



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

MODELO DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM
FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS PARA
LAMINAÇÃO

EDUARDO SÉRGIO DA SILVA GONÇALVES

Belo Horizonte, 03 de maio de 2011

EDUARDO SÉRGIO DA SILVA GONÇALVES

**MODELO DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM
FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS PARA
LAMINAÇÃO**

~~Dissertação~~ apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Mautone Barros

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2011



UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

MODELO DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO DE TARUGOS PARA LAMINAÇÃO

EDUARDO SÉRGIO DA SILVA GONÇALVES

Dissertação defendida e aprovada em 03 de maio de 2011 pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de concentração de Calor e Fluidos.

Prof. Dr. José Eduardo Mautone Barros – UFMG – Orientador

Dr. Joaquim Gonçalves Costa Neto – ArcelorMittal Monlevade – Examinador

Dr. José dos Reis Vieira de Moura Jr. – ArcelorMittal Brasil – Examinador

Prof. Dr. Luís Machado – UFMG – Examinador

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Bernardo Augusto, para que sirva de estímulo para enfrentar os inúmeros obstáculos que a vida ainda vai lhe proporcionar. À minha querida namorada e mãe do meu filho, Daniela, pela paciência durante todo o processo dos meus trabalhos e apoio na realização deste sonho. Aos meus pais, José Pedro e Lúcia Helena, pelo exemplo, ensinamentos e amor presentes em todos os momentos da minha vida. Aos meus irmãos Thales, Igor e Fernanda pelas constantes palavras de otimismo. Ao Toninho e à Dona Lena, pela presença marcante e pela ajuda na nossa luta diária.

AGRADECIMENTOS

À ArcelorMittal na pessoa dos Gerentes Maurício Soares e Expedito Felício pela credibilidade e oportunidade oferecida na execução das atividades.

Ao Gerente de Engenharia Vicente Aleixo, principal responsável pela disponibilização de recursos, liberações nas horas de aperto e humanismo diante de situações de stress nas fases mais complicadas do trabalho.

Ao Analista de Automação Luciano Crispim pelas discussões e orientações sobre o funcionamento do forno e de seus componentes.

Ao Doutor em Engenharia Mecânica José dos Reis pelas inúmeras orientações durante a execução do trabalho e edição do texto.

Ao Mestre em Engenharia Mecânica Alfeu Wiermann pelas ideias, orientações e contribuições.

Ao Mestre em Engenharia da Energia Luís Flávio pelas trocas de experiências e ajuda na formatação do trabalho.

Ao Doutor em Engenharia Metalúrgica Joaquim Costa pela revisão do trabalho e pelos conselhos.

Ao Coordenador do Forno Davy Lander Monteiro pela ajuda na realização dos testes e pela disponibilidade sempre que foi solicitado.

Ao Engenheiro de Produção Leandro Belisário pela grande ajuda na elaboração do programa computacional.

Ao Doutor em Física Francisco Boratto pela ajuda na execução das fórmulas mais complicadas do MS Excel.

Aos Técnicos em Automação Alessandro Alves e Thaíse Araújo pelo auxílio na interface entre o programa computacional desenvolvido e a rede de dados da ArcelorMittal Monlevade.

Ao pessoal do Laminador 1: Gilson Herthel (Gerente), Wilson Gouveia, Gesner, Otávio, Luciano Mascarenhas, pela disponibilidade e comprometimento.

Ao Doutor em Engenharia Mecânica, José Eduardo Mautone Barros pela orientação voluntária, presteza, amizade, disposição e profissionalismo.

*"... O tempo é algo que não volta atrás.
Por isso plante seu jardim e decore sua alma,
Ao invés de esperar que alguém lhe traga flores ..."*

Willian Shakespeare

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	viii
LISTA DE TABELAS	x
NOMENCLATURA	xi
RESUMO.....	xiv
1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA	21
3.1 Caracterização da empresa estudada	21
3.2 A Laminação	22
3.3 O Forno de Reaquecimento de Tarugos	24
3.4 Sistema de controle do forno.....	31
3.5 Características dos reagentes.....	35
3.6 Relevância do estudo	37
4 METODOLOGIA.....	39
4.1 O Balanço de Energia e a Combustão dos Gases	39
4.2 Cálculo das reações de combustão	41
4.2.1 Percentual volumétrico que compõe a mistura dos reagentes	41
4.2.2 Cálculo Estequiométrico.....	44
4.3 Cálculo das energias envolvidas	45
4.3.1 Entalpia dos reagentes	45
4.3.2 Recuperadores de calor	46
4.3.3 Perdas	53
4.3.4 Formação de carepa	54
4.3.5 Temperatura de desenformamento dos tarugos	55
4.3.6 Função objetivo final	57
4.4 Implementação do modelo.....	58
4.5 Ajuste do modelo	59
5 RESULTADOS E ANÁLISES.....	66
6 ANÁLISE DE ERROS: UMA DISCUSSÃO	81
7 CONCLUSÃO	85
8 ABSTRACT	89
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma macro dos processos da ArcelorMittal Monlevade.....	21
Figura 2 – Esquema do Forno de Reaquecimento de Tarugos do TL1	25
Figura 3 – Variação do calor disponível nos gases de exaustão em função do volume de oxigênio no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de CH ₄	27
Figura 4 – Variação do volume dos componentes nos gases de exaustão em função do volume de oxigênio no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de CH ₄	27
Figura 5 – Variação da temperatura adiabática de chama para diversas concentrações de oxigênio presentes no gás oxidante em uma mistura O ₂ /CH ₄	28
Figura 6 – Distribuição das zonas do Forno Davy – vista superior.....	29
Figura 7 – Distribuição dos termopares no Forno Davy	32
Figura 8 – Diagrama do sistema de controle de combustão do forno	34
Figura 9 – Variação do PCI do GAF – 2010.....	35
Figura 10 – Principais entradas e saídas de energia do forno.....	40
Figura 11 – Economia de combustíveis devido ao preaquecimento do ar	47
Figura 12 – Esquema dos recuperadores de calor e respectivos termopares.....	47
Figura 13 – Fluxograma do programa.....	58
Figura 14 – Diagrama esquemático do percurso das variáveis do modelo computacional.....	59
Figura 15 – Temperatura do ar após passagem pelo recuperador de calor de ar.....	60
Figura 16 – Temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de ar.....	60
Figura 17 – Temperatura do GAF após passagem pelo recuperador de calor de GAF.....	61
Figura 18 – Temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de GAF.....	61
Figura 19 – Temperatura dos tarugos e média do forno calculado pelo programa	62
Figura 20 – Variação do ritmo de produção do forno	66
Figura 21 – Variação do consumo de combustíveis.....	67
Figura 22 – Variação do consumo de comburentes	67
Figura 23 – Variação da vazão mássica dos produtos da combustão.....	68
Figura 24 – Variação da composição química do GAF na base seca.....	68
Figura 25 – Composição da mistura de combustíveis (GAF + GN) – base úmida	69
Figura 26 – Variação da composição química do ar enriquecido na base úmida.....	69
Figura 27 – Variação da umidade absoluta do ar atmosférico	70
Figura 28 – Variação do excesso de ar.....	70
Figura 29 – Variação da relação ar/combustível real e estequiométrica	71
Figura 30 – Variação da composição química dos produtos da combustão.....	71
Figura 31 – Variação das entradas de energia.....	72
Figura 32 – Variação das saídas de energia	73
Figura 33 – Variação das temperaturas de saída dos tarugos e média do forno.....	74
Figura 34 – Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de ar – medido x calculado.....	74

Figura 35 – Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado	75
Figura 36 – Variação da temperatura do ar após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado	75
Figura 37 – Variação da temperatura do GAF após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado	76
Figura 38 – Variação da efetividade dos recuperadores de calor	76
Figura 39 – Variação do rendimento do forno	77
Figura 40 – Balanço energético global simplificado do forno	78
Figura 41 – Parcela de contribuição dos principais reagentes no custo de aquecimento	79
Figura 42 – Relação entre as temperaturas medidas e calculadas para o ar e para o GAF após passagem pelos recuperadores de calor	82
Figura 43 – Relação entre as temperaturas medidas e calculadas para os produtos da combustão após passagem pelos recuperadores de calor	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	41
Tabela 2	44
Tabela 3	80

NOMENCLATURA

Símbolos:

\dot{Q}_{ar}	Calor recuperado pelo ar no Recuperador de Calor de Ar [MW]
\dot{Q}_{GAF}	Calor recuperado pelo GAF no Recuperador de Calor de GAF [MW]
$\dot{H}_{Reagentes(285,15K)}$	Calor sensível dos reagentes a 298,15 K [MW]
$\dot{H}_{Produtos}$	Calor sensível dos produtos da combustão após as trocas de calor do processo [MW]
$\dot{Q}_{Tarugos}$	Energia absorvida pelos tarugos no processo de aquecimento [MW]
\dot{Q}_{Perdas}	Energia “absorvida” pelas perdas do processo [MW]
\dot{Q}_{Carepa}	Energia liberada pela carepa durante a sua formação [MW]
$\dot{Q}_{Recuperador}$	Calor cedido pela fumaça para o ar e para o GAF [MW]
$\dot{Q}_{fumaça}$	Calor perdido pela fumaça nos recuperadores [MW]
\dot{Q}_{loss}	Calor perdido pelos recuperadores de calor [MW]
\dot{Q}_{forno}	Calor transferido entre o forno e os tarugos [MW]
\dot{Q}_P	Calor perdido por outras fontes [MW]
$\dot{H}_{Produto(Acum.)}$	Entalpia dos produtos da combustão acumulados dentro do forno [MW]
$\dot{H}_{Produto(out)}$	Entalpia dos produtos da combustão que estão saindo do forno [MW]
$\dot{H}_{Produto(in)}$	Entalpia dos produtos da combustão que estão entrando do forno [MW]
$\dot{Q}_{Tarugo(Acum.)}$	Energia absorvida pelos tarugos que estão dentro do forno [MW]
h	Entalpia [J/kg.K]
U_{abs}	Umidade absoluta [g/Nm ³]
$AR / COMB.$	Relação ar/combustível [Adimensional]
$\%Excesso$	Excesso de ar na reação de combustão [%]
\dot{V}	Vazão volumétrica [Nm ³ /h]
h_i^0	Entalpia do componente i [J/kmol]
R	Constante universal dos gases [J/kmol.K]

T	Temperatura [K]
a_i e b_i	Coefficientes específicos para cada componente do gás [Adimensional]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/h]
$T_{f(in)}$	Temperatura da fumaça na entrada do recuperador de calor
c_p	Calor específico a pressão constante [J/kg.K]
c_v	Calor específico a volume constante [J/kg.K]
γ_f	Razão de calores específicos [Adimensional]
μ	Viscosidade [Pa.s]
$\phi_{eq.}$	Diâmetro equivalente [m]
q_{max}	Taxa máxima de transferência de calor [MW]
C_{min}	Capacidade calorífica mínima [MW/K]
C	Taxa de capacidade de calor [MW/K]
ε	Efetividade dos recuperadores de calor [Adimensional]
U	Coefficiente total de dissipação de calor [J/m ² .h.K]
A	Área [m ²]
Nu	Número de Nusselt [Adimensional]
Re	Número de Reynolds [Adimensional]
Pr	Número de Prandtl [Adimensional]
h_x	Coefficiente de transferência de calor por convecção
x	Comprimento [m]
k	Coefficiente de condutividade térmica [W/m K]
m	Massa [kg]
ρ	Densidade [kg/Nm ³]
P	Pressão [Pa]
n_i	Porcentagem de cada componente do gás [%]
M_i	Massa molar de cada componente [kg/kmol]

Sufixos:

<i>Dry</i>	Composição na base seca
<i>Wet</i>	Composição na base úmida
<i>In</i>	Entrada
<i>Out</i>	Saída

Abreviações:

<i>csv</i>	Comma-Separated Values
JANAF	Joint Army, Navy and Air Force
PIMS	Plant Information Management System
GAF	Gás de Alto Forno
GN	Gás Natural

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo matemático computacional capaz de simular o processo de aquecimento de tarugos de aço no interior de um forno de reaquecimento para laminação. A metodologia proposta simula o processo de combustão, calculando as energias de entrada, de saída e as perdas inerentes ao processo. O algoritmo computacional de simulação do forno permite ao usuário a reprodução do processo de combustão a partir das vazões medidas dos reagentes na entrada e de suas respectivas composições e, a partir de então, é calculada a composição dos produtos através de um modelo de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta, a uma equação de equilíbrio químico, para misturas ricas. A temperatura de desenformamento dos tarugos é calculada por meio da determinação do coeficiente de transferência de calor entre o ambiente do forno e os tarugos utilizando, para isso, o princípio da convecção forçada com escoamento turbulento sobre uma placa isotérmica. A energia do ar e do GAF recuperada após a passagem pelos recuperadores de calor é calculada através de modelos de regressão desenvolvidos empiricamente e os rendimentos de tais recuperadores são determinados pelo método da efetividade de NUT (Número de Unidades de Transferência). As perdas pela água de refrigeração e pelas paredes externas do forno são determinadas através de modelos simplificados e as outras perdas foram calculadas seguindo um modelo de regressão empírico no qual foram utilizados dados medidos no processo. Para solucionar a equação da conservação da energia no processo, foi adotado o método de busca de raízes de Newton-Raphson. A simulação permite calcular: o balanço térmico instantâneo do processo, a eficiência do forno e dos recuperadores de calor, a composição química da mistura dos reagentes e dos produtos da combustão; o excesso de ar utilizado na reação; a temperatura dos reagentes e dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor; de desenformamento dos tarugos, dentre outras variáveis importantes para o gerenciamento do processo. O modelo desenvolvido mostrou-se uma ferramenta eficiente para um gerenciamento mais refinado do processo em tempo real.

Palavras Chave: Balanço Térmico; Forno de Reaquecimento; Consumo de Energia.

1 INTRODUÇÃO

As usinas siderúrgicas vêm buscando cada vez mais maneiras de otimizar os seus processos para manterem-se competitivas no mercado. Estes esforços são direcionados quase sempre a três fatores básicos: redução de custo; aumento da segurança do processo e redução dos impactos ambientais.

O consumo de energia, o controle da atmosfera ideal para o aquecimento e a temperatura de saída dos tarugos em um forno de laminação estão diretamente ligados à qualidade dos produtos para o atendimento aos requisitos mínimos exigidos pelos clientes. Em contrapartida, a economia de energia está relacionada à competitividade da empresa, contribuindo fortemente no preço final dos produtos.

O termo economia em um forno de reaquecimento se refere ao custo de aquecimento por unidade de massa de produto acabado disponível para venda (TRINKS e MAWHINNEY, 1975). O custo do aquecimento não inclui somente o custo do combustível, mas também o custo de operação do forno, os custos de manutenção, o custo de geração de uma atmosfera protetora e o custo dos produtos não conforme.

O consumo específico de energia em um processo de laminação é, se não a principal, uma das variáveis mais visadas pelos gerentes e serve de comparação entre processos semelhantes de outras usinas em busca da maior eficiência do processo. A economia de energia tem de ser feita seguindo critérios que favoreçam a máxima produtividade do processo, buscando o mínimo tempo de permanência dos tarugos dentro do forno e a melhor homogeneização da temperatura do material a ser laminado.

A atmosfera protetora é baseada principalmente no teor de oxigênio presente nos produtos da combustão no interior do forno. No caso estudado, existem procedimentos internos para o teor de oxigênio ideal para cada tipo de material processado a fim de se evitar problemas devido a reações de oxidação no material, geração de carepa e facilidade de sua remoção, descarbonetação (redução do teor de carbono na camada superior do aço), dentre outros.

A temperatura de saída dos tarugos tem influência direta em diversos aspectos no processo de laminação dos aços como: resistência do material à deformação; carga, torque e potência de laminação; velocidade de laminação; defeitos superficiais; microestrutura e propriedades físicas do material; acabamento do produto final, etc.

Com tantos fatores diferentes no processo de aquecimento de tarugos para laminação, o gerenciamento do maior número possível de variáveis torna-se determinante na qualidade do aquecimento e na tomada de decisões.

O foco deste trabalho está na aplicação de uma metodologia para a simulação em tempo real do processo de aquecimento de tarugos para laminação de uma linha de produção de fio máquina da ArcelorMittal Monlevade. O método envolve os volumes e composição dos combustíveis e comburentes utilizados, o ritmo de produção e as perdas térmicas devido a diversos fatores tais como: aberturas no forno, refrigeração, convecção pelas paredes externas do forno, etc. Espera-se, através da metodologia de cálculo do balanço térmico, quantificar, em tempo real, as energias de entrada e de saída envolvidas no ciclo de aquecimento de tarugos para laminação. A partir desta simulação será possível propor ações que aperfeiçoem a operação do forno e aumentem o controle sobre este, melhorando a sua eficiência e reduzindo a variabilidade no processo para atender melhor os itens de controle e de qualidade.

O balanço térmico aqui tratado foi calculado via modelagem matemática através do Scilab 5.2.0, um software aberto de simulação, e validado com os dados reais medidos e registrados no sistema interno de gerenciamento de variáveis PIMS (*Plant Information Management System*). Este sistema oferece um registro preciso de todos os dados necessários para a realização do cálculo do balanço térmico.

Assim, o objetivo final é obter um panorama do comportamento do forno com boa precisão e representabilidade, de forma a obter uma ferramenta de gerenciamento do processo. Como benefícios, além dos citados anteriormente, espera-se proporcionar uma maior rapidez na detecção de falhas em equipamentos do forno e um aumento da efetividade na solução dos problemas por parte dos operadores e técnicos no sentido de aumentar as ferramentas disponíveis e direcionar seus esforços em pontos de maior relevância.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na pesquisa bibliográfica foram encontrados trabalhos com variadas metodologias para o cálculo do balanço térmico de fornos. Embora os processos sejam similares, cada forno apresenta suas peculiaridades, não sendo válida a aplicação direta de uma metodologia para o cálculo do balanço térmico desenvolvido em outro processo.

CARVALHO, 2003 apresenta um modelo computacional capaz de simular e controlar o processo de recozimento de tiras de aço silício no interior de um forno tipo túnel. Este software permite ao usuário reproduzir o processo de combustão, prevendo a composição, vazão e massa das fumaças a partir de parâmetros medidos no forno como vazão, pressão, temperatura e composição dos gases combustíveis. Além disto, o programa calcula a temperatura adiabática de chama e a temperatura de *set-point* no interior de cada zona do forno. O usuário também tem acesso à distribuição de temperatura na tira de aço em qualquer instante ou posição no interior do forno. Para se garantir a precisão do modelo, o usuário deve calibrar o software determinando o rendimento do recuperador de calor de ar, do forno e do processo de combustão a partir de parâmetros medidos no forno. Ressalta-se que a eficiência do software está relacionada à qualidade de sua calibração.

GORNI et al., 2002, apresentaram uma filosofia de cálculo do balanço térmico periódica em um software desenvolvido em linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) em uma planilha Microsoft Excel. Os dados necessários para o cálculo do balanço térmico do forno são coletados ao longo de um período de tempo suficientemente longo para que os dados sejam compilados de uma condição típica de operação do equipamento, e não eventuais transientes localizados. Neste caso, os dados para o cálculo do balanço térmico são coletados ao longo de um turno de trabalho (8 horas). Apesar de não suportar variações operacionais do forno, o método apresentou bom comportamento no período simulado, mostrando as parcelas de entradas e saídas de calor em função da produção.

ZANG et al., 2002, desenvolveram um modelo completo dividido em três partes, onde a primeira trata de determinar a curva que descreve a ascensão da temperatura da placa de acordo com a temperatura do forno, temperatura de desenformamento e previsão de tempo das placas em cada zona do forno. A segunda parte descreve a relação

entre os *set-points* e a vazão de combustível em cada zona. A terceira e última parte consta de um modelo dinâmico que descreve o comportamento do forno de acordo com a vazão de combustível.

O balanço de energia foi realizado em cada zona separadamente, onde foram feitas as seguintes considerações:

- A temperatura do ar e do gás é uniforme;
- A transferência de calor no forno é principalmente por radiação;
- A relação ar/gás permanece constante;
- O volume de ar e de gás permanece o mesmo após a combustão;
- A direção do fluxo de gases não varia no interior do forno.

Estes três modelos foram implantados em malha fechada de forma a auxiliar no controle de temperatura do forno e apresentaram uma boa resposta dinâmica, apesar dos fatores assumidos que geraram incertezas nos cálculos.

HAUCK e LAIA, 2000, apresentam modelos matemáticos para otimização de processos e cálculo do balanço térmico de fornos de reaquecimento. A metodologia para os cálculos é bem detalhada e permite que sejam considerados diferentes tipos de gases ou óleo combustível. Um balanço térmico completo é apresentado, mostrando detalhadamente as entradas e saídas de energia envolvidas no processo.

Outros trabalhos tiveram foco em estimativas de temperatura dos tarugos ou placas e transferência de calor no interior de fornos, mas na maioria das vezes são feitos cálculos para encontrar diferentes formas de energia envolvidas nos processos de reaquecimento de produtos para laminação.

CHEN et al., 2010, desenvolveram um modelo numérico para prever o tempo de aquecimento de placas e analisar o consumo de energia em um forno de laminação. Foi assumido que a transferência de calor na placa tem um comportamento bidimensional nas direções da largura e do núcleo. O principal meio de transferência de calor para aquecimento das placas foi considerado por radiação. A condução de calor para o cálculo da temperatura do núcleo da placa é descrita por uma equação transiente de difusividade térmica. Foram fixadas as dimensões e o material das placas com suas respectivas características de difusividade, condutividade térmica e calor específico, como forma de simplificação do modelo. O método obteve uma boa resolução, destacando que no

momento em que a placa é inserida no forno, a diferença de temperatura entre a superfície e o núcleo aumenta rapidamente e após a passagem pelo ponto de inflexão, a diferença de temperaturas tende a ser uniforme. O estudo mostrou também que o aquecimento das placas sem a utilização do modelo ocorre em um tempo maior resultando em perda de energia. Embora o modelo tenha demonstrado um bom comportamento diante das simplificações apresentadas, faz-se necessária a avaliação com diferentes tipos de materiais para verificar a robustez do método.

LIU e LI, 2009, apresentaram um método de estimativa do perfil de temperatura das placas ao longo de um forno de reaquecimento de placas para laminação usando o método de volumes finitos. Foram utilizadas as temperaturas de *set point* das zonas de preaquecimento, aquecimento e encharque para a estimativa do comportamento da temperatura das placas. O forno utiliza Gás Natural (GN) e os principais métodos de transferência de calor considerados foram por radiação e condução. O cálculo da equação transiente de condução de calor é discretizado pelo método de volumes finitos e o sistema discretizado é resolvido pelo uso do algoritmo TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*) até que a temperatura das placas satisfaçam os critérios de convergência. Os resultados foram mostrados na forma de tópicos (sem análises gráficas), não permitindo análises por parte do leitor.

WANG et al., 2009, desenvolveram um modelo de simulação numérica para estudar as influências da temperatura do ar preaquecido, da concentração de oxigênio e da temperatura de entrada do combustível nas propriedades da chama e a formação e emissão de NO_x (óxido nítrico) em fornos industriais. O comportamento da turbulência foi modelado com o modelo padrão K- ϵ e a radiação foi tratada com um modelo discreto de radiação ordenada. Foram utilizadas diferentes concentrações de oxigênio no ar de combustão, variando de 2 a 21% v/v junto com o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). Os resultados mostraram que:

- O volume da chama aumenta com a redução da concentração de oxigênio no ar preaquecido, principalmente quando a concentração se encontra abaixo de 10%;
- O perfil de temperatura dos produtos da combustão se torna mais uniforme quando a concentração de oxigênio no ar preaquecido diminui;
- Para qualquer temperatura de entrada do ar e do combustível preaquecidos, o pico de temperatura diminui com a redução da concentração de oxigênio;

- O aumento da temperatura de entrada do combustível resulta na redução das emissões de NO_x , em virtude da melhor distribuição dos reagentes na chama.

Apesar de o estudo ter sido efetuado em um forno com dimensões reduzidas (250 x 250 x 480 mm) e com uma concentração incomum de oxigênio no ar de combustão, os resultados se mostraram satisfatórios. A aplicação deste modelo com concentrações de oxigênio acima de 21% v/v seria interessante para avaliar o comportamento e verificar a aplicação em escala industrial.

3 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE PESQUISA

3.1 Caracterização da empresa estudada

A ArcelorMittal Monlevade é uma usina siderúrgica integrada com capacidade instalada de 1.300.000 toneladas por ano de fio máquina de alta qualidade para diversas aplicações como cordoalhas para pneus, fixadores em geral, eletrodos, lâ de aço, molas, cabos de aço, construção civil dentre outros.

A empresa possui uma mina localizada a 11 km da usina, com capacidade de produção de 1.500.000 t/ano de minério de ferro, uma Sinterização que prepara a matéria prima para a fabricação do ferro gusa com capacidade de 1.750.000 t/ano, um Alto Forno, que recebe o produto sinterizado para a produção do ferro gusa e possui capacidade de 1.120.000 t/ano, uma Aciaria que trata as características químicas do ferro gusa para gerar a matéria prima para a laminação (tarugos de aço) com capacidade de 1.250.000 t/ano e dois laminadores, com capacidade de produção total de 1.300.000 t/ano de fio máquina cujas bitolas podem variar de 5,5 a 44,0 mm. O fluxograma dos processos da ArcelorMittal Monlevade pode ser observado na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma macro dos processos da ArcelorMittal Monlevade
Fonte – ArcelorMittal Monlevade

Como o foco deste trabalho está na laminação, este processo será descrito com maiores detalhes a seguir.

3.2 A Laminação

A laminação consiste em um processo de conformação a partir de um sólido (RIZZO, 2007). A ArcelorMittal Monlevade é composta por dois laminadores sendo internamente denominados Trem de Laminação 1 (TL1) e Trem de Laminação 2 (TL2) com produções nominais de 60.000 e 40.000 toneladas de fio máquina por mês respectivamente.

Os tarugos são produzidos no processo anterior, chamado de Lingotamento Contínuo e possuem a seção quadrada de 155 mm e comprimento que varia entre 9,6 e 12,4 m (ARANTES, 2010). Chegando à área dos laminadores através de mesas de rolos e pontes rolantes, os tarugos são inseridos nos fornos de reaquecimento de ambos os laminadores seguindo uma programação de produção em função das prioridades dos clientes definida pela Gerência Técnica e Planejamento da Produção (GETPP).

