



MODELAGEM MATEMÁTICA PARA REFINO DE CORRIDAS NO RH DA CSN¹

*Antônio Augusto Martins²
Wellington Ferreira Barbosa²
Rodrigo da Silva Magalhães²
Vanessa Cavalheiro de Azevedo³
Fabio Oliveira da Silva⁴
Antonio Carlos Sant'anna da Silva²*

Resumo

Com o intuito de promover uma operação padronizada, viabilizando o contínuo desenvolvimento do processo de refino de corridas no RH da Companhia Siderúrgica Nacional, foi elaborado um modelo matemático integrando os parâmetros operacionais, as condições termodinâmicas e cinéticas. Dividido em três módulos distintos: módulo das adições de ligas, módulo de previsão "on line" da composição química e temperatura do aço e o módulo para ajuste da temperatura por aquecimento químico ou resfriamento com sucata, o presente modelo minimizou erros operacionais e propiciou a redução de custos com alumínio, ferro-ligas e oxigênio.

Palavras-chave : Desgaseificador; Modelo matemático; Sistema de automação.

MATHEMATICAL MODELING FOR REFINING OF HEATS IN RH AT CSN

Abstract

In order to have a standard operation, allowing the continued development of the process in refining of the heats at RH of Companhia Siderúrgica Nacional, a mathematical model was developed by integrating the operating parameters, the kinetic and thermodynamic conditions. This model was divided in three distinct modules: module for additions of alloys, the prediction "on line" module in the chemical composition and temperature of the steel and the module to adjust the temperature by chemical heating or by cooling using scrap. By using the model, it was possible to reduce operational mistakes, and cost reduction with aluminum, alloys and oxygen.

Keywords: Ladle furnace; Mathematic model; Automation system.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista – CSN.

³ Engenheira Química – CSN.

⁴ Analista de Sistema – CSN.



1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de promover uma operação padronizada, viabilizando o contínuo desenvolvimento do processo de refino de corridas no RH da Companhia Siderúrgica Nacional, foi elaborado um modelo matemático integrando os parâmetros operacionais as condições termodinâmicas e cinéticas.

O processo de tratamento de corridas em desgaseificadores a vácuo pode ser considerado de significativa complexidade, exigindo controle rigoroso do oxigênio dissolvido no banho metálico, envolvendo os teores iniciais provenientes do refino primário, a redução pelas reações de descarburização, desoxidação e o possível incremento pelo sopro de oxigênio gasoso por lança.

Sob o ponto de vista termodinâmico, a quantidade de oxigênio requerida para o processo de descarburização é facilmente atendida pelos valores habitualmente disponíveis no metal e na escória, mas em patamares inferiores aos solicitados pelos aspectos cinéticos.

Além do controle do oxigênio dissolvido, as adições para desoxidação e acerto da composição química são freqüentes.

Este contexto foi à força motriz para o desenvolvimento de um modelo matemático de nível 2, embasado por cálculos estequiométricos, equações relacionadas à cinética de descarburização e diversas regressões múltiplas.

Estruturado nas citadas equações, abastecido pelas informações do nível 1 e parâmetros pré-definidos no módulo de engenharia, o nível 2 realiza os cálculos e disponibiliza os resultados para o nível 1, cabendo aos operadores apenas validar.

O presente modelo minimizou erros operacionais e propiciou a redução de custos com alumínio, ferro-ligas e oxigênio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O atual algoritmo é uma evolução da estrutura do sistema de automação de fornecimento SMS Vacmetal & BFI Betriebstechnik GmbH,⁽¹⁾ sendo versátil para o refino de diferentes tipos de aço e diversas fases da operação. Foi elaborado para fornecer diretamente a quantidade de oxigênio extra a ser soprado, favorecendo a velocidade do processo de descarburização, para a elevação da temperatura do metal, ou até mesmo, para atender as duas condições simultaneamente. A Figura 1 apresenta, de forma esquemática a configuração geral do sistema de automação.

