder calorífico da mistura dos gases, de maneira a mantê-lo alto e constante.

Conforme já mencionado anteriormente, há duas torres de queima para cada alto-forno cujo objetivo é queimar o GAF de modo a manter o nível do gasômetro entre 60 e 85% de seu volume total. Este GAF é armazenado no gasômetro e posteriormente utilizado nas laminações a quente e a frio.

### 3.4.3 Cálculo da quantidade de GLP a ser misturado nos GAF's de maneira a quantificar os ganhos nos equipamentos.

Nesta etapa, calcula-se a quantidade de GLP necessária para se misturar com os GAFs, de forma a serem queimados nos fornos da laminação a quente e a frio, e produzir a energia necessária ao sistema. É importante ressaltar que quanto menor for o PCI do GAF, maior será a quantidade de GLP consumido e, conseqüentemente, maior o custo operacional.

Todas as variáveis coletadas nos fornos foram mantidas constantes. Por meio de uma planilha, no software Excel, foi calculado as seguintes variáveis:

- Fração da energia de GLP na mistura.
- Fração da energia do GAF na mistura.
- PCI da mistura.
- Energia do ar.
- Energia dos combustíveis (GLP e GAF).
- Energia total.
- Energia da fumaça.
- Energia útil.
- Fração de GAF na energia útil.
- Fração de GLP na energia útil.
- Rendimento de combustão.
- Relação de ar por gás combustível.
- Relação de fumaça por gás combustível.

Para quantificar os ganhos do projeto em cada forno e garantir que o benefício está sendo quantificado somente pelo aumento da energia do GAF, foi calculado o percentual de aumento da energia útil, com o aumento do PCI do GAF, que, em contrapartida, reduz os consumos de GLP e GAF na mesma proporção, para as seguintes condições:

- **Condição 1** - Sistema operando com a queima do gás do alto-forno 2. O sistema operou desta maneira no período de março de 1996 a abril de 2004. Os sifões n°1, n°2 e da entrada do gasômetro ( $S_e$ ) abertos de forma que os fornos queimavam o gás do alto-forno 2. As torres ( $T_1$  e  $T_2$ ) funcionando



para queimar o gás do alto-forno 1, de forma a controlar o nível do gasômetro.

- **Condição 2** - Sistema operando com a queima de mistura de gás do alto-forno. Operou desta maneira no período de abril de 2004 a dezembro de 2006. Sifão n°1 e entrada do gasômetro ( $S_e$ ) aberto, e sifão n°2 fechado de forma que os fornos das laminações queimavam o gás de mistura dos altos-fornos. As torres funcionando para queimar o gás do alto-forno 2 e controlando o nível do gasômetro.
- **Condição 3** – Sistema operando com a queima da mistura dos gases do alto-forno. Operou desta maneira no período de janeiro de 2007 até a data atual. Sifão n°2 e entrada do gasômetro fechados, e sifão n°1 aberto de forma que os fornos das laminações queimavam o gás de mistura dos altos-fornos. As torres funcionando para queimar o gás do alto-forno 2 e controlar o nível do gasômetro.

O resumo das condições analisadas é encontrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Resumo das três condições analisadas na distribuição do gás de alto-forno