Raramente os tarugos são enforados logo após a sua saída da Máquina de Lingotamento Contínuo (MLC) em virtude da dificuldade de se produzir simultaneamente na Aciaria o mesmo tipo de aço a ser laminado, provocada pela grande variedade de produtos fabricados na ArcelorMittal Monlevade. Isto traria uma economia considerável para o processo de reaquecimento de tarugos pelo aproveitamento da energia térmica armazenada nos mesmos no momento do enforamento.

Após serem produzidos na MLC, os tarugos são encaminhados ao Pátio de Controle de Tarugos através de mesas de rolos, onde são acondicionados por meio de pontes rolantes de acordo com sua classificação e ordem de produção. Estas mesmas pontes rolantes abastecem a Mesa Separadora da Laminação, que tem a função de receber os tarugos e garantir o seu alinhamento antes do enforamento, pois, por maior que seja o esforço do operador em depositar os tarugos de forma alinhada, sempre acontece de as pontas dos mesmos ficarem posicionadas fora da linha considerada ideal. A Mesa Separadora é equipada com sensores a laser para que seja feita a medição do comprimento, de modo a impedir o enforamento de tarugos com comprimento maior do que a largura interna do forno. Os tarugos desclassificados são separados automaticamente após a mesa de rolos de enforamento e retornam para o Pátio de Controle de Tarugos. Daí a origem do nome Mesa Separadora.

O movimento de vigas móveis na Mesa Separadora, produzido por um eixo excêntrico acionado por um motor elétrico, permite que os tarugos sejam transportados em direção à Mesa Transportadora *Walking Beam* (Vigas Caminhantes), ao mesmo tempo em que são alinhados através de esbarros localizados nas extremidades das vigas fixas. A mesa Transportadora *Walking Beam* recebe os tarugos da Mesa Separadora e os transporta para a Mesa de Rolos para então serem enfiados.

A etapa de aquecimento inicial da matéria-prima é necessária para que o aço apresente uma alta plasticidade tanto no início quanto no fim do processo de laminação (RIZZO, 2007). Esta elevação de temperatura tem de ocorrer de uma forma segura e homogênea, pois o material a ser laminado não pode submeter os cilindros de laminação a pressões excessivas, ao mesmo tempo em que não deve ser superaquecido de forma a afetar as propriedades físicas, a microestrutura e a forma do produto acabado. Durante o aquecimento, vários parâmetros operacionais devem ser observados, tais como: a atmosfera do forno, que é a composição química dos gases presentes na câmara de combustão; o tempo de permanência dos tarugos dentro do forno; o *pitch* de desenformamento, que é o intervalo de tempo compreendido entre o desenformamento de dois tarugos consecutivos, também chamado de ritmo do forno.

O TL1 da ArcelorMittal Monlevade tem como principais equipamentos: um forno com capacidade de 120 t/h; duas linhas de laminação com 31 cadeiras e velocidade final de 90 m/s; Formador de Espiras Horizontal; sistema de resfriamento com duas caixas d'água; Transportador com mesa de rolos e 14 ventiladores; Formador de Bobinas com distribuidor de espiras; sistema de manuseio automático de bobinas com 30 carros. A primeira etapa da laminação no TL1 são os Desbastadores, que é um conjunto composto por quatro cadeiras de laminação, sendo duas horizontais e duas verticais. Após esta etapa, uma tesoura pneumática corta a ponta posterior do tarugo (cabeça) e eventualmente a ponta anterior (cauda), dependendo do tipo de material processado a fim de evitar imperfeições no produto final. Após esta etapa, o tarugo passa pelo Primeiro Contínuo, que é um conjunto composto de sete cadeiras de laminação e mais uma tesoura pneumática. Logo após, o tarugo passa pelo Segundo Contínuo, que é formado por um conjunto de seis cadeiras de laminação. A partir daí o laminador se divide em duas linhas paralelas, sendo denominadas Linha A e Linha B. As duas linhas são idênticas e cada uma é composta de: um Formador de Laço, que tem a função de direcionar corretamente o tarugo para a entrada na linha; Blocos Pré-Acabador e Pré-Acabador 2, compostos por duas cadeiras de

laminação cada; outro conjunto composto de seis cadeiras de laminação chamado *No Twist*; Bloco Acabador composto de duas cadeiras de laminação; um Formador de Espiras, que como o próprio nome sugere, tem a função de formar espiras com o fio máquina na saída do laminador para facilitar a formação de bobinas e o resfriamento; um Transportador com mesa de rolos e ventiladores que tem a função de fazer o resfriamento controlado do fio máquina e um formador de bobinas. As bobinas do TL1 possuem bitolas que variam de 5,5 a 16 mm com rígidos padrões de tolerância e peso médio de 2.130 kg. A ArcelorMittal Monlevade possui um rigoroso controle de qualidade dos seus produtos através de análises químicas, físicas e metalográficas a fim de garantir a qualidade dos produtos conforme normas internas e exigência dos clientes.

3.3 O Forno de Reaquecimento de Tarugos

O Forno de Reaquecimento de Tarugos é a primeira e uma das principais etapas da laminação, pois é onde acontece o processo de reaquecimento dos tarugos até atingirem as condições ideais para serem laminados.

O Forno do TL1, objeto do presente trabalho e internamente chamado de Forno Davy é do tipo *Walking Hearth* (Soleiras Caminhantes) e é caracterizado pelo aquecimento através da superfície superior da carga, por meio de queimadores de chama longa montados em paredes frontais e distribuídos em quatro zonas de aquecimento. As dimensões internas (dimensões úteis) do forno são 33 m de comprimento e 13,1 m de largura. Sua carga completa é composta de 121 tarugos, espaçados em aproximadamente 100 mm uns dos outros. O deslocamento dos tarugos dentro do forno é feito por soleiras caminhantes sendo 4 fixas e 3 móveis. Nos primeiros 11 m de comprimento do forno existem viradores metálicos refrigerados a água, que tem a finalidade de girar o tarugo durante o percurso dentro do forno para aquecer as suas quatro faces a fim de evitar empenos e auxiliar no aquecimento homogêneo da carga. Nesta região, a cada oito passes o tarugo faz um giro completo em torno do seu eixo. Após esta região, os tarugos são transportados por meio das soleiras planas até a região do desenformamento. O esquema do Forno Davy pode ser observado na Figura 2.

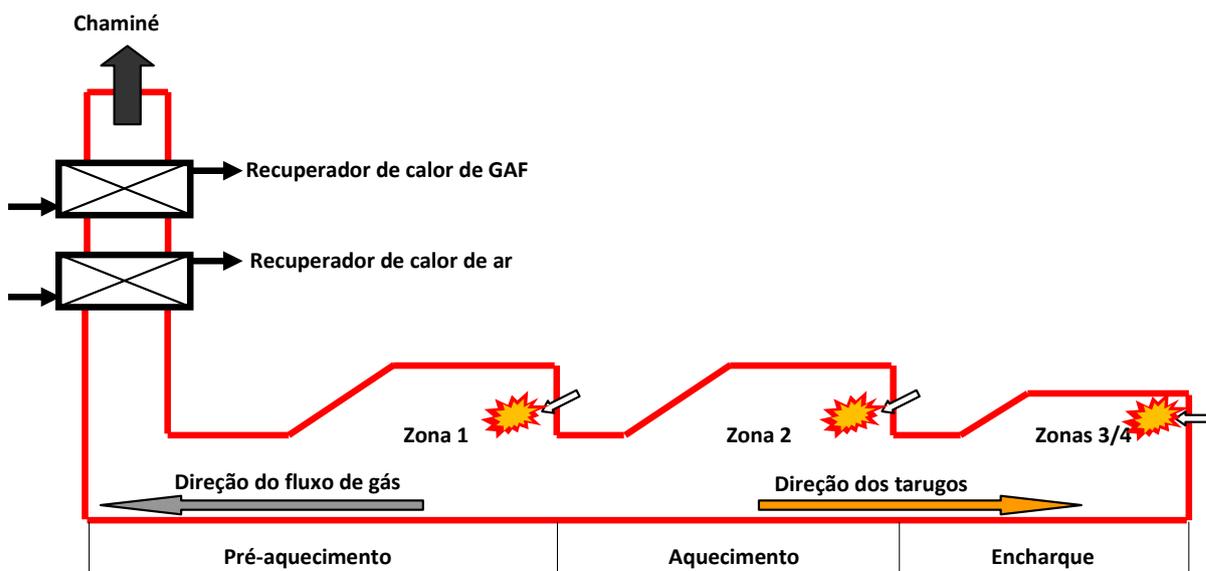


Figura 2 – Esquema do Forno de Reaquecimento de Tarugos do TL1

Os principais dados, segundo o manual do forno Davy são:

- Fabricante: Davy
- Ano de fabricação: 1996 (reformado em 2006)
- Tipo: *Walking Hearth*
- Capacidade nominal de aquecimento: 120 t/h
- Consumo específico de combustíveis: 353,07 kWh/t
- Temperatura máxima dentro do forno: 1260°C
- Formação de carepa: 0,85% da massa do tarugo

A matriz energética do Forno Davy utiliza prioritariamente o GAF preaquecido por meio de um trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado Recuperador de Calor de GAF, localizado no canal de fumaça onde é recuperada parte da energia térmica que seria perdida nos fumos que saem do forno. O Gás Natural é utilizado quando da escassez de GAF e/ou como complementação energética em função do ritmo de operação do forno. Como comburente, é utilizado o ar atmosférico que, assim como no caso do GAF, é preaquecido por meio de outro trocador de calor do tipo correntes cruzadas, denominado Recuperador de Calor de Ar. É utilizado também o oxigênio gasoso com

pureza mínima de 95%, misturado e preaquecido junto ao ar de combustão. Para a segurança do processo, o uso de oxigênio é limitado de forma que o enriquecimento permaneça na faixa de 30% na composição final do ar de combustão.

Conforme BAUKAL, 2003, o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio traz inúmeros benefícios tais como: aumento da produtividade; aumento da eficiência térmica; aumento da temperatura adiabática de chama; melhoria das características da chama; melhoria da estabilidade da chama; redução do volume de gases de exaustão; maior eficiência da transferência de calor; redução de custos com combustíveis; maior flexibilidade do sistema de aquecimento, dentre outros.

O aumento da produtividade ocorre principalmente devido ao aumento da transferência de calor por radiação em função da maior temperatura adiabática de chama. A radiação depende da quarta potência da temperatura absoluta, e do aumento da emissividade da chama em função das maiores concentrações de dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), que são os gases que mais irradiam a chama. Já o nitrogênio não contribui para a radiação da chama e a sua redução causa um aumento da eficiência térmica. Desta forma, é possível aumentar o volume de material a ser processado na câmara de combustão. A redução do volume de nitrogênio também contribui para o aumento da eficiência térmica, em virtude de este gás carregar parte da energia da combustão nos gases de exaustão. A Figura 3 mostra a variação do calor disponível nos gases de exaustão a diferentes temperaturas em função do volume de oxigênio presente no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de metano (CH_4). A Figura 4 mostra a variação do volume dos componentes dos gases de exaustão também em função do volume de oxigênio presente no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de CH_4 .

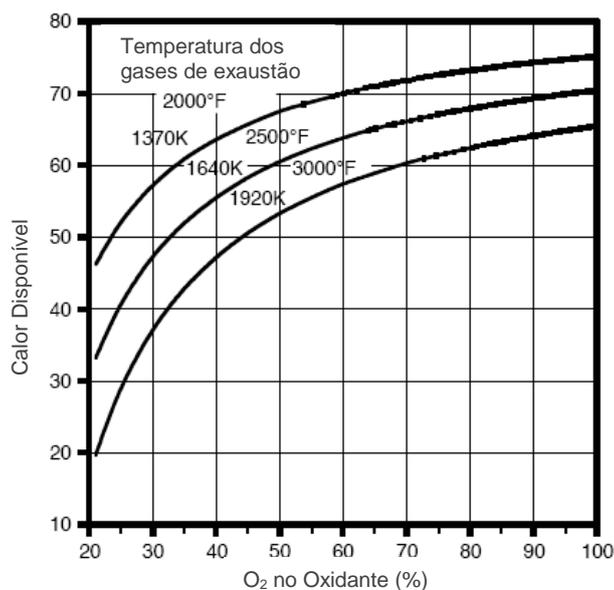


Figura 3 – Variação do calor disponível nos gases de exaustão em função do volume de oxigênio no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de CH_4 .

Adaptado: BAUKAL, 2003

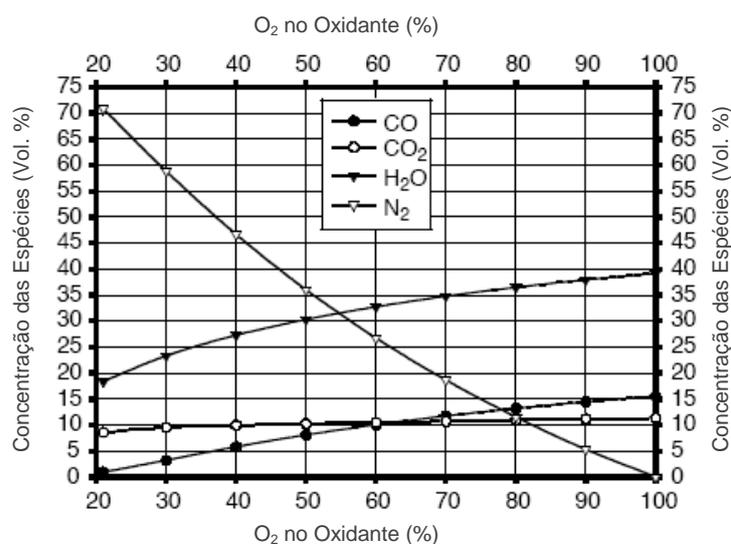


Figura 4 – Variação do volume dos componentes nos gases de exaustão em função do volume de oxigênio no gás oxidante em uma mistura estequiométrica de CH_4 .

Adaptado: BAUKAL, 2003

Na Figura 4, destaca-se a redução da quantidade de nitrogênio que, para o caso da queima de CH_4 é reduzido para um valor menor que 60% em volume, considerando uma concentração de 30% de oxigênio no gás oxidante. Pelo fato de o nitrogênio agir como um diluente da chama, o aumento da temperatura adiabática de chama também é

significativo. A Figura 5 mostra a variação da temperatura adiabática de chama para diversas concentrações de oxigênio presentes no gás oxidante em uma mistura O_2/CH_4 .

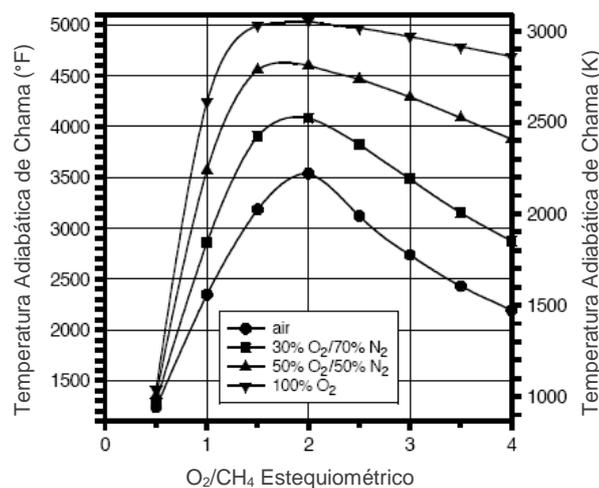


Figura 5 – Variação da temperatura adiabática de chama para diversas concentrações de oxigênio presentes no gás oxidante em uma mistura O_2/CH_4 . Adaptado: BAUKAL, 2003

A melhoria da estabilidade da chama é evidenciada pelo aumento da sua velocidade. O melhor controle da chama evita o superaquecimento do refratário e auxilia nos perfis de fluxo de calor e temperatura dentro da câmara de combustão.

Problemas potenciais também limitam a utilização do oxigênio no enriquecimento do ar de combustão, tais como: superaquecimento; corrosão; aquecimento não uniforme; geração de pontos quentes; redução da transferência de calor por convecção; distúrbios da chama; aumento da emissão de NO_x e retorno de chama pelo queimador.

O superaquecimento pode ser provocado em função da alta temperatura de chama e do aumento do fluxo de calor radiante, o que pode causar a geração de pontos quentes localizados. Se o calor não for apropriadamente distribuído, podem ocorrer danos aos queimadores, materiais refratários e à própria carga do forno. Este aumento de temperatura também propicia a maior formação de NO_x . Outro problema potencial pode ocorrer devido ao aumento da concentração de compostos voláteis na atmosfera do forno devido à remoção do diluente nitrogênio. A redução do volume de nitrogênio também afeta as características da transferência de calor e de massa dentro da câmara de combustão, pois apesar do maior fluxo de calor radiante, em determinadas proporções de enriquecimento, este aumento não é o bastante para suprimir a perda de transferência de calor por convecção.

Distúrbios da chama podem ser causados pela redução da quantidade de movimento em função do menor volume de gases que passam pelos queimadores. O uso de ar enriquecido também pode provocar o retorno da chama pelo queimador devido ao aumento da intensidade das reações de combustão. O retorno da chama pelo queimador ocorre quando a velocidade do gás na saída do queimador é menor do que a velocidade da chama. Desta maneira, o enriquecimento do ar de combustão no forno Davy é limitado a aproximadamente 30%, quando operando com GAF como combustível predominante. No caso de baixa disponibilidade do GAF e conseqüentemente da alta utilização do GN, o enriquecimento com oxigênio é reduzido em função da temperatura das zonas do forno. Outro fator que influi no volume de oxigênio para enriquecimento são limitações impostas por alguns materiais especiais por motivos de haver possibilidade de reações químicas causando alterações na sua estrutura e na qualidade do material.

O forno é dividido em quatro zonas que são dispostas conforme Figura 6:

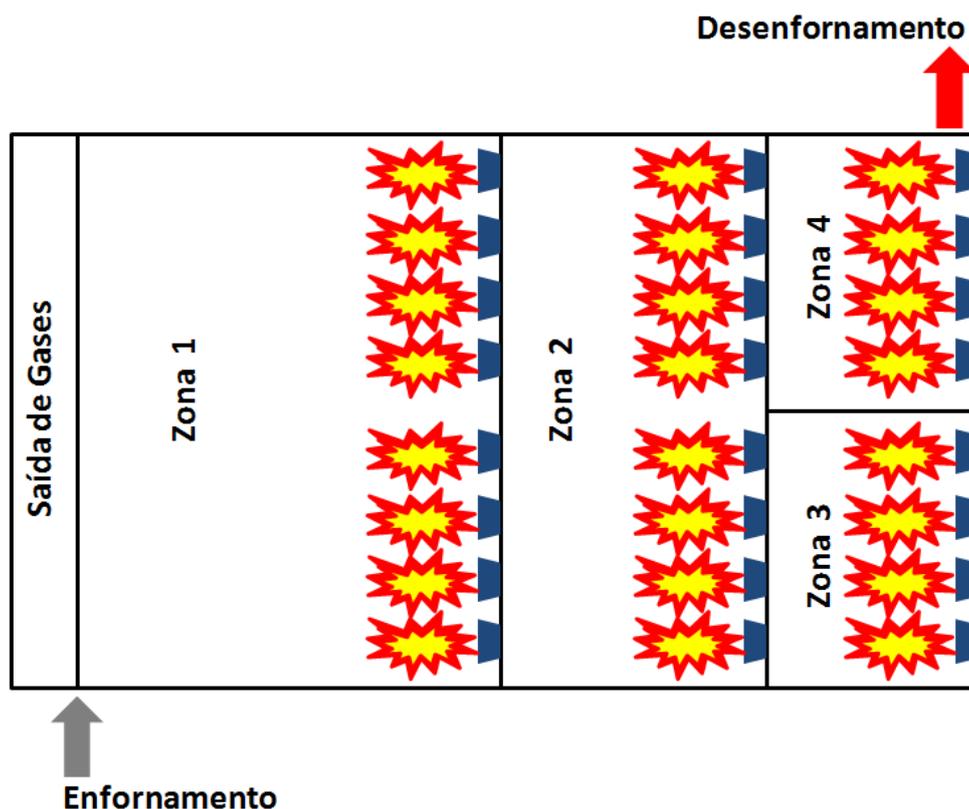


Figura 6 – Distribuição das zonas do Forno Davy – vista superior

As zonas 1 e 2 possuem três termopares do tipo S (Platina/Ródio-Platina) posicionados nas regiões direita, no centro e esquerda para enviarem informações ao

sistema de controle de temperatura do forno. As zonas 3 e 4 possuem um termopar cada e outro na região central entre estas zonas.

Zona 1: Preaquecimento

A zona 1 é a maior zona do forno e compreende a região do enformamento até a primeira parede frontal. Esta zona possui 19,5 m de comprimento e comporta um total de 66 tarugos. Na primeira parede frontal estão instalados oito queimadores de alta velocidade com o fluxo de gases em sentido contrário ao fluxo da carga do forno. Nesta zona existem quatro câmeras instaladas para monitoramento da carga do forno, sendo as duas primeiras responsáveis pela visualização da cabeça e da cauda do tarugo na mesa de enformamento interna do forno. A terceira câmera permite a visualização da carga no centro da região dos viradores metálicos. A quarta câmera monitora a região de transição entre viradores e soleiras planas. As câmeras são necessárias para que o operador faça a inspeção interna da disposição da carga do forno, pois tarugos empenados, desalinhados e/ou espaços vazios podem gerar grandes transtornos à operação.

Zona 2: Aquecimento

A zona 2 compreende a região da primeira parede frontal até a segunda parede frontal. Esta zona possui 7,5 m de comprimento e capacidade para 30 tarugos. Na segunda parede frontal, assim como na zona 1, estão instalados oito queimadores de alta velocidade com o fluxo de gases em sentido contrário ao fluxo da carga do forno.

Zona 3: Encharque – Lado Direito

A zona 3 compreende a região do lado direito do forno entre a segunda e terceira paredes frontal. Corresponde ao lado direito da zona de encharque (cauda do tarugo) e possui 6 m de comprimento com capacidade para 25 tarugos. Nesta zona estão instalados quatro queimadores de alta velocidade com o fluxo de gases em sentido contrário ao fluxo da carga do forno. O principal objetivo desta zona é homogeneizar as temperaturas da superfície e do centro da região da cauda do tarugo. Nesta região está instalada uma câmera que monitora a cabeça do tarugo na mesa de desenformamento.

Zona 4: Encharque – Lado Esquerdo

A zona 4 compreende a região do lado esquerdo do forno e é simétrica à zona 3, possuindo as mesmas dimensões, capacidade de tarugos, número e tipo de queimadores. O principal objetivo desta zona é homogeneizar as temperaturas da superfície e do centro

da região da cabeça do tarugo. Nesta região está instalada uma câmera que monitora a cauda do tarugo na mesa de desenformamento.

3.4 Sistema de controle do forno

De acordo com HAUCK e LAIA, 2000, para o bom desempenho de um forno de reauecimento, são necessários que os seguintes requisitos sejam satisfeitos:

1. Garantia da temperatura de desenformamento adequada ao processo de laminação, com uma boa homogeneidade térmica;
2. Garantia dos níveis de produtividade da linha, evitando-se que os fornos se tornem o gargalo do processo;
3. Diminuição da formação e da aderência da carepa, assegurando-se a sua remoção nas descarepações, através de um controle adequado da temperatura e do ambiente do forno;
4. Garantia da uniformidade de temperatura dos materiais, durante o processo de laminação;
5. Minimização das diferenças de temperatura provocadas pelo resfriamento localizado na região de contato dos *skids* com os semi-produtos;
6. Garantia de uma boa eficiência térmica do processo, visando o menor consumo de energia possível;
7. Controle adequado da pressão interna do forno visando uma melhor distribuição de temperatura e evitando-se a entrada de ar frio nas câmaras de combustão;
8. Desenformamento dos materiais de acordo com o *pitch* (ritmo) programado, objetivando uma velocidade uniforme de deslocamento da carga dentro do forno.

A importância relativa de cada uma das condições acima varia com o tipo de material a ser laminado (RIZZO, 2007), por isso, o adequado controle operacional do forno na laminação é de fundamental importância para a redução dos custos de produção e garantia da qualidade do produto.

O forno Davy possui um sistema de controle de combustão denominado duplo limite cruzado. Este sistema, independente para cada zona, visa garantir o alcance das

temperaturas desejadas com a atmosfera mais apropriada para cada faixa de temperatura empregada e tipo de material a ser laminado.

Para a medição da temperatura são utilizados termopares do tipo S. Nas zonas 1 e 2 existem três termopares instalados nas regiões esquerda, direita e central da abóbada do forno, que são posicionados de forma a se evitar ruídos que aumentem a incerteza da medição como o contato direto com a chama. As zonas 3 e 4 contam com um termopar cada, além de outro instalado na região central entre as duas zonas (Figura 7). As informações são enviadas para o sistema supervisor do forno através dos transmissores de temperatura para que sejam feitas as devidas correções de acordo com o ajuste do *set point* individual para cada zona. O sistema supervisor seleciona como temperatura de referência o maior valor indicado entre os termopares das regiões direita ou esquerda. O termopar da região central é utilizado apenas como um ponto de monitoramento dos outros, pois discrepâncias muito grandes entre os termopares da mesma zona podem significar a ocorrência de alguma anormalidade no forno e servir de alerta para o operador quanto à necessidade de se tomar alguma ação corretiva, como a equalização da pressão dos reagentes nos queimadores, solicitação de calibrações extras dos termopares, ajustes dos instrumentos, etc.