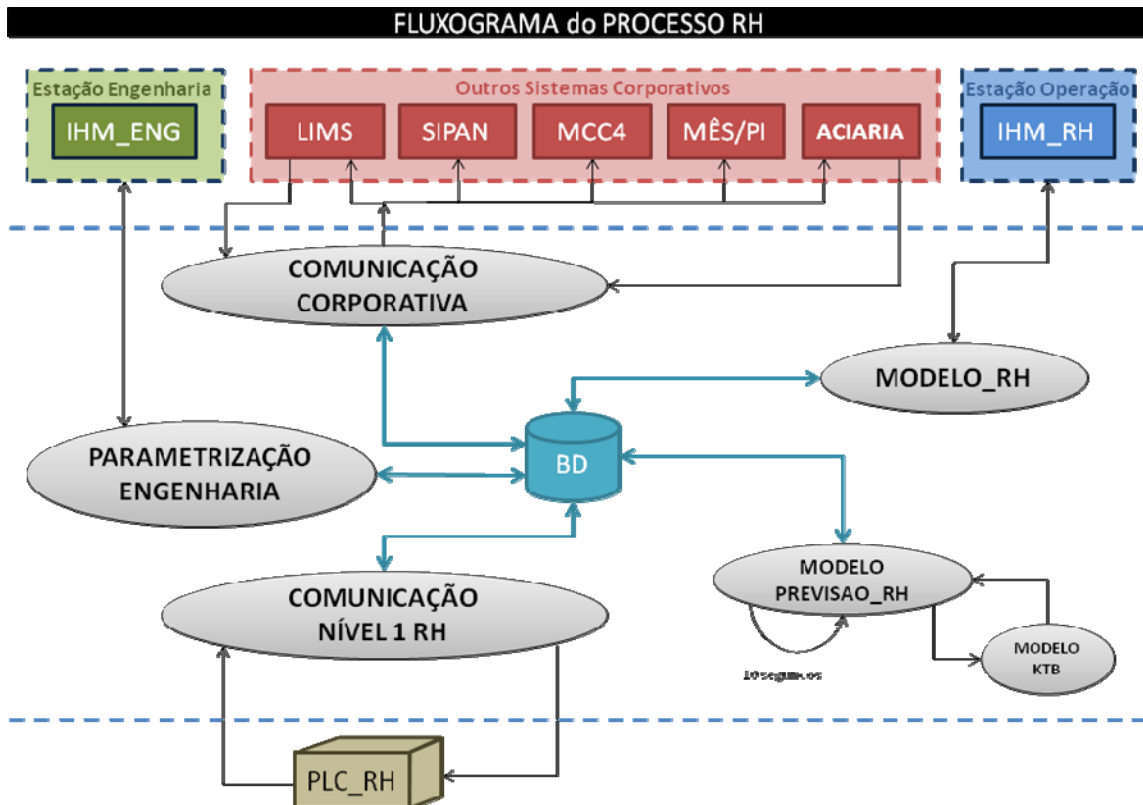


Figura 1 – Desenho esquemático da configuração geral do sistema.

Interfaces gráficas e informações relevantes para operação foram implementadas com um design orientado para melhor visualização dos usuários.

As Figuras 2 e 3 apresentam a tela principal de operação em dois ambientes (abas), otimizando a navegação no sistema.

Na Figura 2 agrupam-se as informações gerais da corrida como: dados da panela, dados referente ao refino primário, horários e etc. A Figura 3 apresenta o roteiro básico de tratamento e a janela com informações referentes ao sopro de oxigênio, de abertura automática, ao realizar medições de temperaturas ou oxigênio dissolvido no banho.

Em ambas as figuras na parte superior da tela, há identificação da corrida, composição química objetivada do aço e logo abaixo uma estimativa da evolução dos elementos químicos e temperatura durante o tratamento.

O modelo foi dividido em três módulos distintos: adições de ligas, previsão *on line* da composição química e temperatura do aço e ajuste da temperatura por aquecimento químico ou resfriamento com sucata.