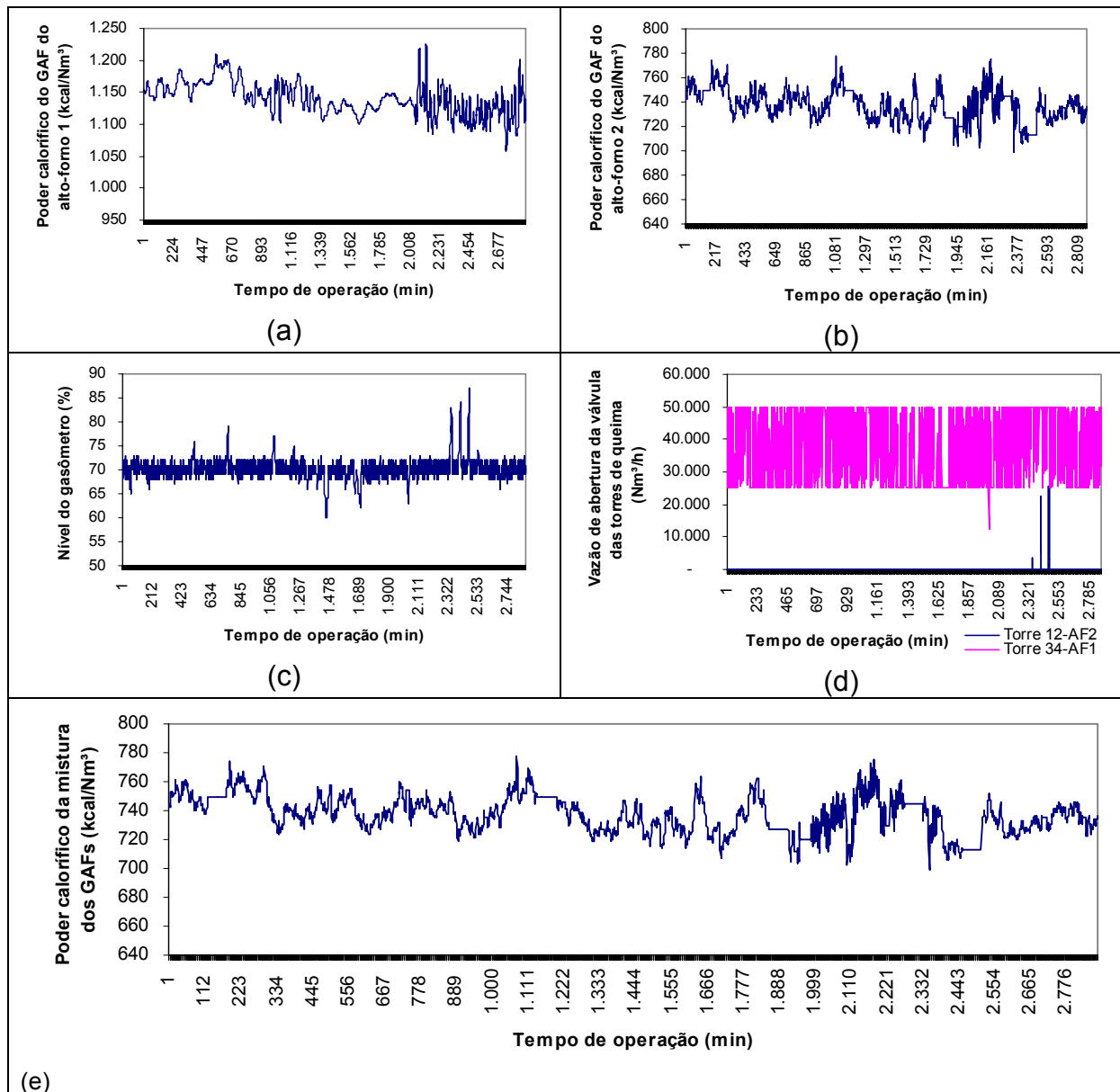
Distribuição do GAF	PCI médio Kcal/Nm <sup>3</sup>	GAF de mistura		Sifão		Controle do nível do gasômetro / %			
		AF1	AF2	Se	S2	T1	T2	T3	T4
Condição 1	750		X	Aberto	Aberto	85	80	70	60
Condição 2	850	X	X	Aberto	Fechado	60	70	80	85
Condição 3	950	X	X	Fechado	Fechado	60	70	80	85

#### 4 RESULTADO E DISCUSSÃO

São apresentados a seguir os comportamentos: do PCI do alto-forno 1, PCI do alto-forno 2, nível do gasômetro, vazão de abertura das válvulas para as torres de queima dos dois alto-fornos e o PCI de mistura nas três condições ilustradas na Tabela 1 em função do tempo de simulação.

##### Condição 1

A Figura 2 ilustra o sistema de distribuição de GAF utilizando apenas o gás de alto-forno 2 para utilização nos fornos da laminação de planos.