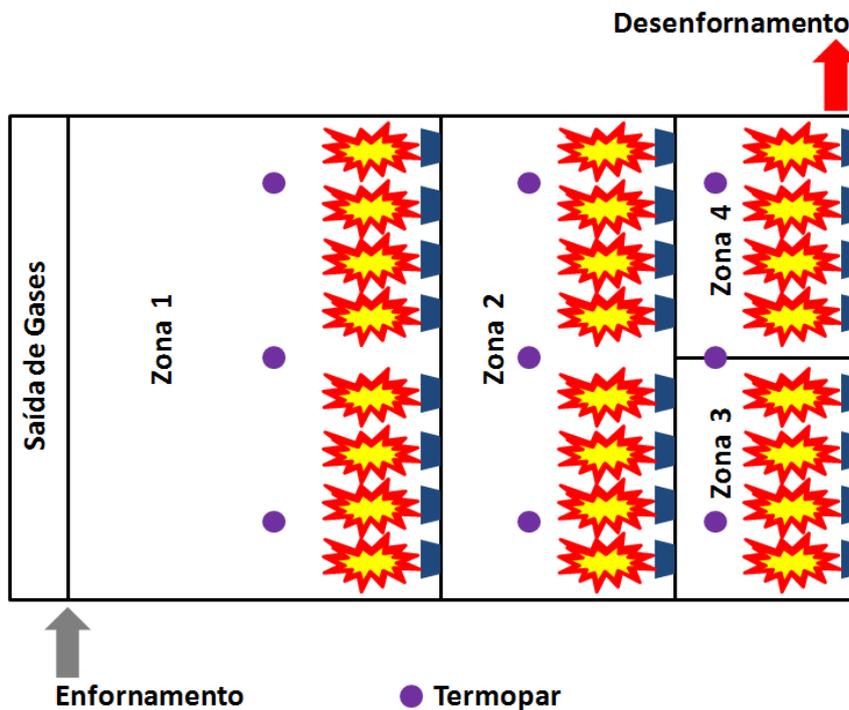


Figura 7 – Distribuição dos termopares no Forno Davy

Para a garantia da qualidade das medições de temperatura, existe um plano periódico de calibração dos termopares que é monitorado pela equipe de instrumentação do TL1 e realizado por uma empresa certificada pelo INMETRO. A calibração é realizada anualmente e segue um procedimento interno da ArcelorMittal Monlevade quanto à incerteza máxima permitida para o tipo de instrumento. O Anexo A apresenta a cópia de um laudo de calibração de um dos termopares do forno e o Anexo B apresenta a cópia de uma planilha de calibração de um transmissor de temperatura do forno.

Como dito anteriormente, o controle da atmosfera do forno influi diretamente na qualidade do aquecimento da carga para a laminação e este item é função do controle da combustão. Atmosferas redutoras são caracterizadas pela combustão com falta de ar, ou seja, a quantidade de ar menor do que o necessário para a combustão completa. O contrário ocorre na atmosfera oxidante, que é caracterizada pelo ar de combustão em excesso na reação. Em geral, é desejável uma atmosfera com um leve excesso de ar de combustão na faixa de 5 a 15% (1 a 2% de O_2 nos produtos da combustão) para garantir a queima completa do combustível e assegurar uma carepa de fácil remoção, apesar de favorecer o aumento de sua espessura (RIZZO, 2007).

A análise do teor de oxigênio nos produtos da combustão em cada zona é feita por um analisador de oxigênio, instalado de forma centralizada externamente ao forno. Seu princípio de funcionamento se baseia no contato da amostra de gás com um sensor de zircônio aquecido de forma controlada. Um sinal elétrico é gerado e convertido em informação de concentração de O_2 através de um modelo matemático. Uma sonda em cada zona, posicionada 1,5 m acima da linha de centro dos tarugos direcionam as amostras para o analisador de forma intermitente a cada cinco minutos e envia a informação do teor de oxigênio ao Controlador Lógico Programável (CLP), que recalcula os volumes de combustíveis e comburentes de acordo com a relação ar/combustível adotada. A calibração do analisador de oxigênio é feita a cada dois meses pela equipe de instrumentação do TL1 seguindo um procedimento interno com a utilização de uma mistura padrão com teor de 1% e outra com teor de 4% de O_2 como gases de referência. Os Anexos C e D apresentam uma cópia do certificado de garantia de qualidade dos gases de referência e o Anexo E apresenta uma cópia de uma planilha de calibração do analisador de oxigênio.

As informações da temperatura medida e do teor de oxigênio em cada zona são enviadas ao CLP e então é feito o cálculo das novas vazões de reagentes a fim de alcançar os *set points* de temperatura e a relação ar/combustível determinada. As vazões a serem

ajustadas são enviadas pelo CLP na forma de sinais elétricos (4 a 20 mA) às válvulas controladoras de vazão dos reagentes. O diagrama esquemático da Figura 8 mostra o fluxo das informações do sistema de controle da combustão de uma das zonas do forno e que é semelhante em todas as outras zonas.

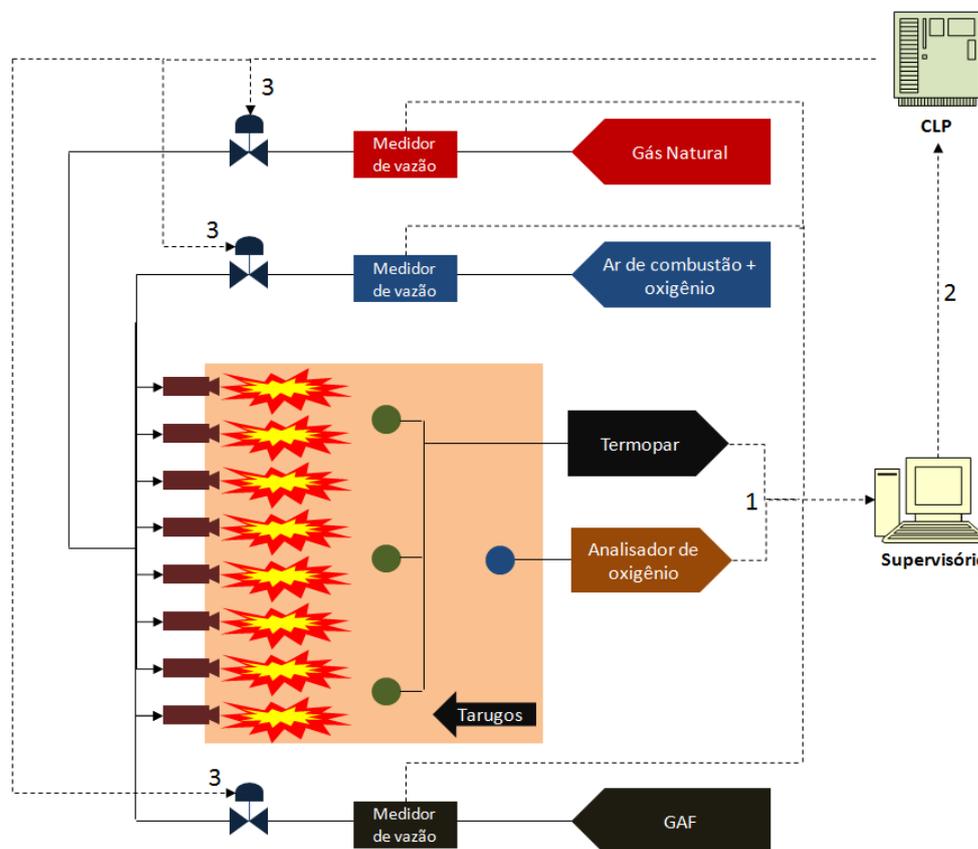


Figura 8 – Diagrama do sistema de controle de combustão do forno

O tempo de resposta do sinal emitido para abertura ou fechamento das válvulas de controle varia de acordo com o diâmetro nominal da tubulação, pois as válvulas de maior diâmetro, como é o caso das válvulas de GAF (zonas 1 e 2: 700 mm e zonas 3 e 4: 300 mm) e de ar de combustão (zonas 1 e 2: 700 mm e zonas 3 e 4: 300 mm) possuem um tempo de resposta maior do que as válvulas de GN (zonas 1 e 2: 100 mm e zonas 3 e 4: 75 mm) e de oxigênio (150 mm). Por este motivo a análise do teor de oxigênio nos produtos da combustão é feita durante cinco minutos em cada zona.

Apesar de este sistema de controle buscar corrigir as vazões para melhorar a qualidade da combustão, algumas deficiências são visíveis principalmente pelo fato de haver apenas um analisador de oxigênio operando em ciclo para as quatro zonas, o que leva ao controle da combustão a cada 20 minutos em cada zona. Outro ponto a se ressaltar

é a necessidade de se manter o plano de manutenção das válvulas de controle e dos instrumentos do forno sempre em dia, pois qualquer falha nestes equipamentos compromete significativamente o controle da combustão.

3.5 Características dos reagentes

O GAF é o combustível predominante no forno Davy pelo fato de ser gerado internamente no processo produtivo da usina. Em média, na base seca, o GAF gerado na ArcelorMittal Monlevade apresenta uma composição química com 23% de monóxido de carbono (CO), 24% de dióxido de carbono (CO₂), 4% de hidrogênio (H₂) e 49% de nitrogênio (N₂). A composição química do GAF é analisada em tempo real através de um cromatógrafo localizado na área do Alto Forno e que utiliza o princípio da separação dos componentes através de resistências mecânicas e que possui um plano de calibração mensal controlado pela equipe de instrumentação do Alto Forno. O Anexo F apresenta uma cópia do certificado de garantia da qualidade do gás padrão utilizado na calibração do cromatógrafo e o Anexo G apresenta uma cópia de uma das planilhas de calibração. O GAF sofre variações na sua composição química de acordo com as condições operacionais do Alto Forno, o que influi diretamente no valor do seu Poder Calorífico Inferior (PCI). O gráfico da Figura 9 mostra a média mensal do PCI do GAF no ano de 2010. As medições são registradas a cada 2 minutos no PIMS.



Figura 9 – Variação do PCI do GAF – 2010

Apesar da grande variação da composição química do GAF, a relação ar/GAF no programa de combustão do forno é fixa em 0,64 considerando as características do combustível para o ar sem enriquecimento com oxigênio. No caso do enriquecimento do ar de combustão, o programa do forno refaz os cálculos da relação através da subtração do volume equivalente de ar em função da vazão de oxigênio. Esta relação fixa provoca uma perda de eficiência energética quando há grandes variações dos componentes do GAF. A pressão da rede interna de distribuição do GAF na ArcelorMittal Monlevade é de 145 mbar à temperatura ambiente e é aquecido a uma temperatura que varia entre 300 e 450°C na entrada dos queimadores. O sistema de medição de vazão de GAF é do tipo placa de orifício, sendo uma placa para cada zona separadamente, situadas após o recuperador de calor de GAF.

O GN, combustível utilizado para complementação energética, é fornecido via gasoduto Vale do Aço pela Companhia de Gás de Minas Gerais (GASMIG). Devido ao fato não haver um analisador da composição química na ArcelorMittal Monlevade e também por haver poucas variações na sua composição, por ser regulamentado pela Agência Nacional de Petróleo (ANP), é considerada uma composição média de: 93,16% de CH₄; 4,29% de etano (C₂H₆); 1,2% de propano (C₃H₈) e 1,35% de CO₂. São encontrados traços de outros componentes como butano (C₄H₁₀), nitrogênio e até oxigênio, mas podem ser desconsiderados por representarem uma parcela muito pequena em relação aos outros componentes. O Anexo H apresenta a composição química diária do GN em relatório técnico enviado em janeiro de 2010 pela GASMIG. O sistema de medição de vazão de GN é do tipo placa de orifício, sendo uma para cada zona separadamente.

O ar de combustão é coletado por um ventilador de ar com capacidade máxima de 47.000 Nm³/h e pressão estática de 120 mbar. A composição química do ar de combustão na base seca é de 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio. O ar é coletado diretamente do ambiente e é aquecido a uma temperatura que varia entre 400 e 550°C antes de ser distribuído aos queimadores.

O oxigênio é fornecido pela White Martins Praxair com pureza mínima de 95%, à pressão manométrica de 12 bar e temperatura ambiente. A rede de oxigênio é interligada à rede de ar de combustão no ponto a montante do recuperador de calor de ar. Desta forma, o oxigênio é aquecido juntamente com o ar de combustão. A medição do oxigênio é feita através de uma placa de orifício e tem sua vazão máxima limitada a 3.500

Nm³/h. O ar de combustão, assim como no caso do GAF, possui medidores do tipo placa de orifício, sendo uma para cada zona separadamente, situadas após o recuperador de calor de ar. Todos os medidores de vazão possuem seus respectivos transmissores de temperatura e pressão para a correção dos volumes para as condições normais (273,15 K e 101.325 Pa). Para minimizar a incerteza da medição de vazão, os transmissores passam por um plano periódico de calibração realizado por empresa especializada. O Anexo I apresenta a cópia de um dos laudos de calibração de um dos transmissores de vazão do forno Davy. A pressão dos reagentes nos queimadores do forno é reduzida a 40 mbar através de válvulas reguladoras de pressão.

A ArcelorMittal Monlevade conta também com um medidor do ponto de orvalho que informa, em tempo real, a umidade absoluta do ar atmosférico. Seu princípio de funcionamento se baseia na alteração da capacitância de uma fina camada de polímero que absorve moléculas de água, combinando com a medição da temperatura realizada por um termopar integrado ao equipamento. Por não ser considerado um equipamento fundamental no processo de produção da ArcelorMittal Monlevade, não existe um plano de calibração periódico, mas apesar disto, sempre que são detectadas discrepâncias nas medições de umidade, é feita uma comparação com outro equipamento no laboratório de uma empresa especializada sem emissão de certificado.

3.6 Relevância do estudo

O balanço de energia em um processo produtivo é fundamental para o controle do rendimento dos equipamentos. Em um forno de reaquecimento, a maior parcela de energia envolvida se encontra na forma de calor. Num primeiro momento, o balanço térmico pode ser utilizado para demonstrar a condição operacional em que o equipamento se encontra, em seguida, utilizado para refinar o processo e mantido como um instrumento de controle e gerenciamento. Sempre que houver alguma alteração no processo, a metodologia utilizada deve ser analisada novamente e revista se for o caso.

O crescente aumento do custo da energia tem levado as indústrias a desenvolver meios para se reduzir o consumo. A complexidade do balanço de energia dependerá do nível de detalhamento desejado para se obter o melhor gerenciamento do processo. A maior disponibilidade de computadores e softwares fez com que variáveis e

cálculos complexos sejam manipulados mais facilmente. O principal objetivo do gerenciamento da energia é gerar produtos de boa qualidade com o mínimo custo e impactos ambientais.

As limitações do sistema de combustão e controle do forno Davy contribuem para a queda do seu rendimento. O cálculo do excesso de ar praticado em tempo real permite a sua imediata correção pelo operador do forno, ocasionando o melhor aproveitamento da energia térmica. Além disto, a visualização de parâmetros calculados como as temperaturas do ar e do GAF, em função das variáveis de entrada do forno servem como uma poderosa ferramenta de inspeção, uma vez que discrepâncias muito grandes entre as temperaturas medidas e calculadas indicam que pode estar havendo alguma falha ou perda de rendimento em algum equipamento ou instrumento do forno.

O balanço térmico realizado em tempo real e utilizado como uma ferramenta de gerenciamento permitirá também a realização da estratificação de todos os percentuais de contribuição para a perda de rendimento do forno, mostrando claramente onde estão as maiores perdas de energia e a condição operacional do equipamento, auxiliando na tomada de decisões e favorecendo também o desenvolvimento e a eficiência dos operadores.

4 METODOLOGIA

4.1 O Balanço de Energia e a Combustão dos Gases

O balanço térmico é uma das ferramentas mais eficazes para se diagnosticar o nível de desempenho energético de um forno (GORNI et al., 2002). Como se sabe, nada mais é do que a quantificação de todas as energias de entrada e saída do forno. Para que um balanço térmico seja confiável é necessário não só dispor de um bom algoritmo de cálculo, como também medir precisamente o máximo de parâmetros operacionais que se fizerem necessários ao cálculo das quantidades de calor envolvidas.

Segundo CARVALHO, 2003, o processo de combustão deve levar em conta as seguintes variáveis: a quantidade de calor fornecido pelo combustível; a quantidade de calor recuperado pelo ar de combustão; a quantidade de calor gerado pela combustão; a quantidade de calor utilizado para aquecer a carga – calor útil; a quantidade de calor perdido pelas paredes e aberturas do forno; a quantidade de calor contido nas fumaças após o recuperador; a quantidade de calor fornecido pelo ar de entrada no recuperador e a quantidade de calor perdido pelas paredes do recuperador e dos condutos até o recuperador.

As entradas e saídas de energia no processo, embora muito semelhantes em outros modelos pesquisados por outros autores, se diferem principalmente pelo tipo do forno estudado. Neste trabalho, as entradas de energia se encontram principalmente na forma de reagentes e devido às reações de combustão. As principais saídas estão na forma de energia aproveitada no aquecimento dos produtos, na energia contida nos produtos da combustão após todas as trocas de calor e nas perdas inerentes ao processo. A Figura 10 apresenta estas principais entradas e saídas de energia.

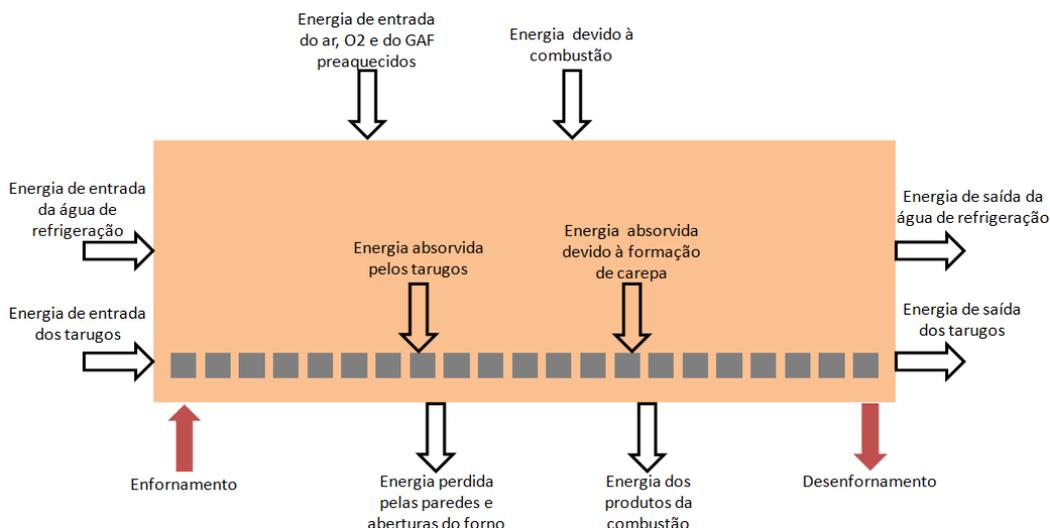


Figura 10 – Principais entradas e saídas de energia do forno

Desta forma, a Equação (1) define o balanço geral do sistema.

$$\dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{GAF} + \dot{H}_{Reagentes(298,15K)} = \dot{H}_{Produtos} + \dot{Q}_{Tarugos} + \dot{Q}_{Perdas} + \dot{Q}_{Carepa} \quad (1)$$

Onde

\dot{Q}_{ar} : Calor recuperado pelo ar no Recuperador de Calor de Ar

\dot{Q}_{GAF} : Calor recuperado pelo GAF no Recuperador de Calor de GAF

$\dot{H}_{Reagentes(298,15K)}$: Calor sensível dos reagentes a 298,15 K

$\dot{H}_{Produtos}$: Calor sensível dos produtos da combustão após as trocas de calor do processo

$\dot{Q}_{Tarugos}$: Energia absorvida pelos tarugos no processo de aquecimento

\dot{Q}_{Perdas} : Energia “absorvida” pelas perdas do processo

\dot{Q}_{Carepa} : Energia liberada pela carepa durante a sua formação

Observando a Figura 10, verifica-se que o balanço de energia deve ser realizado a partir de um volume de controle que envolva o equipamento a ser considerado.

Portanto serão considerados o forno e os recuperadores de calor de ar e de GAF. Ressalta-se que o balanço térmico aqui proposto deve considerar a soma das variáveis das quatro zonas a fim de se chegar a um resultado global.

Para o cálculo das variáveis desconhecidas da equação geral, foi construído um programa de simulação, onde foi utilizado o Scilab 5.2.0, software de simulação aberto, disponível na internet. Todas as variáveis da equação geral foram calculadas separadamente por módulos no programa a fim de facilitar o processamento dos dados e também para tornar o programa mais simples na busca de erros.

4.2 Cálculo das reações de combustão

4.2.1 Percentual volumétrico que compõe a mistura dos reagentes

A soma das vazões de entrada de GAF, GN, ar de combustão e de oxigênio em suas respectivas composições na base úmida, determinam a composição final do gás que irá realizar as reações de combustão. A Tabela 1 mostra a composição típica dos reagentes presentes na combustão.

Tabela 1
Composição típica dos reagentes (%) – Base Úmida

Componente	GAF	GN	Ar	O ₂
CH ₄		93,16		
C ₂ H ₆		4,29		
C ₃ H ₈		1,2		
CO ₂	22,07	1,35		
CO	21,15			
H ₂	4,02			
N ₂	48,57		77,84	
O ₂			20,69	100
H ₂ O	4,19		1,47	
Total	100	100	100	100

No caso do GAF, a composição é obtida em tempo real pelo sistema PIMS e a sua umidade é calculada nas condições de entrada do recuperador de calor e é considerada fixa em 4,19% v/v. A umidade do ar de combustão também é obtida em tempo real, na forma absoluta pelo sistema PIMS e, assim como no caso do GAF, é calculada na base úmida para a normalização final. O oxigênio é considerado puro para simplificar os cálculos.

Para a conversão do ar de combustão para a base úmida, primeiramente foi encontrado o percentual de água contido no ar a partir da Equação (2), que utiliza dados obtidos do medidor de umidade absoluta da ArcelorMittal Monlevade.

$$\%H_2O = \frac{U_{abs}}{18 \cdot 44,643} \quad (2)$$

Onde

$\%H_2O$: Quantidade de água em 1 Nm³ de ar

U_{abs} : Umidade absoluta (g/Nm³)

As constantes 18 e 44,643 representam, respectivamente o peso molecular da água e o número de mols contido em 1 Nm³ de ar, uma vez que 1 mol de qualquer gás ocupa um volume de 22,4 litros nas condições normais de temperatura e pressão. Assim, normalizando os outros elementos para a base úmida, tem-se:

$$\%N_{2(Wet)} = \%N_{2(Dry)} \cdot (100\% - \%H_2O) \quad (3)$$

$$\%O_{2(Wet)} = \%O_{2(Dry)} \cdot (100\% - \%H_2O)$$

Onde os sufixos *Dry* e *Wet* representam os percentuais na base seca e na base úmida respectivamente. Da mesma maneira é feita a conversão do GAF para a base úmida, considerando apenas os componentes que compõem este gás.

O cálculo do volume de oxigênio final no ar enriquecido é obtido a partir da Equação (4):

$$\%O_{2(enriq.)} = \frac{\%O_{2(Wet)} \cdot \%AR + \%O_{2(puro)}}{\%H_2O \cdot \%AR + \%N_{2(Wet)} \cdot \%AR + \%O_{2(Wet)} \cdot \%AR + \%O_{2(puro)}} \quad (4)$$

De forma análoga, é calculado o volume final de nitrogênio e de água no ar enriquecido.

A composição final dos combustíveis é obtida a partir da soma das vazões de GAF e de GN, bem como dos percentuais volumétricos dos elementos que os compõem. Um caso típico pode ser descrito pelo seguinte exemplo: para uma mistura composta de 99,15% de GAF e 0,85% de GN, o valor percentual de CO₂ na mistura dos combustíveis é dado por:

$$\%CO_2 = 0,9915 \cdot \%CO_{2(GAF)} + 0,0085 \cdot \%CO_{2(GN)} \quad (5)$$

E tomando-se como base a composição dos combustíveis apresentada na Tabela 1, o percentual de CO₂ na mistura final é:

$$\%CO_2 = 0,9915 \cdot 22,07 + 0,0085 \cdot 1,35 = 21,894\%$$

Repete-se este procedimento para todos os outros elementos.

Conhecido o percentual volumétrico dos componentes presentes na mistura final dos combustíveis e dos comburentes, pode-se realizar o cálculo estequiométrico para a simulação do processo de combustão, o excesso de oxigênio utilizado e o calor sensível dos reagentes a 298,15 K.

4.2.2 Cálculo Estequiométrico

A estequiometria estuda o balanço da equação química da combustão completa sem considerar excesso de oxidante ou de combustível (BARROS, 2008). Conhecida a vazão volumétrica e a composição química dos elementos, efetua-se o cálculo estequiométrico obtendo-se assim a vazão de ar necessária para a combustão completa do combustível (vazão estequiométrica). Neste caso, a vazão estequiométrica é comparada à vazão de ar enriquecido para se determinar o excesso ou escassez de ar fornecido ao forno. O modelo suporta cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas. A Tabela 2 apresenta as equações para o cálculo da combustão estequiométrica considerando 1 mol de cada elemento.

Tabela 2

Equações para o cálculo da combustão estequiométrica dos elementos – Base 1 mol

Componente	Equação
CH ₄	$CH_4 + 2,0 \cdot O_2 \rightarrow CO_2 + 2,0 \cdot H_2O$
C ₂ H ₆	$C_2H_6 + 3,5 \cdot O_2 \rightarrow 2,0 \cdot CO_2 + 3,0 \cdot H_2O$
C ₃ H ₈	$C_3H_8 + 5,0 \cdot O_2 \rightarrow 3,0 \cdot CO_2 + 4,0 \cdot H_2O$
CO ₂	-
CO	$CO + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow CO_2$
H ₂	$H_2 + 0,5 \cdot O_2 \rightarrow H_2O$
N ₂	-
O ₂	-
H ₂ O	-

O cálculo da relação ar/combustível, sem injeção de oxigênio, necessária para a combustão completa é determinado a partir da Equação (6).

$$AR/COMB. = \left(\frac{1}{0,21} \right) \cdot (\%CH_4 \cdot 2,0 + \%C_2H_6 \cdot 3,5 + \%C_3H_8 \cdot 5,0 + \%CO \cdot 0,5 + \%H_2 \cdot 0,5)$$

(6)

O cálculo da relação ar enriquecido/combustível para a combustão completa é feito a partir da Equação (7)

$$AR / COMB_{(enriq.)} = \left(\frac{1}{\%O_{2(enriq.)}} \right) \cdot \left(\%CH_4 \cdot 2,0 + \%C_2H_6 \cdot 3,5 + \%C_3H_8 \cdot 5,0 + \right. \\ \left. + \%CO \cdot 0,5 + \%H_2 \cdot 0,5 \right) \quad (7)$$

A relação ar enriquecido/combustível praticada em tempo real é calculada pela Equação (8):

$$AR / COMB_{(real)} = \left(\frac{\dot{V}_{AR} + \dot{V}_{O_2}}{\dot{V}_{GAF} + \dot{V}_{GN}} \right) \quad (8)$$

Assim, o excesso de ar praticado em tempo real é:

$$\% Excesso = \left(\frac{AR / COMB_{(real)} - AR / COMB_{(enriq.)}}{AR / COMB_{(enriq.)}} \right) \quad (9)$$

4.3 Cálculo das energias envolvidas

4.3.1 Entalpia dos reagentes

Os processos de combustão envolvem combinações de propriedades termodinâmicas de acordo com o estado da matéria. Embora a temperatura de entrada dos reagentes seja variável, no modelo proposto será considerada, para os cálculos das reações de combustão, a entalpia na temperatura de 298,15 K, pois, até então, as temperaturas do ar e do GAF permanecem como incógnitas e serão determinadas na forma de energia recuperada pelos recuperadores de calor. Então, a energia de entrada dos reagentes é

obtida através do polinômio e respectivos coeficientes encontrados a partir das tabelas JANAF (Formato NASA-SP-273, 1993) como mostrado na Equação (10).

$$\frac{h_i^0}{RT} = \left(a_1 + a_2 T + \frac{a_3 T^2}{2} + \frac{a_4 T^3}{3} + \frac{a_5 T^4}{4} + \frac{b_1}{T} \right) \quad (10)$$

Onde

h_i^0 : Entalpia do componente

R : Constante universal dos gases = 8.314,51 J/kmol.K

T : Temperatura (K)

a_i e b_i : Coeficientes específicos para cada componente do gás

4.3.2 Recuperadores de calor

Os recuperadores de calor desempenham um importante papel na economia de energia, redução na emissão de poluentes e na alta qualidade do produto considerando a taxa de produção (WANG et. al., 2009). A economia de energia está diretamente ligada ao aumento do rendimento do forno. Segundo TRINKS e MAWHINNEY, 1975, a fração de combustível que se pode economizar pelo pré-aquecimento do ar de combustão pode ser calculada a partir da equação $Q + H =$ calor produzido pela combustão de uma quantidade unitária de combustível; Q é o calor que sai do forno pelos produtos da combustão e H é o calor deixado no forno pelos produtos da combustão. A Figura 11 ilustra a economia de combustíveis devido ao preaquecimento do ar.