42º Seminário de Aciaria Internacional

42nd Steelmaking Seminar - International

15 a 18 de maio de 2011 / May 15th - 18th, 2011



Coordenação Processo Situação dos Equipamentos Correio Resultados Análise

CSN **RH** **CONTRASTE** 23/2/2011 10:29:16

Sopros KTB Pré-Pesagem Desox. Adições Finalizar Corrida Rotinas Oper. Exibir Opções Mais Telas Metalurgia Painela Modelo Coordena Processo RH Processo FP

Corrida: **Já Finalizada** Data Fundidor Letra Turno Oper. RH Proc.Ant. Destino Diretoria Ger.Geral Gerência Revisão Data Rev. Relator
 1B888 Iniciar Trat. 21/02/2011 CS56405 B 4 CS57636 MP MK4 DEPRO GGPS GMP 1 12/03/2010 Vanessa

Espec. Quimica	C	Mn	P	S	Si	Cu	III	Cr	Mo	Sn	Al	II	Ti	III	V	Ca	B	ppm O	Temperatura
4093	Minimo	0.0400	0.0150	0.0120	0.0300	0.0400	0.0400	0.0400	0.0200	0.0200	0.0200	0.0045	0.0500		0.0040		0.0004		
	Maximo	0.1600											0.0700						
	Objetivado	0.1000										0.0630							
Modelo	Calculado	0.0027	0.1126	0.0080	0.0070	0.0023		0.0090	0.0020		0.0582	0.0023	0.0634	0.0020				4	1594

Amostra	Hora	C	Mn	P	S	Si	Cu	III	Cr	Mo	Sn	Al	II	Ti	III	V	Ca	B	ppm O	Temperatura
1 RH-LAB	01:49	0.0017	0.1220	0.0080	0.0070	0.0030			0.0110			0.0520	0.0027	0.0630	0.0030	0.0010	0.0003	0.0003		1594
4 RH-CLX1	01:40																			1594
3 RH-CLX1	01:33																		41	1603
2 RH-CLX1	01:20																		398	1600

Dados Gerais Tratamento/Temperatura Adições Observações Resumo Previsão Gráficos Celox Manual Análise Manual

Dados da Aciaria
 Rota: RH Restri.: II
 Tipo Vaz.: **Efervescente** Uso Retentor: S
 Resson.Vol: Efic Reten:
 Resson.Mot: Aço Liq.: 231

Dados de Lingotamento
 MCC: MK4 TTB: II
 Sequência: 3 ATV: II
 TVO: II T de Pri: II
 Tempo Ling: 29

Dados da Painela
 Pan. Nº: 46 Pan.Aquece: S
 Vida: 27 Borda: 50
 Hora: 23:44 Argônio: 2
 Casção: 1000 Escória: 9
 Ciclo Pan.: 34

DADOS DO PROCESSO RH:

Horário	Prev.	Real
Chegada RH	01:12	01:08
Início de Vácuo	01:09	01:09
Fim de Vácuo	01:41	01:41
Liberação RH	01:41	01:43

Vácuo	
Tempo	0
P mín. 12	31
Killing Time	13
Tempo Descarb.	27

Material **Processo Anterior**
 Cal: 1000
 Sodolita:
 Fluorita:
 Borra:
 Escória Sint.:
 Al Granulado:

Vaso **#**
 Pressão do Vaso (mbar): 968
 Volume de H2 Soprado (lm3): 0
 Volume de Ar Soprado (lm3): 67
 Vazão de O2 - KTB (lm3/h): 0
 Numero do Vaso: 2

Número de Corridas
 Perna: 14
 Vaso: 125
 Hot off Take: 319

ADICIONAMENTO
 Al gotão: 313
 FeMnST:
 FeMnMC:
 FeMnBC:
 FeMnMet:
 Coque:
 FeSi:
 FeTi30: 555
 FeTi70:
 FeNb:
 FeCrAC:
 FeCrBC:
 FeB:
 FeP:
 FeV:
 Sucata:
 FeS:
 FeMo:

Figura 2 – Tela principal do modelo aba de dados gerais.