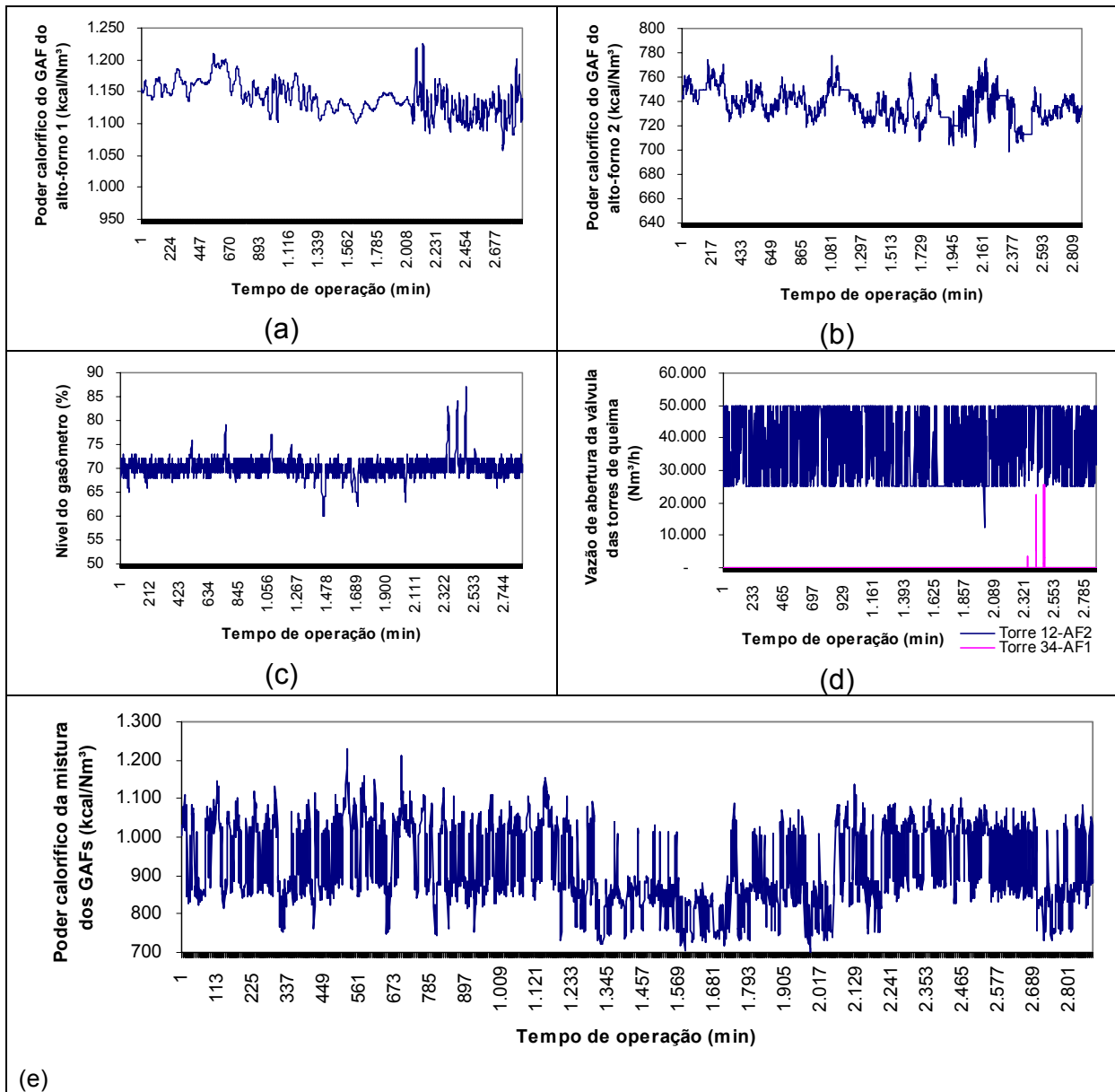
**Figura 2.** Dados de operação da condição 1 em função do tempo. (a) poder calorífico do GAF do alto-forno 1; (b) PCI do GAF do alto-forno 2; (c) nível do gasômetro; (d) vazão de abertura da válvula das torres de queima 1 e 2 do AF2 e 3 e 4 do AF1 e (e) poder calorífico da mistura dos gases.

Pode-se observar nos gráficos da Figura 2 que o poder calorífico da mistura é extremamente baixo e este também apresenta flutuações em seu PCI, valor médio de 750kcal/Nm<sup>3</sup> com variação de mais ou menos 50kcal/Nm<sup>3</sup>. Isto se deve à queima nas torres 3 e 4 de todo o gás do alto-forno 1, que possui um PCI médio de 1.150kcal/Nm<sup>3</sup>. Este sistema não aproveita a potencialidade da queima do gás do alto forno a carvão vegetal que tem o PCI muito mais elevado que o do alto-forno a coque. Entretanto, devido a maior homogeneidade do coque, o gás gerado no alto-forno é mais estável.