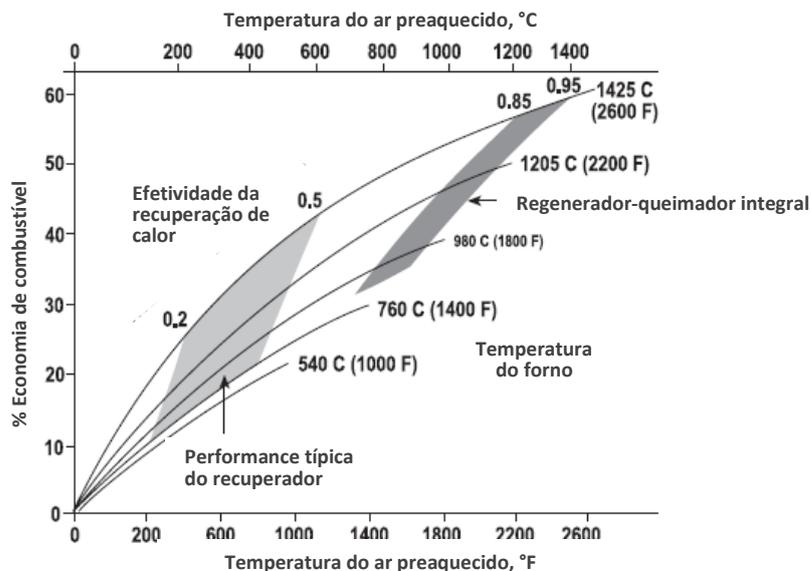


Figura 11 – Economia de combustíveis devido ao preaquecimento do ar
Adaptado: TRINKS et al., 2000

O preaquecimento do combustível, além de auxiliar na economia de energia traz também grandes benefícios, pois a aproximação da sua temperatura em relação à temperatura de inflamabilidade facilita a ignição do combustível.

Os recuperadores de calor de ar e de GAF encontram-se no canal de fumaça a uma distância de aproximadamente 30 m da saída do forno. Neste percurso existem dois termopares tipo K (Cromel/Alumel) instalados, sendo um na saída do forno e o outro na entrada do recuperador de calor de ar. Também existe mais um termopar tipo K instalado entre os dois recuperadores de calor e outro na saída após o recuperador de calor de GAF. A Figura 12 ilustra os recuperadores de calor e a localização dos respectivos termopares.

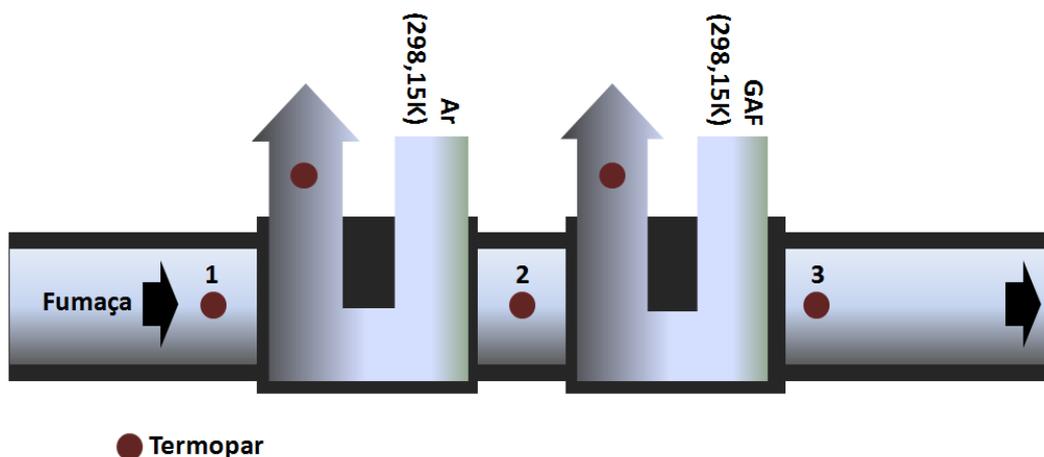


Figura 12 – Esquema dos recuperadores de calor e respectivos termopares

Para o cálculo da energia do ar e do GAF preaquecidos, primeiramente é preciso determinar a temperatura em que estes gases se encontram. Um modelamento foi feito a fim de se determinar estas temperaturas após as trocas térmicas envolvidas no processo. A vantagem deste método é servir como uma ferramenta de acompanhamento do desempenho dos recuperadores. A metodologia para se determinar estas temperaturas parte da premissa de que o ar e o GAF entram nos recuperadores a uma temperatura de 298,15 K (temperatura ambiente). Assim, o calor cedido pela fumaça vem da Equação (11) que se refere aos trocadores de calor:

$$\dot{Q}_{\text{Recuperador}} = \dot{m}_{\text{fumaça}} \cdot \varepsilon \cdot c_{p_{\text{fumaça}}} (T_{f(in)} - T_{ar/GAF(in)}) \quad (11)$$

Onde

$\dot{m}_{\text{fumaça}}$: Vazão mássica de fumaça

$\varepsilon \cdot c_{p_{\text{fumaça}}}$: Efetividade do recuperador multiplicada pelo calor específico à pressão constante do fluido de menor capacidade térmica (BARROS, 2006), que neste trabalho será denominado calor específico médio do recuperador de calor

$T_{f(in)}$: Temperatura da fumaça na entrada do recuperador de calor

$T_{ar/GAF(in)}$: Temperatura do fluido frio na entrada do recuperador de calor (298,15 K)

A variável $T_{f(in)}$ considerada neste cálculo, no caso do cálculo do recuperador de calor de ar, é medida através do termopar localizado imediatamente antes do recuperador de calor de ar, devido à dificuldade de se calcular, ou até mesmo estimar com precisão esta temperatura, uma vez que, o longo trecho de tubulação existente entre a saída do forno e a entrada do primeiro recuperador de calor torna a determinação desta temperatura muito complexa. Além disto, existe um dispositivo de segurança que promove uma injeção de ar de diluição diretamente no canal de fumaça a fim de impedir que temperaturas elevadas danifiquem o recuperador de calor. A vazão de ar de diluição, além de não ser medida, tem seu valor aumentado proporcionalmente enquanto a temperatura na

entrada do recuperador de calor de ar continuar a subir. Para o caso do recuperador de calor de GAF, $T_{f(in)}$ é igual à temperatura de saída da fumaça calculada após a passagem pelo recuperador de calor de ar.

A vazão mássica de fumaça é calculada a partir da densidade e do volume dos componentes dos reagentes nas condições normais de temperatura e pressão, e tem o mesmo valor para os produtos da combustão conforme a lei da conservação da massa. É desconsiderada a perda de massa através das aberturas do forno. Então, pela Equação (12), tem-se o cálculo da densidade dos reagentes:

$$\rho = \frac{P \cdot \sum (n_i \cdot M_i)}{R \cdot T} \quad (12)$$

Onde

ρ : Densidade (kg/Nm³)

P : Pressão (101.325 Pa)

n_i : Porcentagem de cada componente do gás

M_i : Massa molar de cada componente

T : Temperatura do gás (273,15 K)

Sendo assim, o cálculo da vazão mássica é feito a partir do produto da densidade dos reagentes pela soma dos respectivos volumes, conforme Equação (13).

$$\dot{m}_{fumaça} = \rho \cdot \sum \dot{V} \quad (13)$$

Foram calculados vários valores para o calor específico médio dos recuperadores de calor $\varepsilon \cdot C_{p(fumaça)}$ de forma empírica, a partir de um amplo banco de dados extraído do PIMS, onde foram coletados vários valores para a temperatura da

fumaça medida na entrada e na saída de cada recuperador de calor. Os cálculos foram feitos através das equações (14) e (15):

$$\dot{Q}_{fumaça} = \dot{m}_{fumaça} \cdot c_{p(fumaça)} (T_{f(in)} - T_{f(out)}) \quad (14)$$

$$\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)} = \frac{\dot{Q}_{fumaça}}{\dot{m}_{fumaça} (T_{f(in)} - T_{ar/GAF(in)})} \quad (15)$$

Onde $\dot{Q}_{fumaça}$ representa o calor perdido pela fumaça ao passar pelo recuperador de calor e $c_{p(fumaça)}$ é o calor específico médio da fumaça nas temperaturas medidas na entrada e na saída de cada recuperador e calculado através do respectivo polinômio da tabela JANAF.

Para se determinar o calor específico médio dos recuperadores, foi desenvolvido um modelo de regressão (Equação 16) a partir das variáveis correspondentes aos valores coletados para os cálculos de $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$, em função da vazão mássica do fluido quente (fumaça), da vazão mássica do fluido frio (ar/GAF) e da temperatura do fluido quente na entrada do recuperador de calor.

$$\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)} = a + b \cdot \dot{m}_{fumaça} + c \cdot \dot{m}_{ar/GAF} + d \cdot T_{f(in)} \quad (16)$$

Onde a , b , c e d são coeficientes do modelo de regressão.

A partir da determinação do termo $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$, foi possível calcular a variável desconhecida, $T_{f(in)}$ da Equação (11) para o recuperador de calor de GAF, uma vez que a variável $\dot{Q}_{Recuperador} = \dot{Q}_{fumaça}$. É importante lembrar que a temperatura da fumaça na saída do recuperador de calor de ar é igual à temperatura na entrada do recuperador de calor de GAF, uma vez que as perdas térmicas neste trecho são mínimas tendo em vista o curto trecho de tubulação entre os dois recuperadores.

Para o cálculo da temperatura do ar de combustão e do GAF após o aquecimento nos recuperadores, foi verificado empiricamente que, em virtude das perdas dos recuperadores de calor, o calor absorvido pelo ar e pelo GAF apresentava valores diferentes em relação ao calor perdido pelos produtos da combustão ao passar por ambos recuperadores. Sendo assim, da mesma forma que para o cálculo de $\varepsilon \cdot c_{p(fumaça)}$, foram encontrados empiricamente, através dos valores da temperatura do ar e do GAF medidos na saída de cada recuperador de calor, vários valores para o calor absorvido pelo ar e pelo GAF a partir das equações abaixo:

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} \cdot c_{p(ar)} (T_{ar(out)} - T_{ar(in)}) \quad (17)$$

$$\dot{Q}_{GAF} = \dot{m}_{GAF} \cdot c_{p(GAF)} (T_{GAF(out)} - T_{GAF(in)})$$

Da mesma maneira, empiricamente, foi possível estabelecer outro modelo de regressão para o cálculo da perda de calor de cada recuperador, ou seja, a diferença entre o calor perdido pelos produtos da combustão e o calor absorvido pelo ar e pelo GAF, em função da vazão de fumaça, da vazão de ar/GAF e da temperatura de entrada da fumaça em cada recuperador de calor.

A Equação (18) se refere ao cálculo do calor perdido pelos recuperadores e a Equação (19) ao cálculo da temperatura de saída do ar e do GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores.

$$\dot{Q}_{loss} = a_1 + a_2 \cdot \dot{m}_{fumaça} + a_3 \cdot \dot{m}_{ar/GAF} + a_4 \cdot T_{f(in)} \quad (18)$$

$$T_{ar/GAF(out)} = \frac{\dot{Q}_{Recuperador} - \dot{Q}_{loss}}{\dot{m}_{ar/GAF} \cdot c_{p(ar/GAF)}} + T_{ar/GAF(in)} \quad (19)$$

A efetividade dos recuperadores de calor foi calculada segundo o método da efetividade de NUT (Número de Unidades de Transferência) (INCROPERA e DEWITT, 2003). Para este método, primeiramente é preciso determinar a taxa máxima de transferência de calor, q_{\max} para o recuperador.

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{f(in)} - T_{ar/GAF(in)}) \quad (20)$$

Onde

C_{\min} : Taxa de capacidade calorífica mínima

$$C_{\min} = c_{p(fumaça)} \cdot \dot{m}_{fumaça} \quad (21)$$

A taxa real de transferência de calor de cada recuperador leva em consideração a taxa de capacidade calorífica do ar/GAF e a diferença entre a temperatura do ar/GAF de saída com a de entrada.

$$q = C_{ar/GAF} (T_{ar/GAF(out)} - T_{ar/GAF(in)}) \quad (22)$$

$$C_{ar/GAF} = c_{p(ar/GAF)} \cdot \dot{m}_{ar/GAF} \quad (23)$$

A efetividade é a razão entre a taxa real de transferência de calor para o recuperador e a taxa máxima de transferência de calor possível e expressa o desempenho dos recuperadores de calor:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (24)$$

4.3.3 Perdas

As perdas de calor no forno durante o processo de aquecimento, embora indesejáveis, são inevitáveis e devem fazer parte do balanço térmico do forno. São inúmeras as fontes de calor perdido e dentre elas, podemos destacar: refrigeração dos equipamentos e estruturas no interior do forno, trocas térmicas entre as paredes e o ambiente externo e as entradas e saídas de calor devido a aberturas em diversos pontos na estrutura do forno.

O cálculo do calor perdido devido à água de refrigeração foi simplificado devido à estabilidade operacional deste processo. De acordo com dados extraídos da Estação de Recirculação de Água dos Laminadores, foram consideradas fixas as temperaturas de alimentação e de retorno da água de refrigeração do forno em 28 e 32°C respectivamente e a vazão em 320 m³/h. Desta maneira, o cálculo do calor absorvido pela água de refrigeração do forno é:

$$\dot{Q}_{\text{água}} = 320 \cdot (h_{(32^{\circ}\text{C})} - h_{(28^{\circ}\text{C})}) \quad (25)$$

A perda de calor pelas paredes do forno também foi considerada fixa, uma vez que não há medições, em tempo real, da temperatura das paredes, bem como do ambiente na região externa do forno. Por isso, foram coletadas temperaturas em vários pontos das paredes externas do forno através de um pirômetro óptico manual e fixado este valor em 150°C. A temperatura ambiente é considerada 25°C para todos os cálculos neste trabalho. A transferência de calor entre as paredes externas do forno e o ambiente, para efeito de cálculo, foi considerada apenas por convecção, pois as perdas por radiação, nestas faixas de temperatura não são muito significativas. As perdas de calor para o ambiente foram calculadas através da Equação (26).

$$\dot{Q}_{\text{paredes}} = U \cdot A \cdot (T_{\text{paredes}} - T_{\text{amb.}}) \quad (26)$$

Onde

$U = 31395 \text{ J/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$: Coeficiente total de dissipação de calor para superfícies verticais e pintadas, e com o ar tranquilo (TRINKS e MAWHINNEY, 1975)

$A = 626 \text{ m}^2$: Área externa do forno (excluindo a área da superfície inferior)

As outras perdas foram calculadas de forma empírica na fase de ajuste do modelo e serão demonstradas mais adiante.

4.3.4 Formação de carepa

Um aspecto importante do ponto de vista da qualidade superficial e do rendimento da laminação a quente dos aços está relacionado com a formação de carepa, que se constitui de uma camada de óxidos depositada na superfície dos produtos semiacabados em processos de laminação. Esta perda de material por oxidação varia de 0,5 a 2,4% da massa do tarugo (RIZZO, 2007). No forno Davy, a formação de carepa adotada é fixada em 0,85% da massa do tarugo.

A carepa formada durante o aquecimento dos tarugos representa um processo exotérmico, sendo assim, é mais uma fonte de entrada de calor (GORNI et. al., 2002). O cálculo da energia liberada na formação da carepa é feito a partir da Equação (27).

$$\dot{Q}_{carepa} = 0,0085 \cdot \dot{m}_{tarugo} \cdot h_{carepa} \quad (27)$$

Onde

\dot{m}_{tarugo} : Ritmo do forno

h_{carepa} : Entalpia da carepa a 1100°C = 987,9 kJ/kg (HAUCK e LAIA, 2000)

4.3.5 Temperatura de desenformamento dos tarugos

A temperatura de saída dos tarugos está diretamente relacionada com a temperatura dos produtos de combustão dentro do forno e com as trocas térmicas envolvidas no processo de aquecimento.

Calcular as trocas térmicas por radiação, convecção e condução em tempo real torna-se um trabalho bastante complexo, uma vez que há uma grande variação da composição química dos produtos da combustão, da emissividade da chama, do movimento dos gases e tarugos e de outros fatores afetam a transferência de calor no volume de controle considerado. Desta forma foi feita uma simplificação para encontrar o coeficiente global de transferência de calor entre o forno e os tarugos, utilizando o princípio da convecção forçada com escoamento turbulento sobre uma placa isotérmica.

Para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor entre o forno e os tarugos, primeiramente foi necessário encontrar o número de Nusselt através da Equação (28).

$$Nu = \frac{h_x \cdot x}{k} = 0,0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3} \quad (28)$$

Onde

Nu : Número de Nusselt

h_x : Coeficiente de transferência de calor por convecção

x : Comprimento

k : Coeficiente de condutividade térmica (considerado igual ao do ar = 0,026 W/m K)

Re : Número de Reynolds

Pr : Número de Prandtl

O número de Reynolds foi calculado segundo a Equação (29), utilizando um diâmetro equivalente, referente à seção transversal retangular média do forno de 13 x 2,5 m, sendo adotado 6,43 m. O valor da viscosidade foi adotado como sendo a do ar atmosférico (10^{-5} Pa.s) e a vazão mássica de produtos da combustão foi fixada em 25 kg/s (90 t/h).

$$\text{Re} = \frac{\dot{m}_{fumaça} \cdot \phi_{eq.}}{\mu} = 1,26E7 \quad (29)$$

O número de Prandtl foi calculado através da relação de Eucken (BARROS, 2006) pela Equação (30).

$$\text{Pr} = \frac{4\gamma_f}{9\gamma_f - 5} = 0,776 \quad (30)$$

Onde $\gamma_f = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_p}{c_p - R} = 1,3$: Razão de calores específicos

Encontradas todas as variáveis necessárias, o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o forno e as quatro faces de um tarugo foi definido a partir da Equação (28) como 450 J/kg.K.

A transferência de calor entre o forno e os tarugos foi calculada pela Equação (31), que é uma função do ritmo do forno, da temperatura dos tarugos na entrada e da temperatura média dos produtos da combustão dentro do forno.

$$\dot{Q}_{forno} = \dot{m}_{Tarugos} \cdot h_x (T_{forno} - T_{Tarugo(in)}) \quad (31)$$

A temperatura dos tarugos na entrada do forno foi fixada em 373,15 K, em virtude de este modelo apresentar boa resolução a temperaturas superiores a este valor. A Equação (32) é utilizada para o cálculo da temperatura de desenformamento dos tarugos e, assim como no caso da Equação (31), depende da temperatura média dos produtos da combustão (T_{forno}), que até aqui é uma variável desconhecida.

$$T_{Tarugo(out)} = \frac{\dot{Q}_{forno}}{\dot{m}_{tarugos} \cdot c_{p(Tarugo)}} + T_{Tarugo(in)} \quad (32)$$

4.3.6 Função objetivo final

A função objetivo final tem como principal variável a temperatura média dos produtos da combustão, que é necessária para o cálculo do calor sensível dos produtos da combustão após as trocas de calor do processo e, também, para o cálculo da temperatura dos tarugos na saída do forno. O cálculo desta variável foi realizado adotando-se o método de busca de raízes de Newton-Raphson (BARROSO, L. C. et al., 1987), onde são feitas iterações até que se atinja o valor de convergência. Neste método é necessário utilizar um valor para a estimativa inicial bem aproximada ao real para que a convergência seja rápida. Após a primeira convergência, as estimativas subsequentes são iguais ao valor encontrado anteriormente. Isto contribui para reduzir o tempo de processamento do modelo, aumentando a velocidade da resposta no final. A Figura 13 apresenta o fluxograma do programa que utiliza o algoritmo de Newton-Raphson.

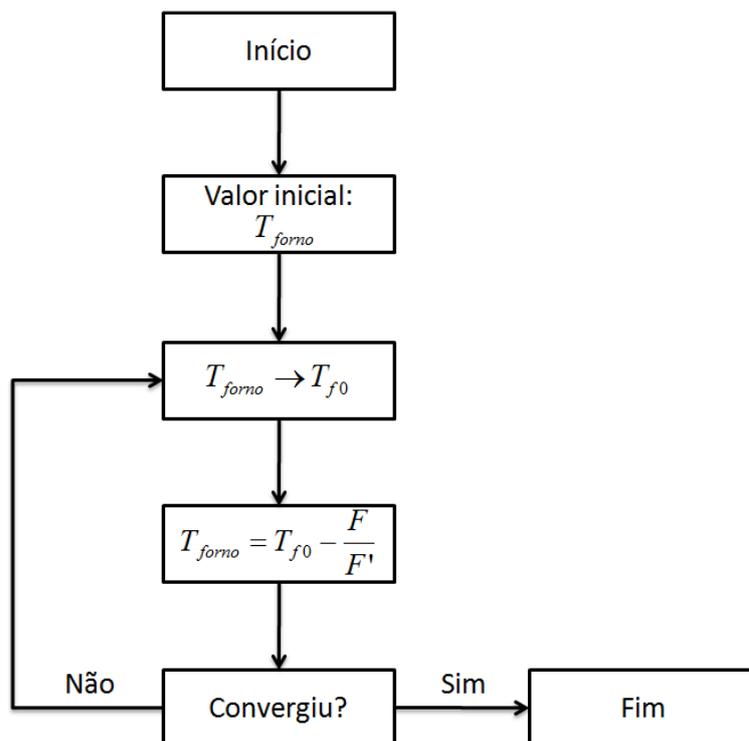


Figura 13 – Fluxograma do programa

4.4 Implementação do modelo

O modelo foi implementado experimentalmente em um computador dedicado e interligado à rede de dados da ArcelorMittal Monlevade. Um programa em linguagem Delphi foi desenvolvido para tornar possível a comunicação entre o Scilab e o sistema PIMS. Neste programa, denominado Convert Scilab-PIMS, é gerado um arquivo com os dados em formato “csv” para permitir a leitura pelo Scilab. Após o processamento dos dados no Scilab, é gerado outro arquivo no Convert Scilab-PIMS para envio dos resultados para o sistema PIMS, onde são apresentados na forma de gráficos. O diagrama da Figura 14 ilustra o caminho das variáveis desde a sua medição através dos instrumentos do forno até a sua visualização no sistema PIMS.

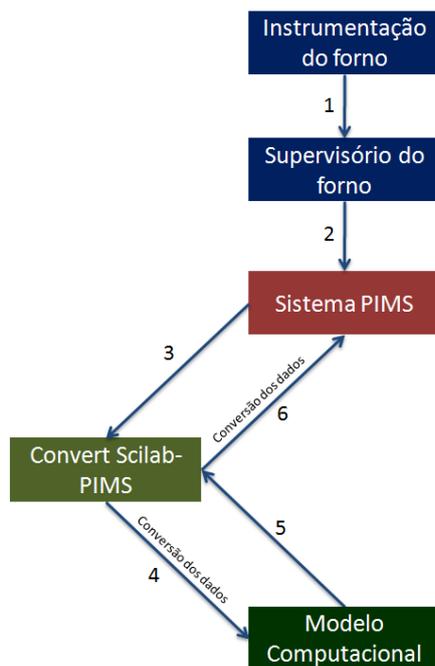


Figura 14 – Diagrama esquemático do percurso das variáveis do modelo computacional

4.5 Ajuste do modelo

4.5.1 Testes preliminares

Antes de ser interligado à rede de dados da ArcelorMittal Monlevade, o modelo foi testado com dados extraídos do PIMS para uma planilha do Microsoft Excel. Foi escolhida uma condição operacional estável do forno para facilitar a análise do comportamento das simplificações, coeficientes, perdas e outras variáveis que tiveram seus valores assumidos nos cálculos do modelo. As variáveis de entrada do programa foram agrupadas em valores médios a cada 5 minutos, uma vez que este tempo foi considerado suficiente para verificar variações mais significativas dos valores e também devido ao tempo requerido para o processamento do programa computacional.

O cálculo das composições dos reagentes após a mistura dos gases, bem como dos produtos da combustão e do excesso de ar foram satisfatórios embora tenha havido uma simplificação do teor de água no GAF e da composição química do GN. Isto é devido

a estes cálculos não sofrerem influência de coeficientes, modelos de regressão e/ou simplificações que causassem maior impacto.

Os gráficos das Figura 15 a 18 mostram como foi a resposta do modelo para as temperaturas do ar, do GAF e dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor.