Coordenação Processo Situação dos Equipamentos Correio Resultados Análise

CSN **RH** **CONTRASTE** 23/2/2011 11:30:06

Sopros KTB Pré-Pesagem Desox. Adições Finalizar Corrida Rotinas Oper. Exibir Opções Mais Telas Metalurgia Painela Modelo Coordena Processo RH Processo FP

Corrida: **Em Tratamento** Data Fundidor Letra Turno Oper. RH Proc.Ant. Destino Diretoria Ger.Geral Gerência Revisão Data Rev. Relator
 1B932 Iniciar Trat. 23/02/2011 CS45485 D 2 CS57636 MP MK2 DEPRO GGPS GMP 1 23/02/2010 Vanessa

Espec. Quimica	C	Mn	P	S	Si
2710	Minimo	0.0300	0.2500	0.0200	0.0250
	Maximo	0.0600	0.3500	0.0200	0.0250
	Objetivado	0.0450	0.3000		
Modelo	Calculado	0.0430	0.2952	0.0140	0.0090

Amostra	Hora	C	Mn	P	S	Si
2 RH-CLX1	11:29					
1 RH-LAB	11:23	0.0430	0.2990	0.0140	0.0090	0.0030
1 RH-CLX1	11:20					
1 RH-MAH	11:18	0.0520	0.2700			

Dados Gerais **Tratamento/Temperatura** **Adições**

ROTEIRO BÁSICO DE TRATAMENTO

Pgim	#
1	Abrir a tela RH e clicar no botão "Iniciar tratam
2	Checar as informacoes de liberacao da aciaria
3	Abrir a aba "pre-pesagem" e calcular. Confirma
4	Chegada da painela: avaliar borda livre e escor
5	Facear as pernas na escoria e calcular a profu
6	Iniciar evacuacao
7	Ir na aba "Tratamento/Temperatura" e calcular
8	Adicionar os materiais calculados na prepesa
9	Apos 4 minutos de homogeneizacao; retirar a
10	Aguardar a janela do calculo da KTB. Confirma
11	Ir para o nivel 1. Adicionar Al e soprar O2 ou adicionar sucata se necessario.
11:24	Homogeneizar por 3 minutos. Medir temperatura celox. Aguardar resultado.
11:26	Confirmar resultado do laboratorio. Abrir tela "Adicoes" e calcular as correcoes necessarias
11:26	Confirmar as correcoes no nivel 1

Sopros de Oxigênio pela KTB

Grau: 2710

Descarburacao Aq. Quimica Correção de C, Al, Si e Mn

ppm de O: 1
 Temperatura: 1579
 Tipo de Aço: Desoxidada

Taxa de Sopros: 2400
 Distância Lança: 5400

Quantidade do sopros
 O2 Calculado: 32

Adição de Sucata para Resfr.
 Peso Sucata Calc: 0

Adição de Al/Si para Aquecimento
 Peso Alumínio Calc: 0
 Peso Silício Calc: 0

Calcular Confirmar Fechar

Cond. Corrida: Desoxidada Lib. Destino: MCC2 Nitro: 1 Real: 4 Calc: 2

Figura 3 – Tela principal aba do roteiro básico de tratamento com Janela do calculo do sopros oxigênio.

A seguir é apresentado um detalhamento dos principais partes do modelo.



2.1 Módulo do Cálculo de Ligas

Os cálculos da quantidade de liga a ser adicionada ao banho metálico para se atingir os teores objetivados, se restringe a um balanço de massa e ao cálculo das perdas que ocorrem devido à reação dos elementos adicionados com o oxigênio contido no aço, na escória e na atmosfera. Embora estas reações sejam regidas pela termodinâmica e cinética, a simplicidade prática dos valores de rendimento calculados de forma empírica pela equação 1 são eficazes, sendo aceito pelos aciaristas.

$$Rend = \frac{\text{Quantidade incorporada}}{\text{Quantidade adicionada}} * 100 \quad (\text{equação 1})$$

Equacionando o balanço de massa e inserindo o resultado da expressão de rendimento (1) chegamos a uma equação genérica (2), onde pode-se calcular a quantidade de liga a ser adicionada.

$$QL = \frac{\Delta E * Q_{aço} * 100}{E_M * Rend} \quad (\text{equação 2})$$

Em que:

Q_L = quantidade de ferroliga ou desoxidante calculado [kg];

ΔE = diferença entre o teor objetivado e o valor real do elemento no aço [%];

$Q_{aço}$ = massa total de aço líquido [kg];

E_M = teor do elemento no ferroliga ou desoxidante [%]; e

$Rend$ = rendimento do elemento E_M na correção [%].