### Condição 2

Nesta condição o sistema já opera com mistura de GAF's sem controle do PCI. O nível do gasômetro é controlado pelas torres de queima que operam prioritariamente

com GAF do alto-forno 2. Os resultados de simulação desta condição podem ser observados na Figura 3.



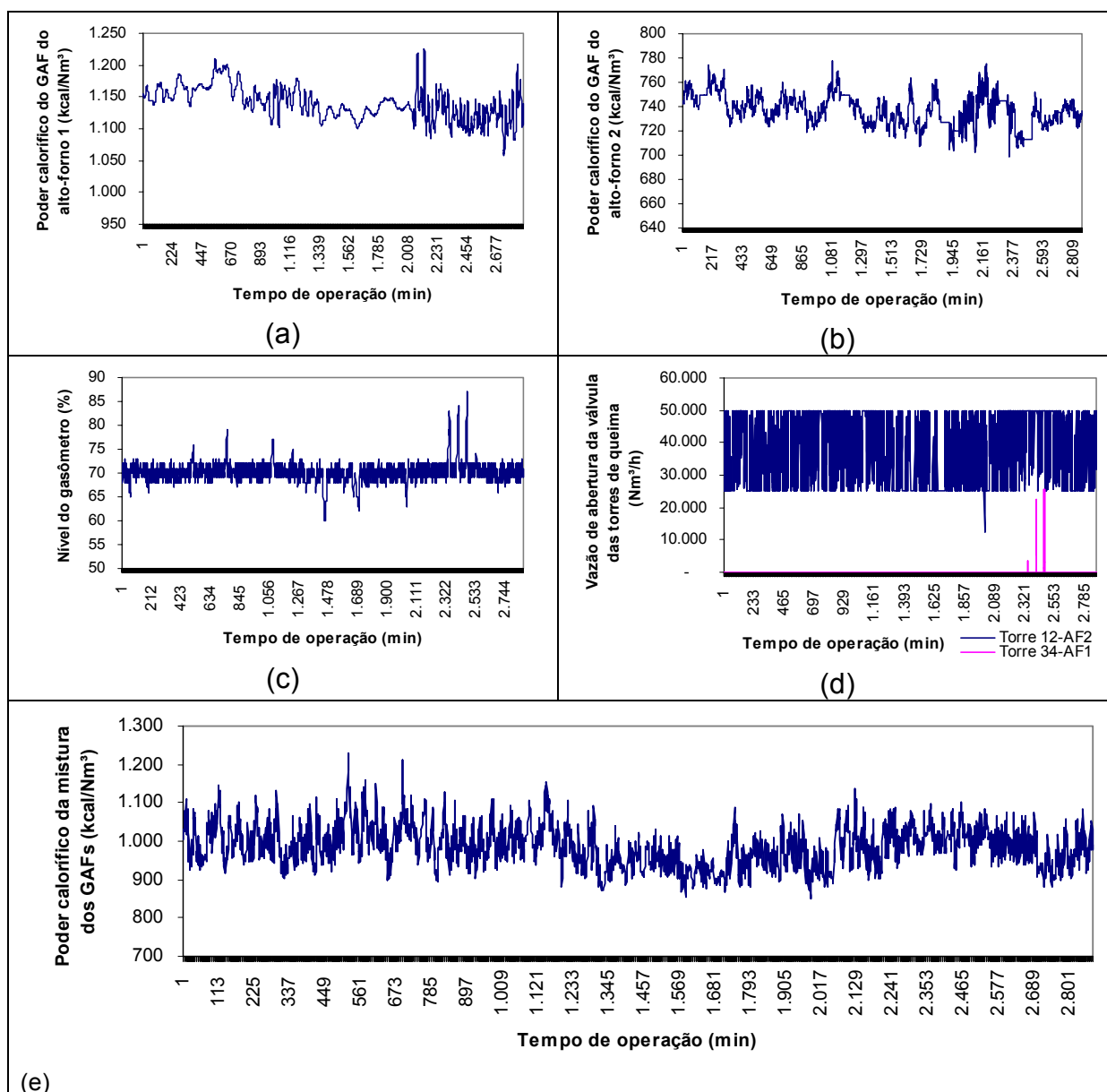
**Figura 3.** Dados de operação da condição 2 em função do tempo. (a) poder calorífico do GAF do alto-forno 1; (b) PCI do GAF do alto-forno 2; (c) nível do gasômetro; (d) vazão de abertura das válvulas das torres de queima 1 e 2 do AF2 e 3 e 4 do AF1 e (e) poder calorífico da mistura dos gases.