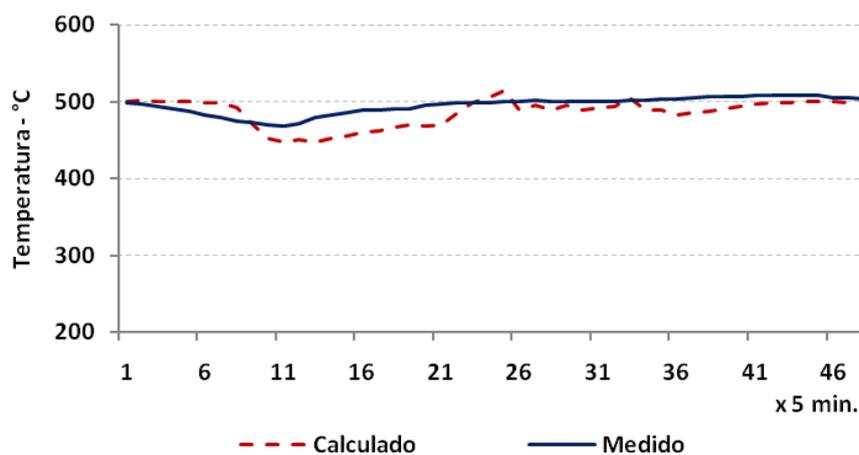


Figura 15 – Temperatura do ar após passagem pelo recuperador de calor de ar

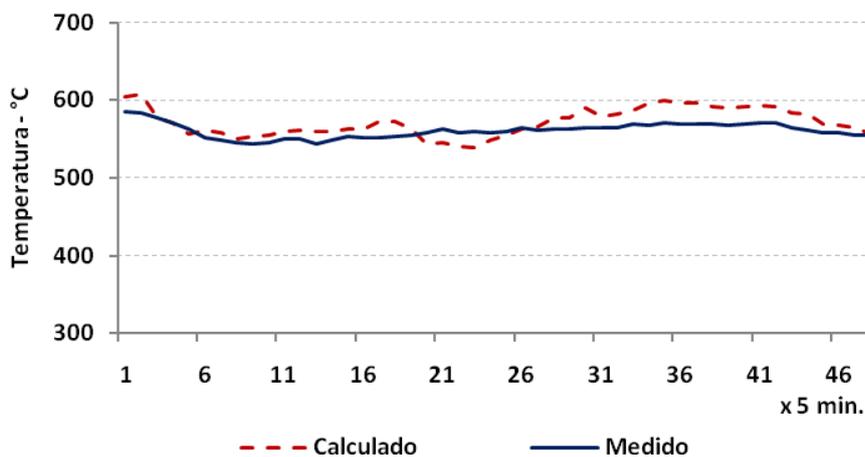


Figura 16 – Temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de ar

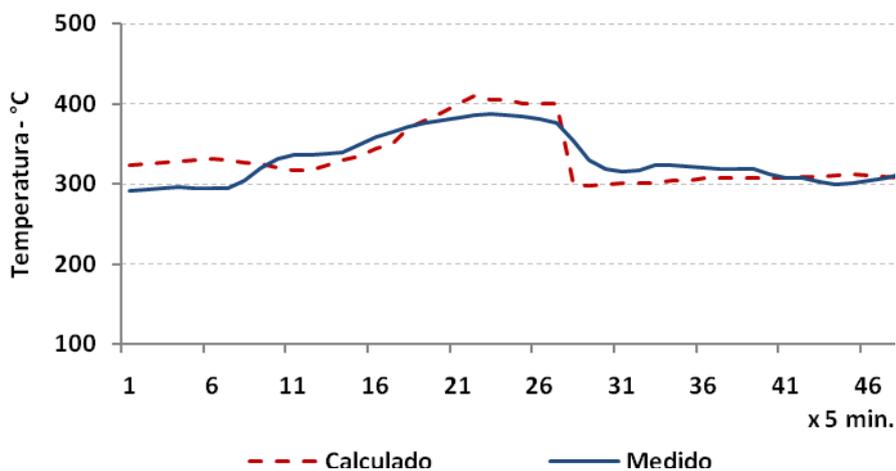


Figura 17 – Temperatura do GAF após passagem pelo recuperador de calor de GAF

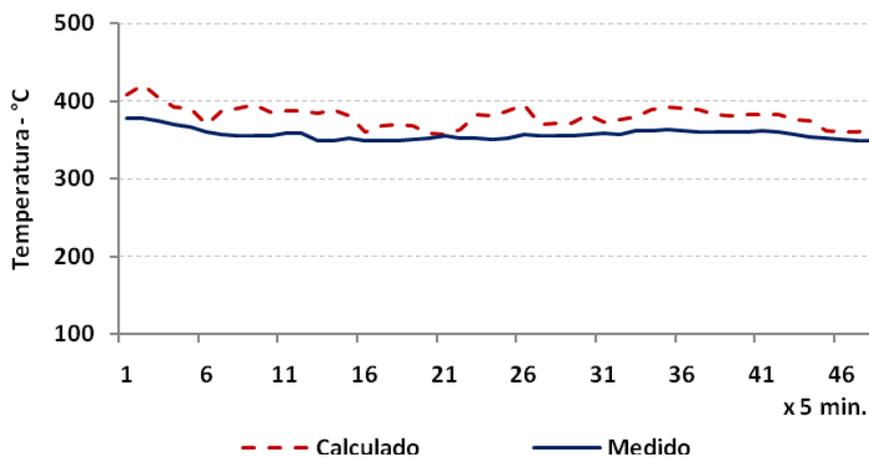


Figura 18 – Temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de GAF

Os primeiros testes mostraram uma boa resposta do modelo de regressão construído para cálculo das temperaturas do ar e do GAF após passagem pelos recuperadores de calor. O mesmo ocorreu com o comportamento da temperatura dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor.

A temperatura média do forno e a dos tarugos na saída apresentou uma grande discrepância nos resultados conforme mostrado no gráfico da Figura 19.

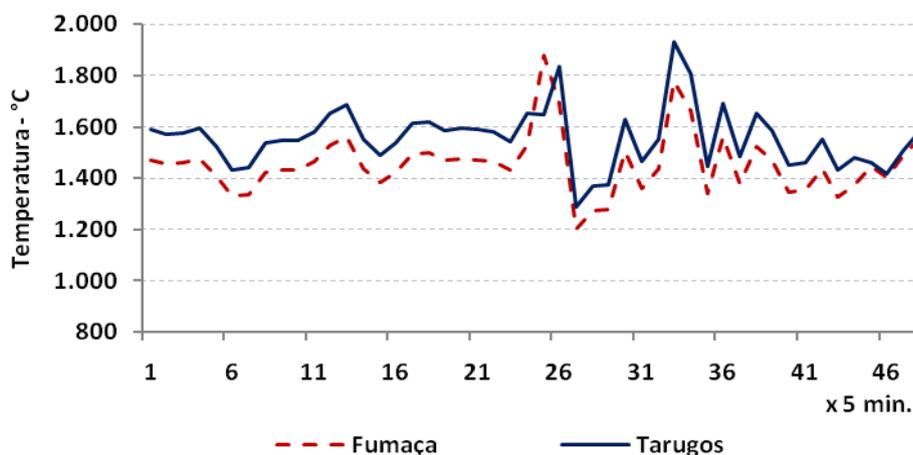


Figura 19 – Temperatura dos tarugos e média do forno calculado pelo programa

Do gráfico acima, observa-se que a temperatura média do forno é mais baixa do que a temperatura dos tarugos na saída, o que é correto afirmar tendo em vista que esta variável representa a temperatura ambiente média do forno, ou seja, considerando a média das temperaturas das quatro zonas do forno. Observa-se também que os valores apresentados para ambas as variáveis foram muito elevados, chegando a atingir valores acima do ponto de fusão do aço, o que indica que apenas as perdas de energia pela água de refrigeração e pelas paredes externas anteriormente calculadas não foram suficientes para retirar a quantidade suficiente de energia dos produtos da combustão para que se atingissem valores adequados. Desta maneira, foi estabelecida outra variável no balanço geral referente às outras perdas envolvidas e que até então não haviam sido consideradas.

As outras perdas, aqui denominadas \dot{Q}_p , se devem principalmente devido a fatores como a saída de gases pelas aberturas existentes no forno e entrada de ar externo pela porta de enforamento que, embora a pressão interna do forno seja positiva, ocorre em virtude de a porta estar localizada próximo à saída de gases, provocando uma depressão nesta região. Tais perdas são difíceis de mensurar e o cálculo deve ser objeto de um estudo amplo e complexo. Neste trabalho, \dot{Q}_p foi calculado empiricamente através da equação geral do sistema, a partir da diferença entre todas as entradas e saídas de energia, utilizando a temperatura média real dos produtos da combustão medidas pelos termopares existentes no interior do forno para o cálculo de $\dot{H}_{Produtos}$ e $\dot{Q}_{Tarugos}$, bem como as temperaturas

reais do ar e do GAF para o cálculo de \dot{Q}_{ar} e \dot{Q}_{GAF} respectivamente. Através desta metodologia, foi possível verificar e corrigir o coeficiente de transferência de calor entre o ambiente do forno e os tarugos com base em medições realizadas por um pirômetro óptico localizado externamente ao forno, após a quarta cadeira de laminação. A Equação (33) mostra a metodologia para o cálculo de \dot{Q}_P .

$$\dot{Q}_P = \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{GAF} + \dot{H}_{Reagentes(298,15K)} + \dot{Q}_{Carepa} - \dot{H}_{Produtos} - \dot{Q}_{Tarugos} - \dot{Q}_{água} - \dot{Q}_{Paredes} \quad (33)$$

Foi observado que \dot{Q}_P dependia fortemente da quantidade de energia que entrava no forno na forma de reagentes a 298,15 K. A metodologia para o cálculo de \dot{Q}_P em tempo real foi definida na forma de um modelo de regressão de 2ª ordem conforme mostrado na Equação (34).

$$\dot{Q}_P = 10,6 + 0,774 \cdot \dot{H}_{Reagentes(298,15K)} + 0,0127 \cdot (\dot{H}_{Reagentes(298,15K)})^2 \quad (34)$$

Após a definição de \dot{Q}_P , foi feito novo teste e verificado que, apesar de os valores calculados terem sido bastante coerentes em relação aos medidos, os perfis das curvas de temperatura média do forno medida e da temperatura dos tarugos na saída apresentavam um atraso em relação aos respectivos perfis das curvas dos valores calculados, indicando que o tempo de resposta dos cálculos era imediato e não considerava a estabilidade do sistema, variando subitamente diante de qualquer variação das entradas do modelo. A partir daí foi elaborado um modelo dinâmico para compensar este atraso, no qual são considerados que, não apenas os tarugos que entram e saem do forno (de acordo com o ritmo de produção) absorvem energia, mas também os tarugos que se encontram dentro do forno continuam a absorver energia diante de variações do ritmo. A mesma analogia foi feita para os produtos da combustão que se encontram no interior do forno, pois sempre que havia qualquer variação nas vazões de reagentes na entrada, o modelo interpretava que o volume de fumos no interior do forno também variava instantaneamente.

Para o cálculo do modelo dinâmico do forno, foi desenvolvida uma equação para a energia referente ao volume de fumaça acumulado dentro do forno (Equação (35)) e outra equação para a quantidade de energia absorvida pelos tarugos dentro do forno (Equação (36)) referentes ao intervalo de 5 minutos (tempo de processamento dos dados).

$$\dot{H}_{\text{Produto}\{Acum.\}} = \dot{H}_{\text{Produto}\{out\}} - \dot{H}_{\text{Produto}\{in\}} \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{\text{Tarugo}\{Acum.\}} = m_{\text{Tarugos}} \cdot c_{p(\text{Aço})} \cdot (T_{\text{Tarugo}\{out\}} - T_{\text{Tarugo}\{anterior\}}) \quad (36)$$

Onde

$\dot{H}_{\text{Produto}\{Acum.\}}$: Entalpia dos produtos da combustão acumulados dentro do forno

$\dot{H}_{\text{Produto}\{out\}}$: Entalpia dos produtos da combustão que estão saindo do forno (calculado no instante anterior)

$\dot{H}_{\text{Produto}\{in\}}$: Entalpia dos produtos da combustão que estão entrando do forno

$\dot{Q}_{\text{Tarugo}\{Acum.\}}$: Energia absorvida pelos tarugos que estão dentro do forno

m_{Tarugos} : Massa total dos tarugos dentro do forno (255 t)

$c_{p(\text{Aço})}$: Calor específico médio do aço

$T_{\text{Tarugo}\{out\}}$: Temperatura dos tarugos na saída do forno

$T_{\text{Tarugo}\{anterior\}}$: Temperatura dos tarugos que saíram do forno (calculado no instante anterior)

As duas variáveis calculadas pelas equações (35) e (36) foram inseridas na equação geral do sistema, gerando a Equação (37).

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{ar} + \dot{Q}_{GAF} + \dot{H}_{Reagentes(298,15K)} &= \dot{H}_{Produtos} + \dot{H}_{Produto(Acum.)} + \\ + \dot{Q}_{Tarugos} + \dot{Q}_{Tarugo(Acum.)} + \dot{Q}_{Perdas} + \dot{Q}_{Carepa} \end{aligned} \quad (37)$$

Após a implementação destas correções, o resultado final é apresentado no capítulo seguinte.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Para a apresentação dos resultados, o programa foi executado em tempo real e foram selecionados dados de operação do forno em regime transiente de forma a mostrar o comportamento dinâmico do modelo. Desta maneira, foram analisadas as condições operacionais com variações significativas do ritmo de produção do forno e das vazões de GAF, GN e de ar enriquecido com oxigênio. Foi considerado um tempo de operação de 5 horas e 30 minutos, tempo suficiente para mostrar a resposta do modelo frente às diferentes condições operacionais. A coleta de dados para o processamento do programa é feita uma vez a cada segundo e os valores são agrupados calculando-se a média a cada 5 minutos através do PIMS antes de serem processados, gerando um total de 66 dados. Os gráficos das Figura 20 a 22 mostram a variação da condição operacional do forno durante o período da análise.

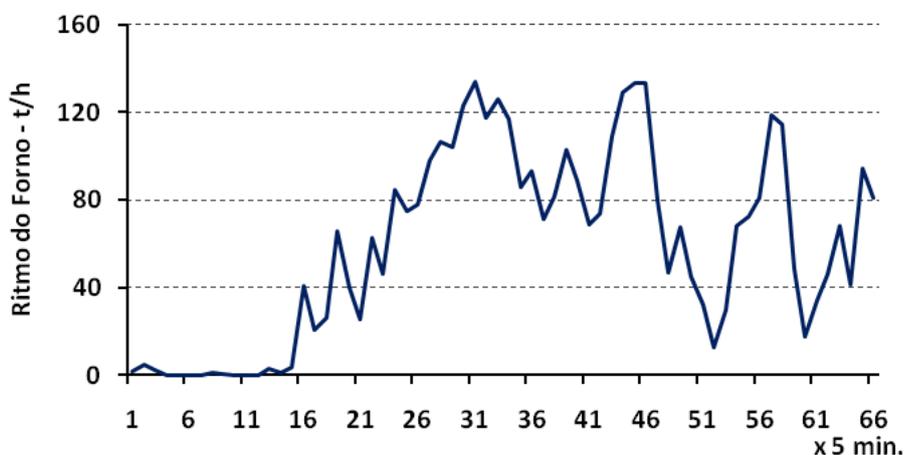


Figura 20 – Variação do ritmo de produção do forno

Observa-se no gráfico da Figura 20 que o ritmo de produção variou desde o momento em que o forno estava sem produzir (parado), até atingir momentos de produção máxima, chegando a ultrapassar a capacidade nominal do forno (120 t/h). Apesar de não estar produzindo, o forno ainda precisa continuar a consumir energia para a manutenção da sua temperatura interna, como pode ser visto no próximo gráfico.

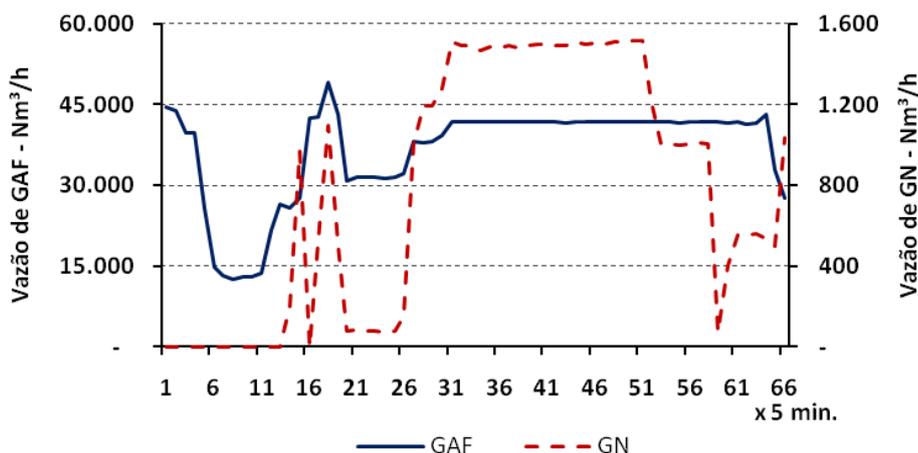


Figura 21 – Variação do consumo de combustíveis

No gráfico acima, destaca-se o instante em que se iniciou o aquecimento do forno para começar a produzir (ponto 11 do gráfico) devido ao aumento da vazão de combustíveis. A partir do ponto 31, em que a produção atingiu valores muito altos, o consumo de combustíveis também era alto, voltando a ter o seu valor reduzido junto com o ritmo de produção.

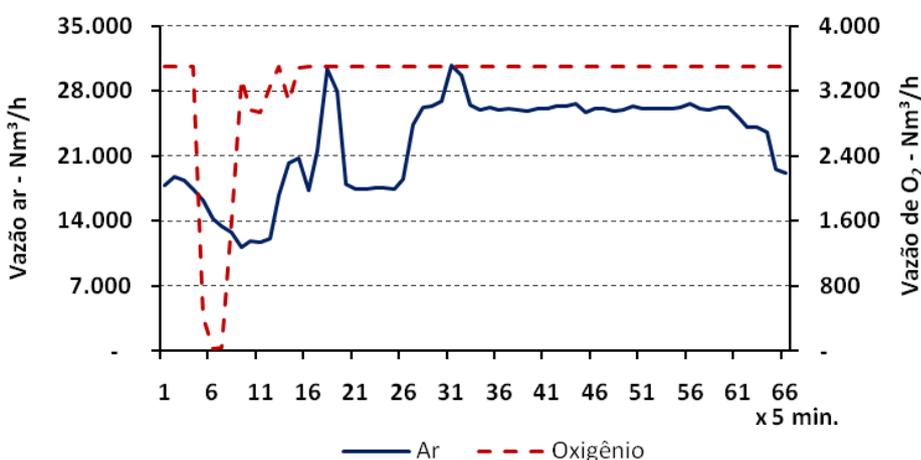


Figura 22 – Variação do consumo de comburentes

No gráfico da Figura 22, destaca-se o momento do ajuste da vazão de ar e de oxigênio em função da variação da vazão de combustíveis (pontos 1 a 31).

A vazão mássica dos produtos da combustão é função das vazões de combustíveis e de comburentes e suas respectivas densidades e é mostrado no gráfico da Figura 23.

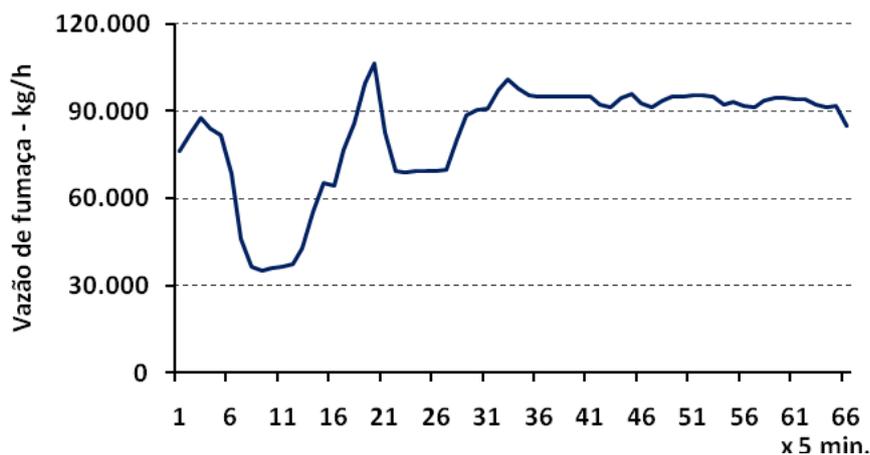


Figura 23 – Variação da vazão mássica dos produtos da combustão

A variação da composição química do GAF e da mistura dos combustíveis (GAF + GN) é mostrada nos gráficos das Figura 24 e 25 respectivamente.

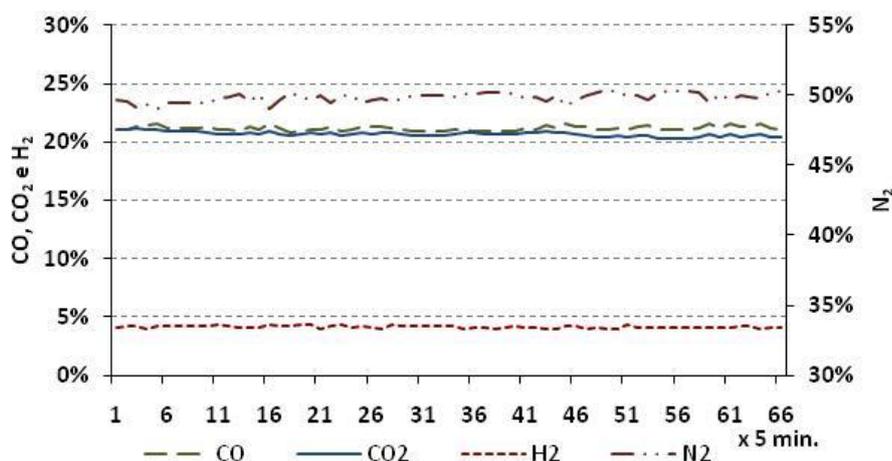


Figura 24 – Variação da composição química do GAF na base seca

A composição química é mostrada no gráfico acima, na forma como os valores foram extraídos do PIMS sem considerar a umidade do GAF fixa em 4,19%. Após a mistura dos combustíveis, a composição final na base úmida é mostrada no gráfico da Figura 25.

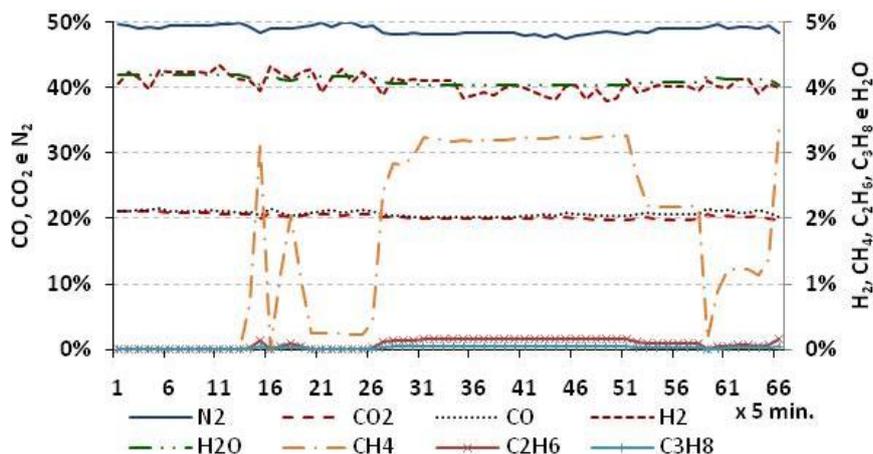


Figura 25 – Composição da mistura de combustíveis (GAF + GN) – base úmida

Observa-se no gráfico acima a variação do teor de CH_4 semelhante ao perfil da curva de vazão de GN mostrada no gráfico da Figura 21. A presença de C_2H_6 e de C_3H_8 é quase nula (apenas traços) devido ao volume muito maior de GAF do que de GN.

A composição química do ar enriquecido mostrada no gráfico da Figura 26 é calculada pelo programa considerando as vazões de ar e oxigênio, bem como a umidade absoluta do ar atmosférico, que é mostrada no gráfico da Figura 27.

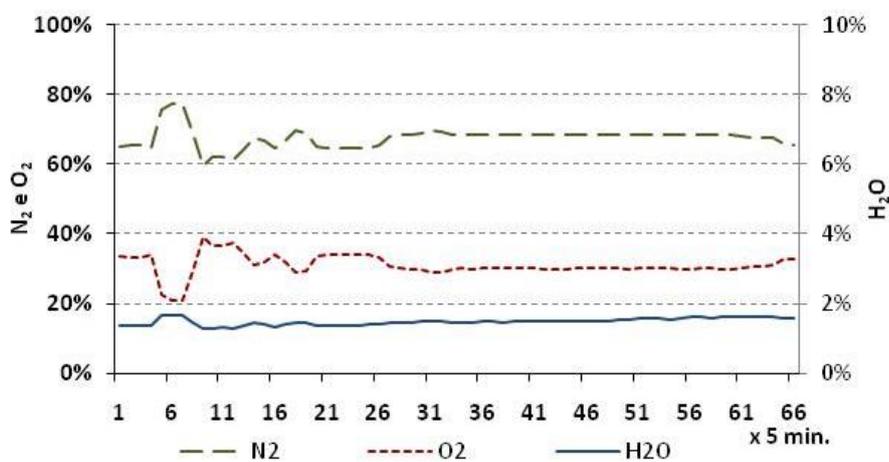


Figura 26 – Variação da composição química do ar enriquecido na base úmida

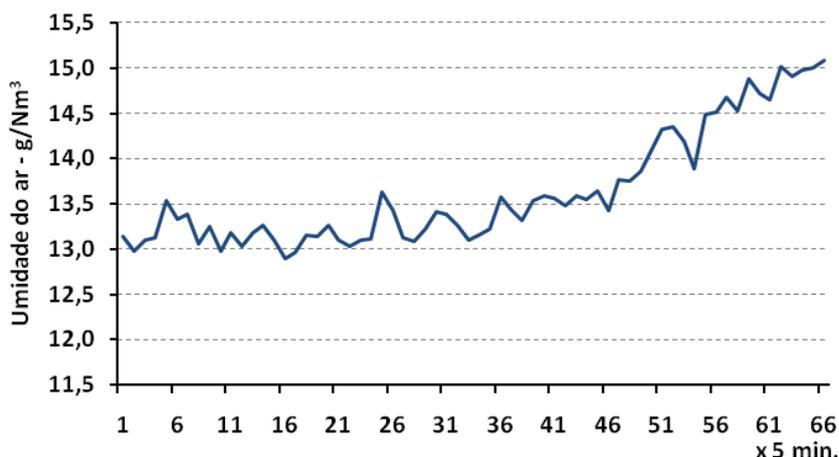


Figura 27 – Variação da umidade absoluta do ar atmosférico

O excesso de ar praticado em tempo real é calculado de acordo com as vazões e composições dos combustíveis e do ar enriquecido e pode ser observado no gráfico da Figura 28.