2.2 Módulo do Cálculo de Previsão

O módulo de previsão é atualizado em tempo real, a cada 10 segundos, sendo ajustado por diversos eventos durante o tratamento das corridas.

Os principais eventos retro alimentadores do sistema são: as análises químicas provenientes do laboratório, medições de temperatura e oxigênio dissolvido no metal, sopro de oxigênio pela lança, adição de ligas e agente refrigerante.

O resultado deste módulo é uma estimativa da progressão da composição química e temperatura do metal ao longo do refino que será utilizada como dados de entrada para outros módulos.

O detalhamento do cálculo da previsão de temperatura do banho metálico segue a estrutura abaixo:

$$Se \quad T.Atual = Valor \text{ medido} ; T.prevn - 1 = T.Atual \quad (\text{Equação 3})$$

$$Tprev. = T.prevn - 1 + \Delta TAl + \Delta TOx + Si \text{ adição} - \sum P_{ligas.Frefr.} - P_{suc.} F_{suc} - Perdas_{cir} \Delta t \quad (\text{Equação 4})$$



$T_{prevn-1} = T_{prev}$; retornando a sentença 1 em um processo cíclico

Onde:

T_{Atual} = temperatura real medida em [°C];

$T_{prevn-1}$ = Temperatura prevista ciclo anterior em [°C];

T_{prev} = Temperatura prevista [°C];

ΔT_{Al} = Ganho de temperatura na desoxidação com alumínio [°C];

ΔT_{ox} = Ganho de temperatura com sopro da lança KTB após desoxidação [°C];

$Si_{adição}$ = Ganho de temperatura na desoxidação com silício [°C];

Δt = tempo do ciclo [s];

P_{ligas} = Peso da liga adicionada. [kg];

$F_{refr.}$ = fator de resfriamento da respectiva liga adicionada

P_{suc} = Peso de material refrigerante (sucata de aço) [kg];

F_{suc} = Fator de resfriamento da sucata; e

$P_{perdas\ circ.}$ = Perdas de temperatura durante circulação do aço [°C].

O termo $P_{perdas\ circ.}$ está relacionado com intervalo de tempo entre tratamentos subsequentes.

Com relação à composição química, a previsão dos elementos Al, Mn, P, Cr, Mo, Ti, V, B e Nb, é definida pela equação genérica:

$$\% Elem\ prev = \% Elem\ prev_{n-1} + \frac{P_{ligas} * \% R_{end} * \% Elem_{ligas} * 100}{P_{aço} - F_{perdas\ circ} - F_{perdas\ sopro}} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$\% Elem\ prev.$ = Composição química prevista;

$\% Elem\ prev_{n-1}$ = Composição química prevista ciclo anterior;

P_{ligas} = Peso de liga adicionado [kg];

$\%R_{end}$ = Rendimento da liga adicionada;

$\%Elem_{ligas}$ = Teor do elemento na liga adicionada;

$P_{aço}$ = Peso de aço [t];

$F_{perdas.circ.}$ = Perdas de temperatura durante circulação do aço [°C]; e

$F_{perdas.sopro}$ = Perdas durante o sopro de oxigênio pela lança KTB [°C].

Para previsão do teor de carbono admite-se uma equação de primeira ordem, conforme a solução proposta por Suzaki,⁽²⁾

$$\% C_{prev,i} = C_{e,i} + (C_{o,i} - C_{e,i}) * \exp^{-kc,i * \Delta t} + (Rec.C)i - 1 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

$C_{e,i}$ = Carbono crítico;

$C_{o,i}$ = % carbono do ciclo anterior;

kc,i = Constante da velocidade de descarburização;

Δt = Tempo entre ciclos [s]; e

Rec.C = Recuperação de carbono pela adição de elementos de liga.