Nos gráficos da Figura 3 o poder calorífico da mistura é alto apresentando grandes flutuações em seu PCI com valor médio de  $850 \text{ kcal/Nm}^3$ , variando de  $750 \text{ kcal/Nm}^3$  a  $1.250 \text{ kcal/Nm}^3$ . O gasômetro nesta situação era alimentado pelo gás do alto-forno 1 e a caldeira utilizava preferencialmente gás do alto-forno 1, sem redução no consumo de óleo combustível que é utilizado somente para piloto em caso de disponibilidade de GAF. O PCI do gás de mistura atinge  $1.250 \text{ kcal/Nm}^3$  quando as torres 1 e 2 abrem 100% queimando todo gás do alto-forno 2. Esta situação ocorre quando os consumos de GAF da usina e dos *cowpers* do alto-forno 1 diminuem e os consumos dos *cowpers* do alto-forno 2 aumentam. O PCI do gás de mistura atinge  $750 \text{ kcal/Nm}^3$ , quando uma das torres 3 ou 4 abrem 100% queimando todo gás do alto-forno 1. Tal situação ocorre quando os consumos de GAF da usina e dos

*cowpers* do alto-forno 2 diminuem e os consumos dos *cowpers* do alto-forno 1 aumentam. Esta condição gerava reclamações diárias de variação do PCI do GAF pelos operadores das áreas de laminação. Os fornos paralisaram suas operações no sistema automático e passavam a operar manualmente. Para determinados tipos de aço era solicitado retornar à condição 1, isto é, somente queimar gás do alto-forno 2 nos fornos.

### Condição 3

Nesta condição necessariamente ocorre a mistura do gás do alto-forno 1 com alto-forno 2. As torres (T1 e T2), funcionando para queimar a sobra do gás do alto-forno 2 e controlar o nível do gasômetro. Os resultados desta condição podem ser observados na Figura 4.



**Figura 4.** Dados de operação da condição 3 em função do tempo. (a) poder calorífico do GAF do alto-forno 1; (b) PCI do GAF do alto-forno 2; (c) nível do gasômetro; (d) vazão de abertura das válvulas das torres de queima 1 e 2 do AF2 e 3 e 4 do AF1 e (e) poder calorífico da mistura dos gases.

O valor médio do PCI nesta condição é de 950kcal/Nm<sup>3</sup>, com variação de 900kcal/Nm<sup>3</sup> à 1.200kcal/Nm<sup>3</sup>. O gasômetro, caldeira e fornos da laminação passaram a utilizar 100% do GAF de mistura. Conforme pode ser verificado nos gráficos da Figura 4, esta é a condição operacional atual queimando 99% do gás do alto-forno 1 de PCI médio de 1.150kcal/Nm<sup>3</sup> nos fornos e complementado consumo com gás do alto-forno 2. Esta situação vem sendo utilizada para todos os tipos de aço, desde janeiro de 2007, e a reclamação de variação do PCI do GAF pelos operadores das áreas de laminação de planos que era diária, foi praticamente eliminada.

#### 4.1 Consumo de GLP nas Três Condições de Distribuição de GAF Analisadas

Para efeito de análise, é apresentada na Tabela 2 uma comparação dos consumos de GLP nas três condições operacionais analisadas. É importante ressaltar que o valor do consumo de GLP total nas três condições corresponde à soma dos consumos de GLP na laminação a quente: fornos Walk Beam e Pusher, na laminação a frio de aços inoxidáveis: fornos RB1, RB3 e RB4 e na laminação a frio de aços silícios: forno RB2.