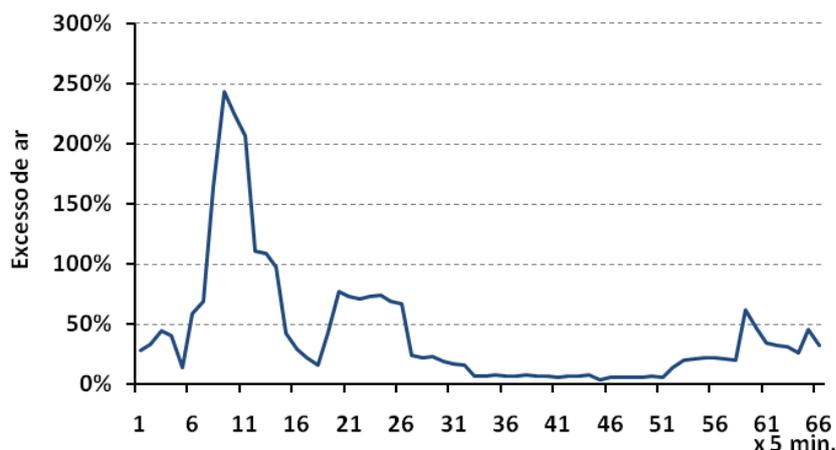


Figura 28 – Variação do excesso de ar

Observa-se no gráfico acima que, principalmente entre os pontos 1 a 31, em que houve uma grande variação das vazões de reagentes, o excesso de ar sofreu também grandes variações devido às tentativas de ajuste pelo sistema de controle de combustão do forno. Ressalta-se que este ajuste levou um tempo de aproximadamente três horas para ser feito até que se atingisse uma condição estável de operação. A partir do ponto 51 houve nova variação em função, principalmente, da queda súbita da vazão de GN.

O gráfico da Figura 29 mostra a comparação entre a relação ar/combustível praticada em tempo real e a estequiométrica.

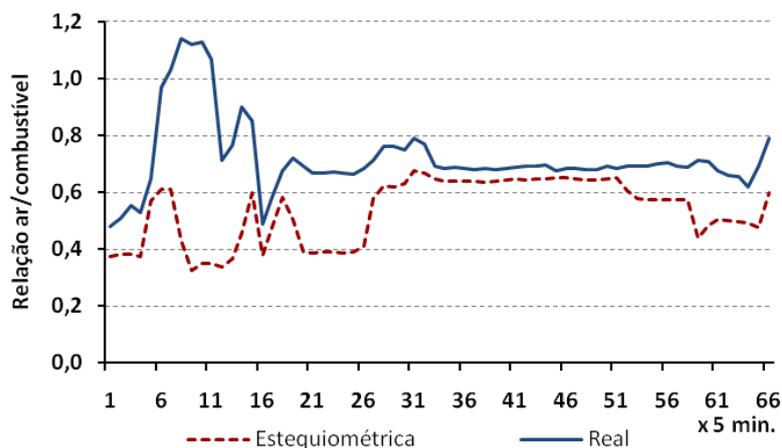


Figura 29 – Variação da relação ar/combustível real e estequiométrica

Destaca-se que durante todo o tempo da simulação, a relação ar/combustível real é superior à estequiométrica, indicando, conforme o gráfico da Figura 28, que sempre houve excesso de ar na mistura de reagentes.

Como dito anteriormente, o modelo suporta cálculos de combustão completa para misturas pobres e de combustão incompleta a uma equação de equilíbrio químico para misturas ricas. Após as reações de combustão, a composição química dos produtos pode ser observada no gráfico da Figura 30.

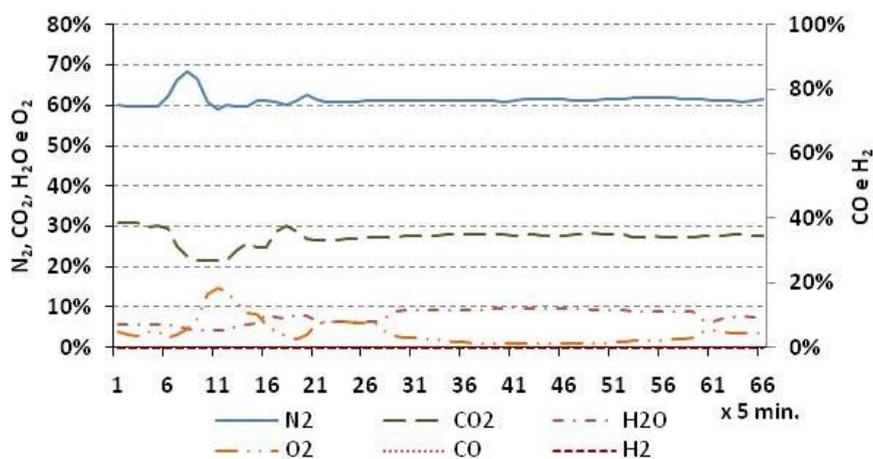


Figura 30 – Variação da composição química dos produtos da combustão

No gráfico acima, destaca-se uma variação dos níveis de N₂, de O₂ e de H₂O em função do grande excesso de ar aliado à grande redução da vazão de oxigênio para enriquecimento do ar de combustão. A variação da concentração de CO₂ se deve em função da redução da vazão de GAF, que possui a maior concentração deste gás. Além

disto, também devido à redução de combustíveis, houve a redução da formação de CO_2 nas reações de combustão.

Ainda no gráfico acima, destaca-se também a ausência de CO e de H_2 nos produtos da combustão em consonância com o excesso de ar mostrado no gráfico da Figura 28. Não foram considerados os teores de NO_x e outros componentes formados a fim de simplificar os cálculos do modelo.

O gráfico da Figura 31 mostra as entradas de energia calculadas pelo programa.

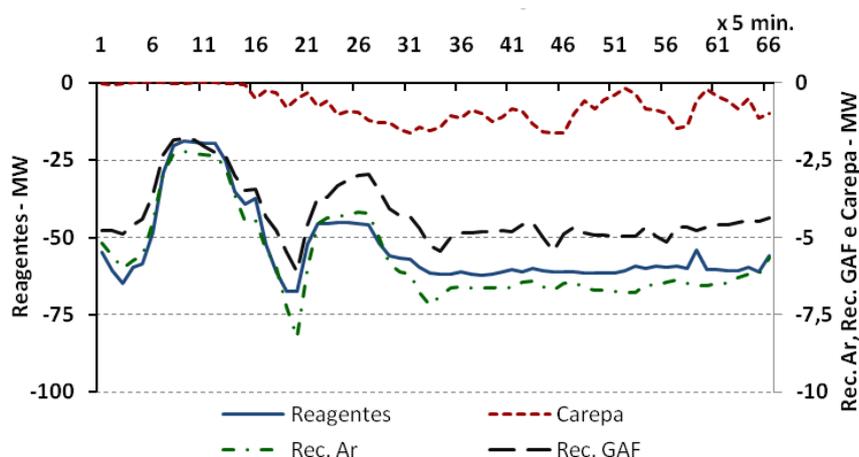


Figura 31 – Variação das entradas de energia

A energia de entrada dos reagentes é calculada a 298,15 K. Destaca-se a semelhança entre o perfil das curvas das energias dos reagentes, recuperada pelo ar e recuperada pelo GAF. Este perfil é semelhante ao perfil das curvas de vazão de entrada dos combustíveis. A energia liberada pela formação de carepa é função do ritmo de produção e segue o mesmo perfil do gráfico da Figura 20.

As saídas de energia são compostas pelas perdas e pelas energias absorvidas no processo e podem ser observadas no gráfico da Figura 32.

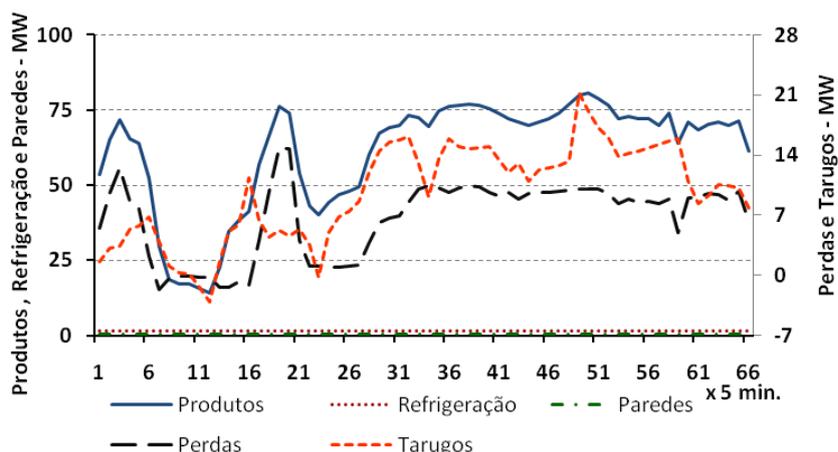


Figura 32 – Variação das saídas de energia

Destaca-se no gráfico acima a variação da energia absorvida pelos tarugos, que é função do ritmo de produção e da temperatura média do forno. Observa-se em alguns momentos que a energia absorvida pelos tarugos teve o seu valor negativo, indicando que os tarugos “cederam” energia ao forno em virtude do baixo ritmo de produção e da baixa vazão de reagentes. A energia contida nos produtos da combustão é função de todas as energias de entrada e de saída do forno. As perdas variam em função da energia de entrada dos reagentes e tem um perfil semelhante comparando as duas curvas. A energia absorvida pela água de refrigeração e perdida pelas paredes externas do forno são fixas e muito baixas comparadas às outras variáveis mostradas no gráfico acima.

A temperatura média dos produtos da combustão representa a temperatura ambiente média do forno, ou seja, considerando as quatro zonas. Para mostrar este resultado na forma de gráfico, foi feita uma relação entre os valores calculados e a média obtida de todos os termopares das zonas do forno. Os valores absolutos não são mostrados para preservar informações de processo da ArcelorMittal Monlevade. De maneira análoga foi feito com a demonstração da temperatura de saída dos tarugos, que teve uma relação com a média das temperaturas medidas nas zonas 3 e 4 (encharque). O gráfico da Figura 33 mostra a variação destas temperaturas.

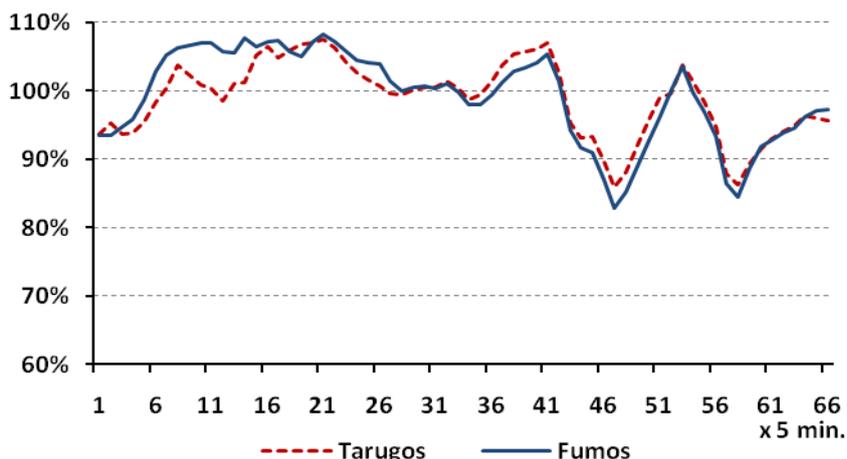


Figura 33 – Variação das temperaturas de saída dos tarugos e média do forno

Destaca-se no gráfico acima que, de uma forma geral, a relação entre as temperaturas medida e calculada para ambas as variáveis apresentou um bom índice de acerto, com exceção dos momentos em que houve maior discrepância (pontos 46 e 61). Isto se deve ao aumento repentino do ritmo de produção aliado à redução do consumo de GN. Estas discrepâncias também demonstram que a dinâmica do programa suporta determinados graus de variação, mostrando certa deficiência nestes cálculos diante de variações súbitas de determinadas variáveis.

Os gráficos das Figura 34 e 35 apresentam a comparação entre as temperaturas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor de ar e de GAF respectivamente calculadas pelo programa e medidas pelos respectivos termopares.

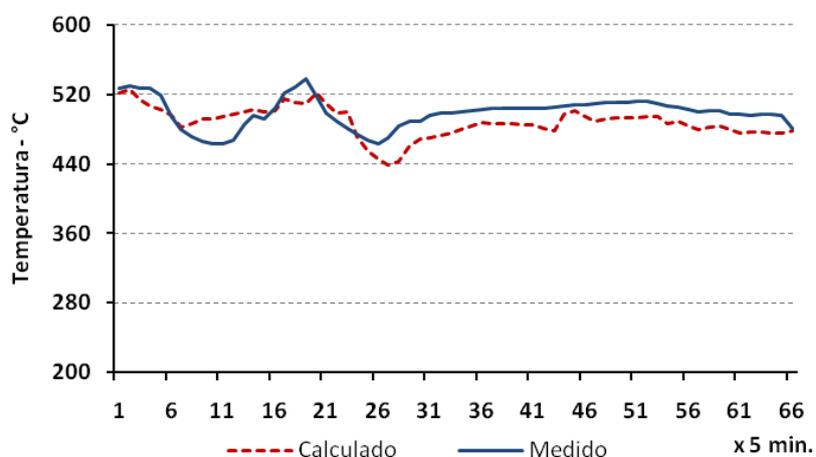


Figura 34 – Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de ar – medido x calculado

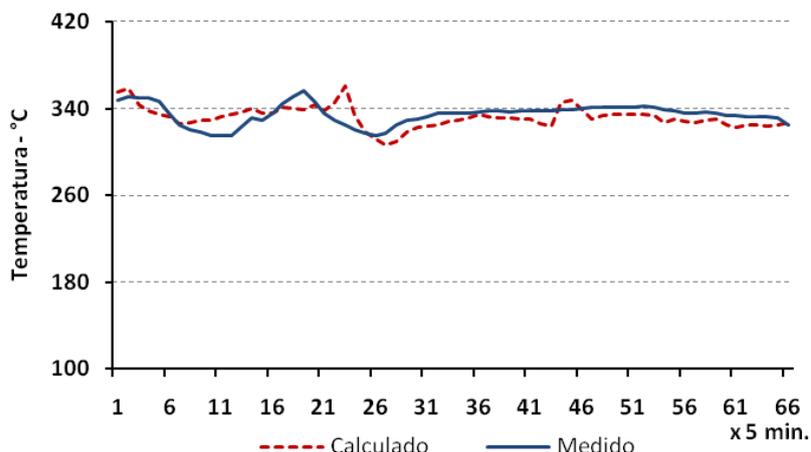


Figura 35 – Variação da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado

Observa-se em ambos os gráficos uma boa aproximação dos valores calculados em relação aos valores medidos, mesmo tendo em vista as variações das vazões de reagentes, principalmente em virtude de ter sido utilizada a temperatura dos produtos da combustão medida imediatamente antes da entrada no recuperador de calor de ar para os cálculos destes valores. O perfil muito parecido das curvas medido e calculado mostra também que o modelo de regressão criado para o cálculo da temperatura dos produtos da combustão após passagem pelos recuperadores de calor foi bastante eficiente.

Os gráficos das Figura 36 e 37 mostram a comparação entre as temperaturas do ar e do GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores de calor, calculadas pelo programa e medidas pelos respectivos termopares.

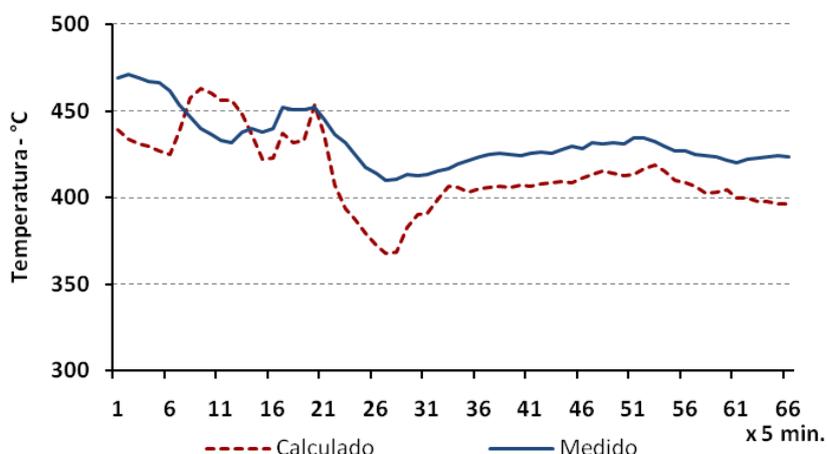


Figura 36 – Variação da temperatura do ar após passagem pelo recuperador de calor de ar – medido x calculado

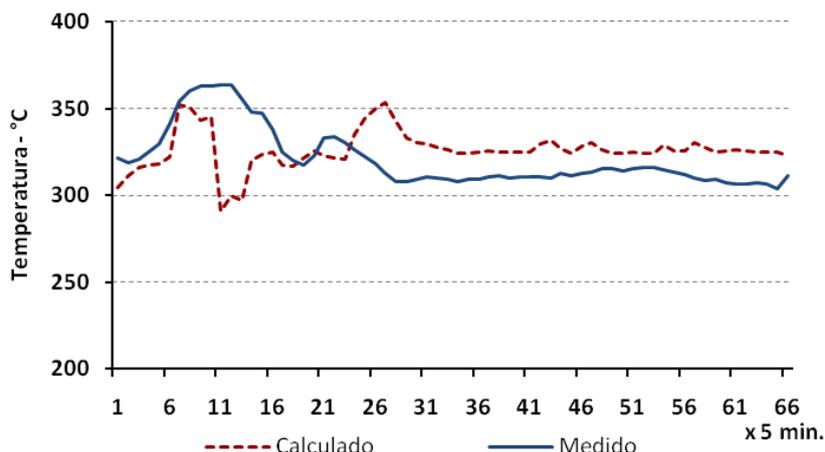


Figura 37 – Variação da temperatura do GAF após passagem pelo recuperador de calor de GAF – medido x calculado

Assim como no caso das temperaturas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores, observa-se nos gráficos das Figura 36 e 37 uma boa aproximação dos valores calculados em relação aos valores medidos, mas foi observada uma discrepância nos valores quando ocorreram grandes variações nas vazões de reagentes, pelo motivo que a baixas vazões, o coeficiente de transferência de calor dos recuperadores sofre variação mais significativa. De um modo geral, quando operando em condições normais, esta curva tende a se estabilizar.

O gráfico da Figura 38 mostra a efetividade dos recuperadores de calor de ar e de GAF, calculadas pelo método de NUT.

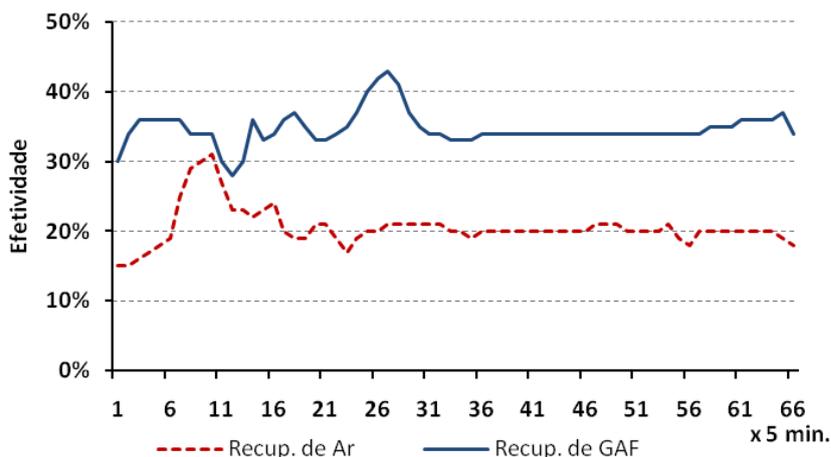


Figura 38 – Variação da efetividade dos recuperadores de calor

Observa-se no gráfico anterior um comportamento diferente comparando a efetividade de ambos os recuperadores de calor, pois esta variável é função da vazão

mássica do fluido frio (ar e GAF), bem como da vazão mássica do fluido quente (produtos da combustão). Destaca-se que o valor da efetividade dos recuperadores de calor é diretamente proporcional à vazão dos fluidos frios e inversamente proporcional à vazão dos fluidos quentes, pois, conforme Equação (24), quanto mais baixa for a taxa máxima de transferência de calor para o recuperador (q_{max}), maior será o seu rendimento. O contrário ocorre com a taxa real de transferência de calor do recuperador. Desta maneira, é correto afirmar que a maior efetividade dos recuperadores de calor não significa ser a melhor condição operacional para o forno, pois deve ser priorizada a quantidade de energia necessária para o correto aquecimento dos tarugos.

O rendimento do forno é calculado pela razão entre a energia absorvida pelos tarugos e pela soma das entradas de energia do processo e é mostrado no gráfico da Figura 39.



Figura 39 – Variação do rendimento do forno

Destaca-se no gráfico acima os momentos em que o rendimento do forno obteve valores negativos, em função do baixo ritmo de produção, comparado à alta vazão de combustíveis na entrada. Observa-se também que, quando o forno operou nas suas condições mais estáveis o rendimento permaneceu com valores em torno de 30%. Segundo TRINKS e MAWHINNEY, 1975, em condições favoráveis, com um excelente e custoso projeto e com um bom funcionamento, pode-se obter rendimentos de até 60%. De fato, no momento em que o forno opera com alta vazão de GN e baixa vazão de GAF o seu rendimento é maior, mas não significa que seja desejável devido ao alto custo operacional, portanto, devem ser feitas análises de custo-benefício para se determinar o maior rendimento desejável para o forno em questão.

Com todas as entradas e saídas de energia quantificadas, é possível propor um método de gerenciamento do processo de aquecimento de tarugos em tempo real. Para exemplificar, foi feito o balanço energético global simplificado do forno, tomando os dados calculados em um único ponto dos gráficos apresentados acima. Foi escolhida uma situação de operação estável do forno para mostrar o seu comportamento em condições normais (ponto 43). Os gráficos da Figura 40 apresentam: (a) a parcela de contribuição de cada entrada de energia e (b) a parcela de contribuição de cada saída de energia.

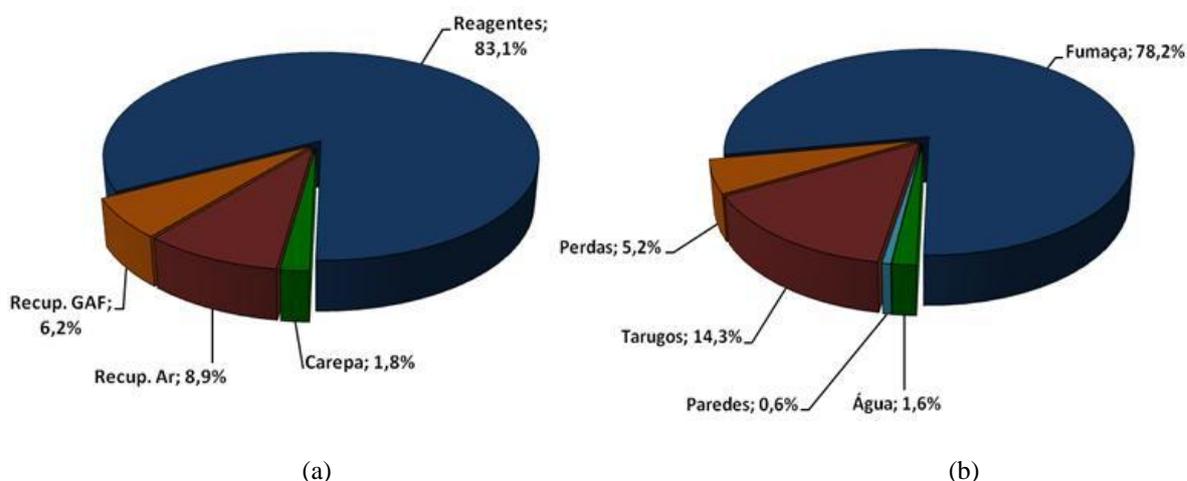


Figura 40 – Balanço energético global simplificado do forno

Observando os dados da Figura 40 em tempo real, é possível direcionar esforços no sentido de reduzir a participação da parcela referente aos reagentes de duas maneiras: aumentando as parcelas referentes aos recuperadores de calor, o que consequentemente reduziria as perdas (conforme Equação (33)); ou trabalhar com um ritmo de produção mais alto para aumentar a parcela de energia absorvida pelos tarugos e consequentemente o rendimento do forno. É preciso ressaltar que antes de se tomar alguma decisão quanto ao ajuste dos parâmetros do forno, primeiramente se faz necessária uma análise levando-se em consideração diversos fatores operacionais até que se alcance a melhor condição operacional. Como exemplo, é possível se fazer uma análise da parcela de contribuição do GAF, do GN e do oxigênio no custo do aquecimento em função das vazões de entrada. O GAF, apesar de ser um combustível produzido internamente possui o seu custo calculado com base no custo da energia elétrica. O gráfico da Figura 41 apresenta estes valores em tempo real.

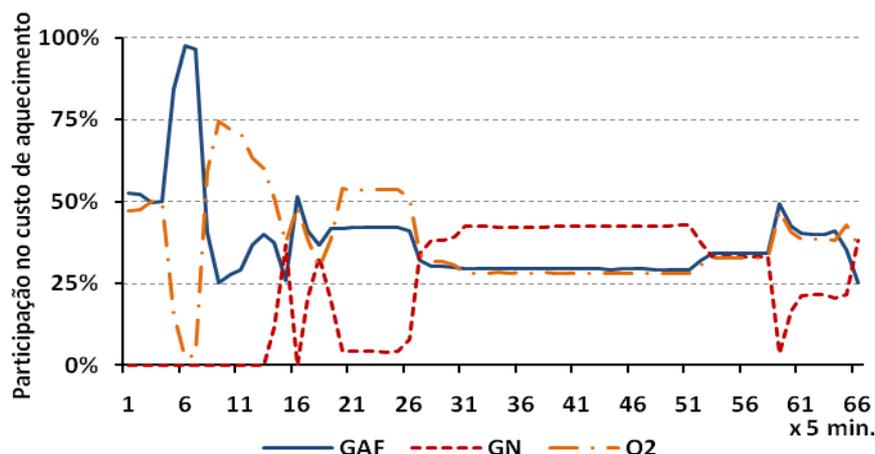


Figura 41 – Parcela de contribuição dos principais reagentes no custo de aquecimento

Nitidamente, na região de estabilidade, é possível observar a partir do gráfico acima que o GN possui o maior custo dentre todos os reagentes, desta forma, os esforços do operador tem de estar voltados principalmente para a redução deste reagente no processo. Destacando-se o período entre os pontos 31 e 51 (em que o forno operava de maneira mais estável), são feitas as seguintes considerações:

- O oxigênio já se encontra em sua vazão máxima, não sendo possível uma maior adição buscando o aumento da temperatura da chama e redução de GN;
- Comparando-se o PCI do GAF com o do GN, a relação média é de 11 Nm³ de GAF para 1 Nm³ de GN, portanto, uma substituição de 100 Nm³/h de GN demandaria aproximadamente 1.100 Nm³/h de GAF para alcançar o mesmo potencial energético, o que poderia aumentar a pressão interna do forno dependendo das condições operacionais naquele momento;
- É preciso fazer os ajustes acompanhando sempre os principais parâmetros do forno até que se atinja um valor ótimo de operação, sem prejudicar a segurança do processo e a qualidade do produto final.

A Tabela 3 apresenta alguns dos itens de controle que podem ser analisados para a implantação de um modelo de gerenciamento em tempo real de um forno de reauecimento. Novamente foi tomado o ponto 43 do gráfico como exemplo.

Tabela 3
Itens de controle para acompanhamento do processo

Item de Controle	Valor em tempo real
Consumo específico de GAF	381 Nm ³ /t
Consumo específico de GN	13,7 Nm ³ /t
Consumo específico de O ₂	32,05 Nm ³ /t
Consumo específico de energia	549,6 kWh/t
Consumo específico de combustíveis	472 kWh/t
Participação do GAF no custo	29,4%
Participação do GN no custo	42,4%
Participação do O ₂ no custo	28,2%
Rendimento do forno	27,2%
Rendimento do Recuperador de Ar	20%
Rendimento do Recuperador de GAF	34%
Excesso de ar	6,65%
Teor de O ₂ na atmosfera do forno	0,92%
Perda específica de energia	62 kWh/t

Mais uma vez é importante lembrar que o balanço proposto neste trabalho é feito de forma global e as alterações nas condições operacionais são feitas separadamente em cada zona, portanto a sensibilidade do operador é fundamental na fase dos ajustes no sentido de alcançar o ponto ótimo de operação. Outro ponto importante no que se refere ao ajuste dos parâmetros é que a modificação de uma das variáveis leva à mudança de várias outras, devendo-se ter um cuidado especial para não prejudicar a segurança do processo e a qualidade do produto final. De qualquer forma um modelo de gerenciamento em tempo real se apresenta como um grande passo para a melhoria do processo e aumento da competitividade da empresa.

6 ANÁLISE DE ERROS: UMA DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma discussão sobre as principais fontes de incertezas presentes no modelo matemático e nos sistemas de medição do forno. É feita uma análise contextual geral e uma análise comparativa entre valores medidos e calculados das temperaturas do ar e do GAF, bem como dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor. Outra análise comparativa é feita relacionando-se os valores medidos e calculados da temperatura dos tarugos na saída do forno e da temperatura média do forno.

6.1 Incerteza no modelo matemático

O modelo teórico deve representar o fenômeno físico real com a maior fidelidade possível, entretanto, simplificações foram necessárias para a sua construção, gerando incertezas nos cálculos e uma das fontes de incerteza identificada se refere ao método utilizado para o cálculo da composição química do GAF na base úmida, uma vez que a umidade do GAF foi considerada fixa em 4,19%. Este valor depende, além das propriedades termodinâmicas das misturas entre gases e vapor estudadas na psicrometria, da eficiência do lavador de GAF e dos equipamentos para a redução da sua umidade localizados no Alto Forno. Além disto, a temperatura dos reagentes nas condições ambientes não é medida, e sim fixada em 25°C. Outro ponto a se considerar é a composição química do GN fixada, o que influencia no cálculo da energia dos reagentes.

Mais uma fonte de incerteza vem do método utilizado para o cálculo da transferência de calor entre o forno e os tarugos, onde foi utilizado o princípio da convecção forçada com escoamento turbulento sobre uma placa isotérmica. Aqui não foi considerada a transferência de calor por radiação (processo de transferência de calor mais influente no aquecimento dos tarugos) e tampouco por condução. Além disto, a aplicação de um modelo de turbulência tornaria o cálculo da transferência de calor mais confiável. Mesmo com esta simplificação, é possível observar a partir do gráfico da Figura 19, que o

grau de incerteza foi bastante satisfatório considerando que estas variáveis tem uma forte correlação, tanto com as vazões dos reagentes, quanto com o ritmo operacional do forno. Destaca-se também que a dinâmica do forno é um fator de ajuste do modelo e suporta variações operacionais consideráveis, mas não o suficiente diante de variações bruscas na sua operação. Ainda assim, durante todo o tempo de simulação, o grau de incerteza se mostrou sempre abaixo de 20%, sendo que na maior parte do período considerado, a incerteza deste modelo se manteve abaixo de 10%. O mesmo pode ser dito com relação à temperatura média do forno, que apresentou um comportamento semelhante à temperatura dos tarugos na saída.

O valor da temperatura do ar enriquecido, do GAF e dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor foi obtido através de um modelo de regressão utilizado para o cálculo do calor específico médio dos recuperadores e também pode ser considerada outra fonte de incerteza. Esta incerteza é reduzida pelo fato de o método utilizar a temperatura dos produtos da combustão medida imediatamente antes do recuperador de calor de ar. O gráfico da Figura 42 apresenta uma relação comparativa entre os valores medidos e calculados para o ar e para o GAF após a passagem pelos respectivos recuperadores de calor.

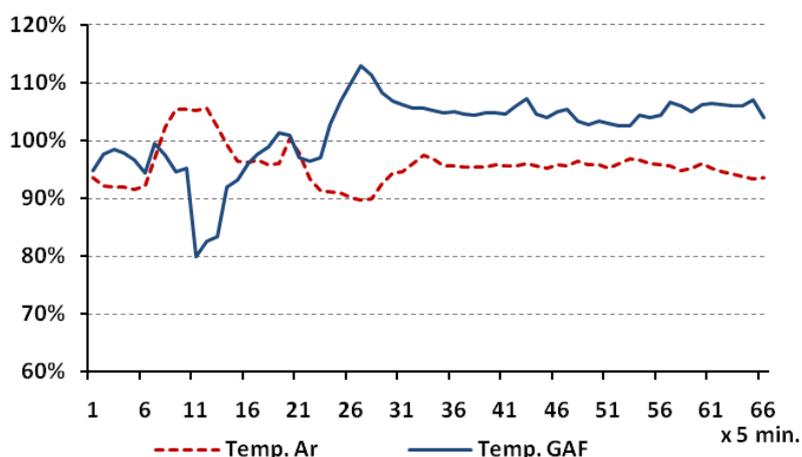


Figura 42 – Relação entre as temperaturas medidas e calculadas para o ar e para o GAF após passagem pelos recuperadores de calor

Do gráfico acima, pode-se destacar que, em condições operacionais estáveis (ponto 31 em diante), a diferença entre os valores medidos e calculados para ambos os gases é muito baixa, levando-se em consideração uma incerteza média dos instrumentos de medição de temperatura de $\pm 1,7\%$ sobre a vazão medida conforme visto no certificado do Anexo A e de uma tolerância de 1,06% sobre o fundo de escala conforme Anexo B. Para

condições operacionais com grandes variações das vazões dos reagentes, o modelo apresentou certa instabilidade, mas sempre acima dos 80% de acerto com relação aos valores medidos.

O gráfico da Figura 43 faz uma comparação semelhante relacionando-se as temperaturas medidas e calculadas dos produtos da combustão após a passagem pelos recuperadores de calor.

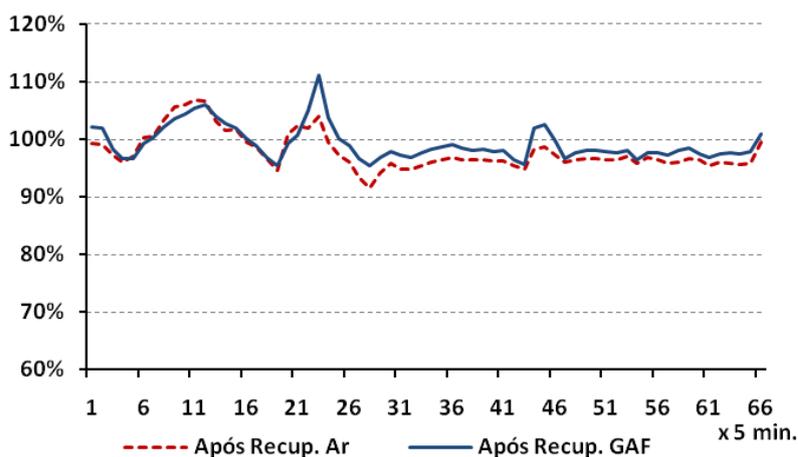


Figura 43 – Relação entre as temperaturas medidas e calculadas para os produtos da combustão após passagem pelos recuperadores de calor

Destaca-se no gráfico acima um índice maior de acerto dos valores calculados em relação aos valores medidos. Observa-se que, mesmo nos pontos onde o forno operou com grandes variações de vazão, o percentual de incerteza ainda não foi tão significativo.

O cálculo das perdas pelas paredes também é outra fonte de incerteza neste trabalho, pois foram simplificadas a apenas uma equação de transferência de calor por convecção natural, considerando fixas as temperaturas das paredes e do ambiente.

A energia absorvida pela água de refrigeração também sofreu uma simplificação com a fixação da vazão e das temperaturas de entrada e de saída do forno.

As perdas pelas aberturas do forno e outras perdas não consideradas neste trabalho foram reduzidas a um modelo de regressão de segunda ordem em função da energia dos reagentes a 298,15 K, pois foi considerado que a correlação entre esta variável e as perdas era muito maior do que as outras energias envolvidas no processo.

Outra fonte de incerteza relacionada ao modelo refere-se à estabilidade das reações químicas do processo de combustão. Neste trabalho são consideradas apenas as

principais reações da combustão estequiométrica, assim como apresentado na Tabela 2, na qual foi previsto apenas o excesso e a escassez de ar. Portanto não foram consideradas possíveis instabilidades no estado de equilíbrio destas reações químicas, ou seja, mesmo usando quantidades estequiométricas de reagentes ou considerando a reação incompleta, os produtos da combustão são acompanhados por reagentes não consumidos, bem como por produtos laterais, o que faz com que a equação química utilizada neste trabalho não represente o real mecanismo da reação.

7.2 Incerteza na medição dos parâmetros fornecidos pelo forno

As incertezas provenientes dos equipamentos utilizados para medição de vazão, temperatura, composição química do GAF e analisador de umidade do ar atmosférico também contribuem para promoverem uma propagação de erros nos cálculos. Neste sentido recomenda-se a calibração destes instrumentos, pois a exatidão dos cálculos está diretamente relacionada com a confiabilidade dos parâmetros medidos no forno.

Observa-se que a identificação e a minimização das fontes de incerteza representam um passo importante na busca de resultados cada vez mais confiáveis e, embora seja importante uma análise quantitativa da influência de todas as incertezas no modelo proposto, não é realizada neste trabalho, uma vez que os resultados obtidos satisfazem aos objetivos propostos inicialmente. Esta análise é sugerida como uma etapa complementar a ser realizada em atividades que representem a continuidade deste trabalho.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida e testada uma metodologia para a simulação em tempo real do processo de aquecimento de tarugos para laminação de uma linha de produção de fio máquina da ArcelorMittal Monlevade. O modelo se mostrou fiel ao processo com boa precisão, tanto em condições permanentes como também em regimes transientes.

Os dados analisados durante o período da simulação mostraram que em condições normais de operação, o rendimento do forno se mantém na faixa de 30%, chegando a atingir picos acima de 40%. Apesar dos picos apresentados, a análise do rendimento deve ser feita tomando-se como base maiores números de ensaios operacionais considerando que esta variável sofre alterações principalmente em função do ritmo de produção, dos volumes e composição dos reagentes e da energia recuperada pelos recuperadores de calor de ar e de GAF, sendo assim, é possível através do acompanhamento sistemático do balanço térmico em tempo real, estabelecer faixas de rendimento satisfatórias para diferentes modos de operação, permitindo tirar maior proveito da energia fornecida para o aquecimento dos tarugos.

O forno em estudo é controlado tendo como objetivo o alcance das temperaturas das zonas de pré-aquecimento, aquecimento e principalmente de encharque para obter uma temperatura adequada e homogênea de desenformamento dos tarugos. O modelo permitiu uma previsão desta temperatura cujos resultados acompanham qualitativamente os efeitos transientes do forno. Neste trabalho, foi feita uma análise comparativa entre a temperatura de saída dos tarugos calculada e a temperatura medida nas zonas de encharque do forno (zonas 3 e 4), apresentando diferenças em torno de 9% devido ao fato de a temperatura do tarugo não ser realmente a temperatura dos gases de combustão destas zonas. Este parâmetro é uma informação importante para a fase de laminação, já que a sua medição não é feita no processo da ArcelorMittal Monlevade. Assim os operadores dispõem de mais uma ferramenta como referência para avaliar uma condição importante para a fase de produção seguinte.

O modelo dos recuperadores de calor de ar e de GAF permitiu avaliar suas respectivas efetividades e os parâmetros que as influenciam. A efetividade do recuperador de calor de ar se manteve em torno de 20%, já a efetividade do recuperador de calor de GAF apresentou valores em torno de 35%. Os recuperadores de calor devem ser analisados de maneira análoga à análise do rendimento do forno, uma vez que deve ser priorizado o controle da energia necessária para o correto aquecimento dos tarugos como um todo, e não apenas o rendimento dos mesmos, pois tentativas no sentido de aumentar a efetividade dos recuperadores de calor demandam variações principalmente nas vazões dos reagentes, podendo gerar eventos indesejáveis para o processo, afetando a qualidade do aquecimento dos tarugos e até mesmo diminuindo a eficiência do forno. O cálculo das temperaturas dos fluidos frios (ar e GAF) e do fluido quente (produtos da combustão) apresentou uma boa concordância com os valores medidos com desvios médios inferiores a 5%. Assim, o cálculo destas temperaturas permite que seja feita uma análise de discrepância entre os valores medidos e calculados em tempo real para que possam ser detectadas falhas em sistemas de medição ou funcionamento dos equipamentos no caso de variações significativas entre estes valores.

Outra variável de destaque e importante fator que contribui diretamente no melhor aproveitamento da energia no processo refere-se ao excesso de ar praticado nas reações de combustão. Como foi mostrado ao longo do trabalho, existem deficiências no sistema de controle da combustão, principalmente quando há variações da carga do forno e das vazões dos reagentes. Fato que foi comprovado analisando-se o gráfico da Figura 28, em que os valores de excesso de ar chegaram a atingir níveis acima de 200%, enquanto o desejável é em torno de 5 a 15%. O efeito de transiente do forno apontou um tempo de resposta de mais de duas horas para o ajuste automático das variáveis pelo sistema de controle de combustão até que se atingissem as condições de estabilidade do processo. O gráfico mostra também que apenas a partir do momento em que o excesso de ar foi devidamente controlado é que o rendimento do forno se tornou mais estável, permitindo concluir que o modelo apresentado pode indicar maneiras de minimizar as deficiências de controle do forno. Melhorias nestes transientes de excesso de ar significariam um aumento no rendimento médio do forno e conseqüentemente na redução de custo do processo.

Atualmente o modelo de gerenciamento é feito uma vez a cada turno e é focado principalmente nos consumos de reagentes e na produção efetiva. Anualmente é feito um balanço de energia onde se considera apenas o consumo específico de energia proveniente

dos combustíveis. Através do acompanhamento do balanço térmico em tempo real, é possível propor um modelo instantâneo de gerenciamento do processo com foco no ponto ótimo de operação e nos pontos fracos observados. Este modelo de gerenciamento pode também estar focado na melhoria da qualidade do produto, buscando uma maior valorização no mercado.

Na redução de custos, ganhos significativos podem ser alcançados, visto que apesar de o GAF ser um combustível gerado internamente no processo produtivo, a sua distribuição para os consumidores gera custos e o preço do GAF estabelecido pela empresa é aproximadamente quatro vezes menor que o do GN, analisando em termos de equivalência energética. Assim, o GN passa a ser utilizado como um modulador e a partir disto podem ser estabelecidas misturas destes reagentes em busca da melhor relação custo-benefício com o maior rendimento possível. Para exemplificar, uma redução de US\$1,00/t no custo de produção do TL1, significa uma economia de US\$60.000,00/mês para a ArcelorMittal Monlevade.

Com todo o potencial de ganho aqui demonstrado, ainda é preciso que a implementação do modelo como uma ferramenta de gerenciamento do processo seja feita através do estabelecimento de práticas padrão, itens de controle e faixas de valores operacionais, de forma que os operadores possam visualizar em tempo real as condições do forno e tomar decisões em busca de maior economia e qualidade de aquecimento.

Neste trabalho, foram apresentadas primeiramente as características do processo e dos reagentes a fim de prover o leitor de informações para facilitar o entendimento do método utilizado. Em seguida foram apresentados o modelo matemático, a metodologia de ajustes e as análises dos resultados. Em uma análise de erros, foram discutidas as principais fontes de incerteza do modelo e dos parâmetros medidos do forno. Ressalta-se que estas fontes de incertezas devem ser conhecidas e minimizadas para uma melhor precisão dos resultados.

Propostas para trabalhos futuros

- Revisar o procedimento operacional do forno com foco na utilização do modelo proposto para a melhoria do controle do processo;
- Refinar o modelo proposto através do cálculo do balanço térmico do forno separadamente por zona;

- Adaptar a metodologia proposta no processo de aquecimentos de tarugos do TL2 e, posteriormente em outras empresas do grupo ArcelorMittal;
- Realizar uma análise de erro verificando os efeitos de cada parâmetro na modelagem proposta;
- Investigar e modelar separadamente os processos de transferência de calor a fim de reduzir o número de simplificações no modelo como, por exemplo, a melhoria da metodologia de cálculo da transferência de calor entre o forno e os tarugos;
- Propor uma metodologia para a análise exergética do sistema a fim de se determinar o trabalho teórico máximo que pode ser obtido do processo;
- Implementar o modelo no sistema de controle de combustão e de temperatura do forno de forma a reduzir o consumo de energia térmica;

8 ABSTRACT

This paper presents the development of a mathematical computer model to simulate the heating process of billets in a rolling reheating furnace. The proposed method simulates the combustion process, calculating the energy input, output and losses inherent of the process. The computational algorithm of the furnace simulation allows the user to reproduce the combustion process from the reactants flow measurements at the entrance and their respective compositions and, thereafter, it calculates the products composition through a complete combustion model to lean mixing and incomplete combustion, at a chemical equilibrium equation for rich mixtures. The billets temperature is calculated by determining the heat transfer coefficient between the furnace atmosphere and the billets used for this, the forced convection with turbulent flow over an isothermal plate principle. The air energy and the Blast Furnace Gas energy recovered after passing through the heat exchangers is calculated using regression models developed empirically and the yields of such stoves are determined by the NTU effectiveness method (Number of Transfer Units). The loss by cooling water and the outer furnace walls are determined by simplified models, the other losses are calculated using an empirical regression model in which measured data is used in the process. To determine the final objective function, we adopted the Newton-Raphson method for finding roots. The simulation allows to calculate: the instantaneous process thermal balance, the furnace and heat exchangers efficiency, the chemical composition of the mixture of reactants and combustion products, the air excess used in the reaction, the reactants and combustion products temperature after passing through the heat exchangers; the billet temperature after heating and other important variables for process management. The model proved to be an effective tool for a more refined management of the process in real time.

Key Words: Heat Balance; Reheating Furnace; Energy Consumption

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo matemático computacional capaz de simular el proceso de calentamiento de barras de acero en el interior de un horno de recalentamiento para laminación. La metodología propuesta simula el proceso de combustión, calculando las energías de entrada, salida y las pérdidas inherentes al proceso. El algoritmo computacional de simulación del horno permite al usuario la reproducción del proceso de combustión a partir de los volúmenes medidos de los reactivos en la entrada y de sus respectivas composiciones y, a partir de entonces, se calcula la composición de los productos a través de un modelo de combustión completa para mezclas pobres y de combustión incompleta, a una ecuación de equilibrio químico, para mezclas ricas. La temperatura del desenhorno las barras de acero se calcula por medio de la determinación del coeficiente de transferencia de calor entre el ambiente del horno y las barras de acero, utilizando, para eso, el principio de convección forzada con flujo turbulento sobre una placa isotérmica. La energía del aire y del GAF recuperada tras el paso por los recuperadores de calor se calcula a través de modelos de regresión desarrollados empíricamente y sus respectivos rendimientos son determinados por el método de efectividad de NUT (Número de Unidades de Transferencia). Las pérdidas por el agua de refrigeración y por las paredes externas del horno son determinadas a través de modelos simplificados y se calcularon las otras pérdidas siguiendo un modelo de regresión empírico en el cual se utilizaron datos medidos en el proceso. Para determinar el resultado de la función objetivo final, se adoptó el método de búsqueda de raíces de Newton-Raphson. La simulación permite calcular: el balance térmico en el presente caso, la eficiencia de los intercambiadores de horno y el calor, la composición química de la mezcla de reactivos y productos de la combustión y el exceso de aire utilizado en la reacción, la temperatura de los reactivos y productos de combustión después de pasar por los intercambiadores de calor; la temperatura de desenhorno de las barras, entre otras variables importantes para la gestión de procesos. El modelo ha demostrado ser un instrumento eficaz para un manejo más refinado del proceso en tiempo real.

Palabras claves: Balance Térmico; Horno de Recalentamiento; Consumo de Energía.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANTES, L. F. M. Análise e Simulação do Perfil Térmico das Painéis de Aço de Uma Aciaria LD, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2010

BARROS, J. E. M. e BAÊTA, J. G. C., Estudo da Transferência de Calor em Motores, 2006. Disponível em http://mautone.eng.br/lectures_notes.htm. Acesso em 17/07/2010

BARROSO, L. C., BARROSO, M. M. A., CAMPOS FILHO, F. F., CARVALHO, M. L. B. e MAIA, M. L. Cálculo Numérico. São Paulo: Editora Harbra, 2ª ed., 1987.

BAUKAL Jr. C. E. Industrial Burners Handbook, 2003 by CRC Press LLC

CHEN, W., LIN, M., LEU, T. Optimal Heating and Energy Management for Slabs in a Reheating Furnace, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 24-31 (2010)

COMPANHIA DE GÁS DE MINAS GERAIS, GASMIG. Análise química do GN, MG, jan. 2010

DE CARVALHO, S., R. Desenvolvimento de um Modelo Matemático e Computacional de um Forno de Recozimento, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2003

GORDON, S., and MCBRIDE, B.J., 1976, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations," NASA SP-273, Interim Revision.

GORNI, A. A., PEREIRA, M. M., FIALHO, R. R., PFEITSTICKER, G. K., DA SILVA, L. R., JR., P. F. Análise do Desempenho de Fornos para Laminação e Tratamento Térmico Através de Balanço Térmico, XXIV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 6 a 8 de agosto de 2002, São Paulo SP

HAUCK, G. A. C., LAIA, L. L. Fornos de Reaquecimento, 2000, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM

INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 5ª Edição, 2003, LTC – Livros Técnicos e Científicos

LIU, Z., LI, L. An Estimation Temperature by analysis of Transient Heating of a Slab in Reheating Furnace, 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation

MCBRIDE, B. J., GORDON, S., RENO, M. A. Coefficients for Calculating Thermodynamic and Transport Properties of Individual Species, 1993, NASA Technical Memorandum 4513

NIST Livro de Química na Web - Base de dados de Referência padrão do NIST número 69. Disponível em <http://webbook.nist.gov/chemistry/>. Acesso em 14. 07. 2010

RIZZO, E. M. S. Processos de Laminação dos aços: Uma Introdução, 2007, Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos – Área: Laminação, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM

Scilab – The free software for numerical computation. Download page. Disponível em <http://www.scilab.org/products/scilab/download>. Acesso em 04. 01. 2010

TRINKS, W., MAWHINNEY, M. H. Hornos Industriales, 1975, vol.1, Urmo, S.A. de Ediciones

TRINKS, W., MAWHINNEY, M. H., SHANNON, R. J. R., GARVEY, J. R. Industrial Furnaces, Sixth Edition, 2004, John Wiley & Sons, Inc.