**Tabela 2.** Consumo de gás liquefeito de petróleo nas três condições de distribuição de gás de alto-forno analisada

Condição	Consumo de GLP / kg/ano			Total
	Laminação a quente	Laminação a frio de aço inox	Laminação a frio de aço silício	
1	23.401.158	15.931.679	2.026.477	41.359.314
2	22.918.389	15.348.658	1.921.959	40.189.007
3	22.474.033	14.846.918	1.832.013	39.152.965

Fonte: Relatório do consumo de fluidos da ArcelorMittal Inox Brasil

Pode-se observar que na condição 3 ocorre o menor consumo de GLP, este menor valor é atribuído à maior energia fornecida com o aproveitamento máximo do gás do alto-forno 1 na mistura, conforme pode ser verificado na Figura 4. Verificou-se também que a condição 1 é a que apresenta o maior consumo de GLP. Tal comportamento é evidência da menor energia fornecida com a utilização do gás do alto-forno 2 para consumo e queima do gás de alto-forno 1 em torres, como pôde ser verificado na Figura 2. Todas as memórias de cálculo do consumo de GLP para as três condições estão detalhadas no Anexo A.1.

A economia total de GLP para a condição 3 foi de 2.206.349kg/ano quando comparado ao consumo da condição 1. Esta redução equivale a um consumo de 167.719 botijões de 13kg, que corresponde a um abastecimento de uma cidade com 14.143 residências (considerando que cada residência consome 1 botijão por mês), redução de custo de R\$ 5.770.452,04/ano para um preço de GLP a R\$ 2,62/kg (preço de botijão de 13 kg dia 20/10/07). Foi considerado o preço do GLP em botijão de 13 kg para uso doméstico, haja vista que o preço do GLP adquirido pela ArcelorMittal Inox Brasil não tem autorização para ser divulgado.

## 5 CONCLUSÃO

Conclui-se que na condição 3 ocorre o menor consumo de GLP gerando uma economia anual de 2.206.349 kg/ano quando comparado ao consumo da condição 1. Ocorreu redução de custo de R\$5.770.452,04/ano para um preço de GLP a R\$2,62/kg (preço de botijão de 13 kg dia 20/10/07). O projeto também proporcionou uma economia de 3.600 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano que deixou de ser emitida para atmosfera.

O custo padrão da ArcelorMittal Inox Brasil que até 2004 era orçado para o GAF 750kcal/Nm<sup>3</sup> e em 2008 está orçado 900kcal/Nm<sup>3</sup>, sendo que, o realizado de jan/08 a abr/08 está em 980kcal/Nm<sup>3</sup>, comprovando a eficiência do trabalho e resultados superiores aos especificados neste relatório.

## Agradecimentos

As seguintes pessoas também fazem parte deste trabalho: Elson Claudino Gomes, Geraldo Leite Marciano, Vonair Raimundo Mendes, José Augusto do Nascimento, Arthur Machado, Elpídio José Guerra, Cláudio Martins Moreira, Luiz Roberto Santuzzi, Ronei Soares de Oliveira, Antonio Maria Cardoso, João Batista de S. Gomes, Carlos Magno Metzker, Tales Wallace Souza, Antônio Turíbio de Melo, Zélio Cosme Damaceno, Marcelo Araújo Martins, Gil Ney Chaves Ulhoa, Marcos Antônio Araújo, Paulo Roberto Vitor, Paulo Henrique dos Santos, Valdomiro Crispim Machado, Ailton dos Santos Barbosa, Silvan Souza e Silva, Robson Day Faria, Antonio Flávio Dias, Renato Drumond Guerra, Sólon de Araújo, Marco Antonio Fraga Coura, Ronaldo Linhares de Oliveira, Sebastião de Moraes Miranda, Fernando Lopes Latorre, Vagner Ferreira de Oliveira, e equipes: Distribuição de Fluidos, Operação, Controle de Processo, Metalurgia, Manutenção, Engenharia, Automação, Instrumentação e Forneiros de todas as áreas da ArcelorMittal Inox Brasil. Somente por falta de espaço as pessoas e equipes citadas não foram inseridas na página inicial.

## REFERÊNCIAS

- 1 JACOMINO, V.M.F., CASTRO, L.F.A., RIBEIRO, E.D.L., LEÃO, M.M.D., SOUZA, C.M., GOMES, A.M., ALMEIDA, M.L.B., LOPES, L.E.F. Minas Ambiente; controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal Projeto Minas Ambiente. 1.ed. Belo Horizonte: SEGRAC Editora e Grafica Limitada, 2002. 302p.
- 2 MEDEIROS, F. T. P., FILETI, A. M. F., CUNHA, A. P. Desenvolvimento de um modelo de predição de condições operacionais de altos-fornos siderúrgicos com base em redes neurais artificiais.. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP, 2006. 134p. (Tese Doutorado em Engenharia Química).