VALLE, R. M. e BARROS, J. E. M., Dimensionamento do sistema de arrefecimento de um motor de combustão interna, 2010. Disponível em http://mautone.eng.br/lectures_notes.htm. Acesso em 17. 07. 2010

WANG, A., CAI, J., XIE, G. Numerical Simulation of Combustion Characteristics in High Temperature Air Combustion Furnace, Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(2); 06-10

ZANG, B., CHEN, Z., XU, L., WANG, J., JIANMIN, Z., SHAO, H. The Modeling and Control of a Reheating Furnace, American Control Conference, Anchorage, AK May 8-10-2002

ANEXOS

ANEXO A

A.1 Cópia do certificado de calibração de um dos termopares do forno Davy

LABOMI LTDA														
														
Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre/INMETRO, de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número 169. Áreas Dimensional e de Temperatura e Umidade														
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO		N.º : TE-2855/2011												
LABORATÓRIO DE METROLOGIA - TEMPERATURA E ELETRICIDADE														
CLIENTE: ARCELORMITTAL BRASIL S/A- João Monlevade Endereço: AV. GETÚLIO VARGAS, 100 - CENTRO - JOÃO MONLEVADE - MG														
SISTEMA DE MEDIÇÃO CALIBRADO														
TERMOPAR TIPO S COM ISOLAÇÃO DE CERÂMICA														
Código : S-G-0,75-01/07 Fabricante : LABOMI N.º Série : --- Diâmetro do fio : 0,50 mm Diâmetro do sensor : 8,50 mm Comprimento do sensor : 770,00 mm Comprimento do Rabicho : --- Faixas(s) : 30 a 1200 °C <input type="radio"/> Faixas(s) Calibrada(s) : 800 a 1100 °C	Modelo : Tipo S simples Data de Entrada : 13 de janeiro de 2011 Data de Emissão : 17 de janeiro de 2011 Data de Calibração : 14 de janeiro de 2011 Validade : janeiro de 2012													
SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO														
MULTÍMETRO DIGITAL 6 e 1/2 DÍGITOS HP, 34401A - EI-MI, 023														
Certificado N.º : LIT06-LIT00-CC-6610 - INPE - RBC JUNÇÃO DE REFERÊNCIA TIPO R/S - ME-JR 006 Certificado N.º : TE-2647/2010 - LABOMI - RBC		Validade : abril de 2011 Validade : agosto de 2011												
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 30%;">Beigo</td> <td style="width: 30%;">APROVADO <input checked="" type="checkbox"/></td> <td style="width: 40%;">Sistema de Gestão Integrada <input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Grupo Acelor</td> <td>REPROVADO <input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Obs.:</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">  Raul Algemiro dos Santos </td> <td style="text-align: center;"> Data: 21/01/11 </td> </tr> </table>			Beigo	APROVADO <input checked="" type="checkbox"/>	Sistema de Gestão Integrada <input checked="" type="checkbox"/>	Grupo Acelor	REPROVADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Obs.:			 Raul Algemiro dos Santos		Data: 21/01/11
Beigo	APROVADO <input checked="" type="checkbox"/>	Sistema de Gestão Integrada <input checked="" type="checkbox"/>												
Grupo Acelor	REPROVADO <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>												
Obs.:														
 Raul Algemiro dos Santos		Data: 21/01/11												
PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO														
<input type="radio"/> Instrumento foi calibrado de acordo com o procedimento interno.: AME-306 Revisão : 15 A calibração foi realizada em um meio termostático de homogeneidade conhecida, através da comparação do SMC com um termopar padrão. Os resultados apresentados referem-se a uma média de cinco leituras.														
CONDIÇÕES AMBIENTAIS														
Temperatura Ambiente : 23 +/- 4 °C		Umidade Relativa do Ar : 55 +/- 20 %												
Usuário : Luciano Mascarenhas		Área : DMLA 01 - Forno Davy												
 Gustavo Oliveira Faria Signatário Autorizado		 Emerson Alves Braga Gerente Técnico												
Pág. 1/2														
Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/INMETRO, que avaliou a competência do lab. e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.														
Os resultados apresentados neste certificado referem-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas. A reprodução deste certificado só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. A LABOMI LTDA declina-se de qualquer responsabilidade pelo uso inadequado deste certificado. Rua Conde dos Arcos, nº 101 - Bairro Castelo - João Monlevade - Minas Gerais - CEP: 35930-287 - Tel.: (31) 3851-4546 - Fax: (31) 3851-6323 www.labomi.com.br - labomi@labomi.com.br														

ANEXO A

A.2 Cópia do certificado de calibração de um dos termopares do forno Davy

LABOMI LTDA

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre/ INMETRO, de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número 169. Áreas Dimensional e de Temperatura e Umidade.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO TE-2855/2011

<i>Valor de Referência</i>	<i>Média das leituras</i>	<i>Valor de Referência</i>	<i>Média das leituras</i>	<i>Tendência</i>	<i>Incerteza de medição (+/-)</i>	<i>Fator K</i>
°C	°C	µV	µV	°C	°C	
800,6	799,0	7333,1	7333,8	-1,6	1,7	2,0
899,9	897,9	8426,3	8425,3	-2,0	1,7	2,0
999,0	996,7	9551,7	9549,6	-2,3	1,7	2,0
1097,7	1095,1	10704,7	10698,8	-2,6	1,7	2,0

Este Laboratório adota a Escala Internacional de Temperatura de 1990.

Profundidade de imersão : 250 mm.

A conversão dos valores de µV para °C, foi realizada conforme a norma NBR 12771/1999.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência K que, para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.


 GUSTAVO OLIVEIRA FARIA
 TÉCNICO METROLOGISTA


 EMERSON ALVES BRAGA
 GERENTE TÉCNICO

pág. : 02/02

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/INMETRO, que avalia a competência do lab. e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. Os resultados apresentados neste certificado referem-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas. A reprodução deste certificado só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. A LABOMI LTDA declina-se de qualquer responsabilidade pelo uso inadequado deste certificado.
 Rua Conde dos Arcos, nº 101 - Bairro Castelo - João Monlevade - Minas Gerais - CEP: 35930-297 - Tel.: (31) 3851-4546 - Fax: (31) 3851-6323
 www.labomi.com.br - labomi@labomi.com.br

ANEXO C

C.1 Cópia do certificado de garantia da qualidade do gás de referência a 1% utilizado para a calibração do analisador de oxigênio do forno Davy.



White Martins Gases Industriais Ltda. - Laboratório de Controle da Qualidade Gases Especiais
Av. dos Autonomistas, 4332 - Osasco - São Paulo - CEP 06090-015
Telefone: (011) 3685-7729 - Fax: (011) 3685-7852 - E-mail: antonio_giorgio@praxair.com



CERTIFICADO DE GARANTIA DA QUALIDADE

Número da Ordem: 40363061 Certificado Nº: 40124548 Pedido Nº:
Cilindro Nº: 548051 Conexão SAWM Nº: 01 ABNT: 246-1
Cliente: 42446093 Belgo Siderurgia S.A (URC)
Endereço: AVENIDA GETULIO VARGAS 100
JOAO MONLEVADE MG BRA

Composição da Mistura		Nome do Produto:		Mistura Padrão Primária C8 Q	
Componentes	Método de Verificação	Requisitado	Reportado	Incerteza de Medição	
Oxigênio	P	1	1	% Mol / Mol	± 1,18%
Nitrogênio	BALANÇO				

Tipo de Cilindro: Q Padrão: Primário
Pressão: 140,00 kgf/cm² ou 13.729,31 kPa
Volume: 2,900 m³ @ 21,1 °C e 101,32 kPa ou 1atm
Método de Confeção: Método Gravimétrico Data de Confeção: 04/10/05 Data de Validade: 04/10/10

Rastreável a massas padrões conforme certificado de calibração da RBC-INMETRO nº M-12962/04

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência K=2, para um nível de confiança de 95%.

Data: 05/10/05 Analista: 40001980 Responsável: Sakuda, Eliane Miyuki

Antonio Luiz Di Giorgio
Gerente de Controle da Qualidade de Gases Especiais

Observações

Métodos de Verificação

-	N - Quiluminescência	P - Gravimétrico
A - Cromatografia Gasosa (ECD)	Z - Emissão Óptica	Q - FID + Metanador
B - Cromatografia Gasosa (TCD)	J - Condutividade Térmica	R - Fotoionização (PID)
C - Eletrolítico	K - Paramagnético	S - Obtido por diferença de 100%
D - Cromatografia Gasosa (FID)	L - Fluorescência de Ultravioleta	T - Especificação do Fornecedor
E - Ionização de Chama	M - Ionização de Hélio	
F - Infra-Vermelho	N - Célula de Cristal Hidroscópico	
G - Célula Eletroquímica	O - Tubo Dräger	

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente ao(s) cilindro(s) referido(s).
A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.
Estabilidade garantida, desde que o cilindro seja armazenado em local seco, ventilado, ao abrigo de intempéries, e entre as temperaturas de 10 a 35°C

Equivalência de Unidades	
%	% mol / mol
ppm	micromol / mol
ppb	nanomol / mol

Telefone de Emergência:
0800 218471

ANEXO D

D.2 Cópia do certificado de garantia da qualidade do gás de referência a 4% utilizado para a calibração do analisador de oxigênio do forno Davy.



White Martins Gases Industriais Ltda. - Laboratório de Controle da Qualidade Gases Especiais
 Av. dos Autonomistas, 4332 - Osasco - São Paulo - CEP 06090-015
 Telefone: (011) 3885-7729 - Fax: (011) 3885-7852 - E-mail: antonio_giorio@praxair.com

SISTEMA DA QUALIDADE
 CERTIFICADO
 CONFORME A NORMA
ISO 9001
 GASES ESPECIAIS
 OSASCO

CERTIFICADO DE GARANTIA DA QUALIDADE

Número da Ordem: 00363078 **Certificado Nº:** 40124549 **Pedido Nº:**

Cilindro Nº: 2019209 **Conexão SAWM Nº:** 01 **ABNF:** 245-1

Cliente: 42446009 - Cuijto Siderurgia S.A (URC)
Endereço: AVENIDA CETULIO VARGAS 100
 JOAO MONLEVADE MG BRA

Composição da Mistura		Nome do Produto		Mistura Padrão Primária GIG	
Componentes	Método de Verificação	Requerido	Recebido	Requerido	Incerteza de Medição
Oxigênio	P	4	4,913	4,913	± 0,11%
Nitrogênio		BALANÇO			

Tipo de Cilindro: Q **Padrão:** Primário
Pressão: 140,00 kgf/cm² ou 13.729,31 kPa
Volume: 2,900 m³ @ 21,1 °C e 101,32 kPa por atm

Método de Carga: Método Gravimétrico **Data de Carga:** 04/10/05 **Data de Validade:** 04/10/10

Retorne a massa padrão conforme certificado de calibração da RBC-INMETRO nº M-1296204

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência k=2, para um nível de confiança de 95%.

Data: 05/10/05 **Análise:** 40001560 **Responsável:** Sakuzi, Elson Miyah


Antonio Luiz Di Olegio
 Gerente de Controle da Qualidade de Gases Especiais

Observações

Métodos de Verificação		
A - Cromatografia Gaseosa (GC)	B - Oximiluminescência	C - Gravimétrico
B - Cromatografia Gaseosa (FID)	D - Balança Óptica	D - FID + Metanador
C - Balança Analítica	E - Condutividade térmica	E - Polarização (PM)
D - Cromatografia Gaseosa (FID)	F - Paramagnético	F - Oxição por Difusão de IEP
E - Ionização de chama	G - Fluorescência de Ultravioleta	G - Magnetização do Torçador
F - Infra-vermelho	H - Ionização de sódio	
G - Célula eletrolítica	I - Célula de cristais piezoelétrico	
H - Célula eletrolítica	J - TUBO NAYP	

Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam somente aos (s) cilindro(s) referido(s).

A reprodução do documento ou partes dele é proibida, sem nenhuma autorização.

Estabilidade garantida, desde que o cilindro seja armazenado em local seco, ventilado, ao abrigo do vapor d'água, e entre as temperaturas de 15 a 25°C

Equivalência de Unidades	
%	% mol/mol
ppm	mg/mol/mol
ppb	µg/mol/mol

Telefone de Emergência:
0800 218471

ANEXO F

F.1 Cópia do certificado de garantia da qualidade do gás padrão utilizado na calibração do cromatógrafo.

Validade
15/08/13
Gás Limpo

WHITE MARTINS
PRAXAIR INC

White Martins Gases Industriais Ltda. - Laboratório de Controle da Qualidade Gases Especiais
Av. dos Autonomistas, 4332 - Osasco - São Paulo - CEP 08090-015
Telefone: (11) 3685-7729 - Fax: (11) 3685-7852 - E-mail: antonio_giorgio@praxair.com

SISTEMA DA QUALIDADE
CERTIFICADO
CONFORME A NORMA
ISO 9001
GASES ESPECIAIS
OSASCO

CERTIFICADO DE GARANTIA DA QUALIDADE

Número da Ordem: 40898825 Certificado Nº: 40374433 Pedido Nº: Página: 1 de 1
Cilindro Nº: 1909146 Conexão SAWMRY: 02 ABNT: 218-2

Cliente: 42446093 Arcelor Belgio (URC-prod.TQ 375)
Endereço: AVENIDA GETULIO VARGAS 100
JOAO MONLEVADE MG BRA

Nome do Produto: Mistura Padrão Primário CII Q

Componentes	Método de Verificação	Requisitado	Reportado	Incerteza de Medição
Dióxido Carbono	P	22 % Mol / Mol	22,01 % Mol / Mol	+/- 0,24 %
Monóxido Carbono	P	22 % Mol / Mol	21,99 % Mol / Mol	+/- 0,26 %
Hidrogênio	P	5 % Mol / Mol	5,023 % Mol / Mol	+/- 0,60 %
Nitrogênio	BALANÇO			

Tipo de Cilindro: Q Padrão: Primário
Pressão: 118,00 kgf/cm² ou 11.571,85 kPa
Volume: 2,700 m³ @ 21,1 °C e 101,32 kPa ou 1atm

Método de Confeção: Método Gravimétrico Data de Confeção: 15/08/08 Data de Validade: 15/08/13

Rastreável a massas padrões conforme certificado de calibração da RBC-INVETRO nº M-19168/06.

A incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada, multiplicada por um fator de abrangência K=2, para um nível de confiança de 95%.

Data: 18/08/08 Analista: 40001980 Responsável: Taira, Eliane Miyuki Sakuda

Antonio Luiz Di Giorgio
Gerente de Controle de Qualidade de Gases Especiais

Observações

Métodos de Verificação

-	R - Quimiluminescência	P - Gravimétrico
A - Cromatografia Gasosa (ECD)	I - Emissão Óptica	Q - FID + Metanador
S - Cromatografia Gasosa (TCD)	J - Condutividade Térmica	R - Fotoionização (PID)
C - Eletrolítico	K - Paramagnetismo	S - Obtido por diferença de 100%
D - Cromatografia Gasosa (PID)	L - Fluorescência de Ultravioleta	T - Especificação do Fornecedor
R - Ionização de Chama	M - Ionização de Hélio	
F - Intra-Vermelho	N - Célula de Cristal Birrefringente	
G - Célula Eletrolítica	O - Tubo reager	

De resultados apresentados neste documento têm significação relativa e se aplicam somente ao(s) cilindro(s) referido(s).
A reprodução do documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.
Estabilidade garantida, desde que o cilindro seja armazenado em local seco, ventilado, ao abrigo de intempéries, e entre as temperaturas de 10 a 35° C.

Equivalência de Unidades	
%	% mol / mol
ppm	micromol / mol
ppb	nanomol / mol

Telefone de Emergência:
0800 709 9000

ANEXO G

G.1 Cópia da planilha de calibração do cromatógrafo.

METROLOGIA ELÉTRICA GAMRE	PLANILHA DE LEITURAS PARA AFERIÇÃO E CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO				Folha: 01-01																																																																																																																							
	Instrumento de medição a calibrar (IMC): MF-AZ 027				Área: ALTO FORNO "A"																																																																																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE ZERO</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>H₂ (%)</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>4,00</td> <td>0,00</td> <td>4,00</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE SPAN</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>%</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5,02</td> <td>8,08</td> <td>5,04</td> <td>8,06</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE ZERO</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO (%)</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>4,00</td> <td>0,01</td> <td>4,08</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE SPAN</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>%</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>22,02</td> <td>14,08</td> <td>22,03</td> <td>14,06</td> <td>0,1</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE ZERO</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CO₂ (%)</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,00</td> <td>4,00</td> <td>0,00</td> <td>4,00</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CALIBRAÇÃO DE SPAN</th> <th>ERRO</th> </tr> <tr> <th>Gás padrão</th> <th>mA</th> <th>IMC(*)</th> <th>mA</th> <th>%VFE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>%</td> <td></td> <td>%</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>22,03</td> <td>14,07</td> <td>22,04</td> <td>14,05</td> <td>0,0</td> </tr> </tbody> </table>					CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	H ₂ (%)		%			0,00	4,00	0,00	4,00	0,0	CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	%		%			5,02	8,08	5,04	8,06	0,1	CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	CO (%)		%			0,00	4,00	0,01	4,08	0,1	CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	%		%			22,02	14,08	22,03	14,06	0,1	CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	CO ₂ (%)		%			0,00	4,00	0,00	4,00	0,0	CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO	Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE	%		%			22,03	14,07	22,04	14,05
CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
H ₂ (%)		%																																																																																																																										
0,00	4,00	0,00	4,00	0,0																																																																																																																								
CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
%		%																																																																																																																										
5,02	8,08	5,04	8,06	0,1																																																																																																																								
CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
CO (%)		%																																																																																																																										
0,00	4,00	0,01	4,08	0,1																																																																																																																								
CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
%		%																																																																																																																										
22,02	14,08	22,03	14,06	0,1																																																																																																																								
CALIBRAÇÃO DE ZERO				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
CO ₂ (%)		%																																																																																																																										
0,00	4,00	0,00	4,00	0,0																																																																																																																								
CALIBRAÇÃO DE SPAN				ERRO																																																																																																																								
Gás padrão	mA	IMC(*)	mA	%VFE																																																																																																																								
%		%																																																																																																																										
22,03	14,07	22,04	14,05	0,0																																																																																																																								
CONDIÇÃO:	<table border="1"> <tr> <td>CONFORME</td> <td>NÃO CONF.</td> <td>REPARO</td> </tr> </table>					CONFORME	NÃO CONF.	REPARO																																																																																																																				
CONFORME	NÃO CONF.	REPARO																																																																																																																										
DATA:	03-01-2011																																																																																																																											
EXECUTANTE:	Carlos Roberto da Volta																																																																																																																											
RESPONSÁVEL:	Saulo de Oliveira Melo																																																																																																																											
PROCEDIMENTO:	GGGAMGPO 0007																																																																																																																											
INST. PADRÕES UTILIZADOS:	Gás Span Cert. Núm.: 40374432																																																																																																																											
TOLERÂNCIA ADMITIDA:	+/- 1,0% VFE																																																																																																																											
OBSERVAÇÕES:	<p>ANALISADOR DE H₂ - GÁS LIMPO - AT-G41-03</p> <p>ANALISADOR DE CO - GÁS LIMPO - AT-G41-01</p> <p>ANALISADOR DE CO₂ - GÁS LIMPO - AT-G41-02</p> <p>IMC - INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO A CALIBRAR</p> <p>IMP - INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO PADRÃO</p>																																																																																																																											

ANEXO H

H.1 Cópia do relatório técnico enviado pela GASMIG contendo a composição química do GN referente ao período de 01 a 31 de janeiro de 2010.



Legenda: C1=Metano; C2=Etano; C3=Propano; C4=Butano; PM=peso molecular; Dar = densidade relativa ao ar; N2= Nitrogenio; N2= Nitrogenio; PCI=Poder Calorífico Inferior; PCS=Poder Calorífico Superior; CO₂=Dioxido de Carbono; IW= Índice de Wobbe; Dabs = densidade do CH4

Faixa	COMPOSIÇÃO DO GAS NATURAL											Soma			
	C1		C2		C3		Butano e Pesados C4+		CO2		PCI (Kcal/m ³)		PCS (Kcal/m ³)	Dar	IW (kj/m ³)
	> 85,0	< 12,0	< 6,0	< 6,0	< 3,0	< 6,0	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945						
Método	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 1945	ASTM D 3588	ISO 6976			
1/jan	90,81%	6,39%	1,56%	0,04%	0,00%	1,20%	8,496	9,413	0,6100	50,395	100,00%				
2/jan	91,05%	6,35%	1,37%	0,00%	0,00%	1,23%	8,473	9,387	0,6100	50,342	100,00%				
3/jan	94,16%	3,52%	0,91%	0,11%	0,00%	1,30%	8,226	9,118	0,5900	49,589	100,00%				
4/jan	89,89%	7,07%	1,67%	0,00%	0,00%	1,37%	8,546	9,463	0,6200	50,432	100,00%				
5/jan	92,38%	5,00%	1,21%	0,15%	0,00%	1,26%	8,353	9,258	0,6000	49,920	100,00%				
6/jan	92,65%	4,91%	1,05%	0,23%	0,00%	1,16%	8,326	9,227	0,6000	49,860	100,00%				
7/jan	90,83%	6,30%	1,48%	0,00%	0,00%	1,39%	8,464	9,376	0,6100	50,210	100,00%				
8/jan	92,69%	4,75%	1,19%	0,00%	0,00%	1,37%	8,338	9,237	0,6000	49,989	100,00%				
9/jan	92,66%	4,91%	1,11%	0,00%	0,00%	1,32%	8,344	9,242	0,6000	49,380	100,00%				
10/jan	92,70%	4,98%	1,08%	0,00%	0,00%	1,24%	8,348	9,247	0,6000	50,011	100,00%				
11/jan	90,14%	7,15%	1,42%	0,00%	0,00%	1,29%	8,519	9,436	0,6100	50,426	100,00%				
12/jan	92,52%	5,02%	1,12%	0,00%	0,00%	1,34%	8,347	9,246	0,6000	49,936	100,00%				
13/jan	92,05%	5,30%	1,34%	0,00%	0,00%	1,31%	8,396	9,301	0,6000	50,085	100,00%				
14/jan	93,84%	3,81%	0,99%	0,00%	0,00%	1,36%	8,255	9,152	0,5900	49,704	100,00%				
15/jan	93,02%	4,31%	1,25%	0,00%	0,00%	1,42%	8,322	9,221	0,6000	49,824	100,00%				
16/jan	91,66%	4,97%	1,74%	0,00%	0,00%	1,63%	8,419	9,339	0,6100	49,923	100,00%				
17/jan	91,70%	4,85%	1,85%	0,00%	0,00%	1,60%	8,429	9,339	0,6100	49,990	100,00%				
18/jan	91,24%	5,64%	1,77%	0,00%	0,00%	1,35%	8,027	9,388	0,5800	50,266	100,00%				
19/jan	90,83%	5,99%	1,92%	0,00%	0,00%	1,26%	8,522	9,437	0,6100	50,441	100,00%				
20/jan	90,72%	6,47%	1,33%	0,11%	0,00%	1,37%	8,455	9,366	0,6100	50,134	100,00%				
21/jan	95,42%	2,25%	0,94%	0,00%	0,00%	1,39%	8,148	9,037	0,5900	49,405	100,00%				
22/jan	94,89%	2,60%	1,13%	0,00%	0,00%	1,38%	8,199	9,091	0,5900	49,544	100,00%				
23/jan	95,13%	2,46%	1,01%	0,01%	0,00%	1,39%	8,175	9,065	0,5900	49,468	100,00%				
24/jan	96,50%	1,53%	0,57%	0,00%	0,00%	1,40%	8,050	8,931	0,5800	49,146	100,00%				
25/jan	96,72%	1,42%	0,43%	0,00%	0,00%	1,43%	8,022	8,901	0,5800	49,058	100,00%				
26/jan	95,20%	2,60%	0,85%	0,01%	0,00%	1,34%	8,161	9,049	0,5900	49,482	100,00%				
27/jan	97,25%	1,04%	0,37%	0,00%	0,00%	1,34%	8,161	8,876	0,5900	49,053	100,00%				
28/jan	96,30%	1,65%	0,65%	0,20%	0,00%	1,20%	8,161	8,955	0,5900	49,205	100,00%				
29/jan	94,75%	2,85%	0,97%	0,00%	0,00%	1,43%	8,183	9,079	0,5900	49,476	100,00%				
30/jan	95,80%	1,99%	0,75%	0,00%	0,00%	1,46%	8,101	8,985	0,5800	49,230	100,00%				
31/jan	92,52%	5,00%	0,97%	0,11%	0,00%	1,40%	8,312	9,211	0,6000	49,735	100,00%				
MEDIA	93,16%	4,29%	1,16%	0,03%	0,00%	1,35%	8,299	9,206	0,60	49,795	100,00%				

ANEXO I

I.1 Cópia do certificado de calibração de um dos transmissores de vazão do forno Davy.

LABOMI LTDA

LABOMI

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N.º : TC-1482/2010
 LABORATÓRIO DE METROLOGIA - CALIBRAÇÕES EXTERNAS

CLIENTE : ARCELORMITTAL BRASIL S/A- João Monlevade
 Endereço : AV. GETÚLIO VARGAS, 100 - CENTRO - JOÃO MONLEVADE - MG

SISTEMA DE MEDIÇÃO CALIBRADO

MALHA DE VAZAO

Código : L1-MA 070 Data de Calibração : 25 de janeiro de 2010
 Fabricante : --- Resolução : 0,1 m3/h
 N.º Série : ---
 Faixa(s) : 0 a 5266 m3/h
 Faixa(s) Calibrada(s) : 2106 a 5266 m3/h
 Modelo : ---
 Data de Entrada : 25 de janeiro de 2010
 Data de Emissão : 01 de fevereiro de 2010

SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO

CALIBRADOR DIGITAL DE PRESSÃO - ME-PC 001 Validade : outubro de 2010
 Certificado N.º : P-2915/08 - E - 372/09-A - NAKA RBC - E - SENAI RBC

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

O instrumento foi calibrado de acordo com o procedimento interno.; AME-343 Revisão : 00
 A calibração foi realizada através da comparação da pressão diferencial gerado por um gerador padrão com a indicação da vazão apresentada no final da malha. Os resultados apresentados referem-se a uma média de três leituras.

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Temperatura Ambiente : 25 +/- 10°C Umidade Relativa do Ar : 55 +/- 20%

Usuário : Aurélio Área : Vazão de GAF da zona 3 do forno Davy



 Neirivaldo Izaías Quintão
 Técnico Metrologista



 Emerson Alves Braga
 Gerente Técnico

Pág. 1/2

Os resultados apresentados neste certificado são rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI)

Os resultados apresentados neste certificado referem-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas. A reprodução deste certificado só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. A LABOMI LTDA declina-se de qualquer responsabilidade pelo uso inadequado deste certificado.
 Rua Conde dos Arcos, nº 101 - Bairro Castelo - João Monlevade - Minas Gerais - CEP: 35930-287 - Tel.: (31) 3851-4546 - Fax: (31) 3851-6323
 www.labomi.com.br - labomi@labomi.com.br

ANEXO H

I.2 Cópia do certificado de calibração de um dos transmissores de vazão do forno Davy.

LABOMI LTDA

LABOMI

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO **Nº TC-1482/2010**
 METROLOGIA - CALIBRAÇÕES EXTERNAS

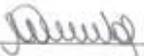
SISTEMA DE MEDIÇÃO CALIBRADO
MALHA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA - Código L1-MA 070.

Componentes:
 Transmissor de vazão - SMAR - LD 301 - Série: 48906 - Cód.: ----- - TAG: FT 04.03 .
 Indicação via PLC .

VALORES APRESENTADOS				
Valor de Referência	SMC	Tendência	IM (+/-)	Fator K
Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h	Nm ³ /h	
2106,0	2097,0	-9,0	67,0	2,00
3160,0	3137,0	-23,0	45,0	2,00
3950,0	3919,0	-31,0	36,0	2,00
4739,0	4719,0	-20,0	32,0	2,00
5266,0	5224,0	-42,0	27,0	2,00

Observações: Forno Davy - Vazão de GAF da zona 3. A calibração foi realizada com a temperatura do fluido fixada em valor igual à de projeto.

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência K que, para uma distribuição normal, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.


 NEIRIVALDO IZAIAS QUINTÃO
 TÉCNICO METROLOGISTA


 EMERSON ALVES BRAGA
 GERENTE TÉCNICO

pág. : 02/02

Os resultados apresentados neste certificado referem-se exclusivamente ao item calibrado, nas condições especificadas. A reprodução deste certificado só poderá ser feita integralmente e sem nenhuma alteração. A LABOMI LTDA declina-se de qualquer responsabilidade pelo uso inadequado deste certificado.
 Rua Conde dos Arcos, nº 101 - Bairro Castelo - João Monlevade - Minas Gerais - CEP: 35930-287 - Tel.: (31) 3851-4546 - Fax: (31) 3851-6323
 www.labomi.com.br - labomi@labomi.com.br