Adequando a equação cinética proposta aos resultados industriais da planta da CSN, utiliza-se como carbono crítico o resultado da equação 7.

$$C_c = L2 * 0,2 * \sum_{i=1}^5 \% C \text{ de liberação} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

L2 = Coeficiente de ajuste do C_c; e

%C_de_liberação = É o %carbono de liberação da corrida i.

De acordo com Sumida⁽³⁾ o cálculo da velocidade de descarburização está diretamente ligado à taxa de circulação do aço líquido pelo vaso, e ao coeficiente volumétrico de transporte de massa conforme a equação 8.

$$Kc_i = \frac{Q_i}{P_{aço}} * \frac{ak_i}{\frac{Q_i}{420} + ak_i} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

Q_i = Taxa de circulação do aço líquido pelo vaso;

ak_i = Coeficiente volumétrico de descarburização [m³/s]; e

P_{aço} = Peso aço líquido.

Para o cálculo do coeficiente volumétrico de descarburização emprega-se a equação empírica desenvolvida por Akita⁽⁴⁾ equação 9.

$$ak_i = 2,27 * 10^{-7} * G^{0,67} * (10000 * \% C_{prev_{i-1}})^{1,76} * (ppm_{prev_i})^{0,75} * \left[\ln \left(\frac{P1_i}{P2_i} \right) \right]^{0,67} * S \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

ak_i = Coeficiente volumétrico da descarburização [m³/s];

G = Vazão de argônio injetado pela perna do RH [Nm²/minuto];

%C_{prev_{i-1}} = Previsão do teor de Carbono

ppm_{prev_i} = Previsão do teor de Oxigênio dissolvido

P1 = Pressão atmosférica [mbar];

P2 = Pressão no interior do vaso RH [mbar]; e

S = Área da seção interna do vaso RH.

Para o cálculo da taxa de circulação, utiliza-se a equação de Kuwabara,⁽⁵⁾ desenvolvida através de modelo físico e validada em operação real.

$$Q = 114 * G^{\left(\frac{1}{3}\right)} * G^{\left(\frac{4}{3}\right)} * \left[\ln \left(\frac{P1}{P2} \right) \right]^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (\text{Equação 10})$$



Onde:

G = Vazão de argônio injetado pela perna do RH (Nm²/minuto);

P1= Pressão atmosférica [mbar];

P2= Pressão no interior do vaso RH [mbar]; e

d = Diâmetro da perna do vaso [mm].

2.3 Módulo de Aquecimento pela Lança KTB

Conforme comentado anteriormente durante o refino do aço em reatores RH muitas vezes se faz necessário a injeção de oxigênio. A Kawasaki Steel Corporation^(6,7) foi a pioneira na tecnologia de fornecimento de oxigênio através de lança. O cálculo da quantidade de oxigênio envolvida baseia-se em um balanço térmico e de massa. A primeira etapa do módulo consiste na determinação do adicional de oxigênio para garantir uma cinética da descarburização adequada aos tempos de operação, sendo fornecido pela equação 11.

$$Oxig.Cin = \frac{\left\{ \left(\frac{22,4}{32} \right) * [Oxig.desc + (Oxig.min - Oxig.inicial - Oxig.slag)] + Oxig.PC \right\}}{Rd.Ox} \quad \text{Equação (11)}$$

Onde:

Oxig.desc= Oxigênio estequiométrico para descarburização;

Oxig.min= Oxigênio mínimo no final de tratamento;

Oxig.inicial= Oxigênio no aço início tratamento;

Oxig.slag= Oxigênio contido na escória;

Oxig.PC= Oxigênio para pós combustão; e

Rd.Ox= Rendimento de oxigênio.

Uma vez verificado o adicional de oxigênio para a descarburização, calcula-se através de balanço térmico a necessidade de oxigênio para se obter a temperatura objetivada de liberação para o lingotamento contínuo. Neste cálculo já é considerado o ganho de temperatura com o oxigênio limitante para descarburização.

$$Gap.temp = T.obj - (T.end + T.add + T.DeO) \quad \text{(Equação 12)}$$

Onde:

T.obj = Temperatura objetivada de liberação;

T.end = Temperatura logo após a desoxidação;

T.add = Perda de temperatura pela adição de ligas; e

T.DeO= Perda de temperatura por circulação após desoxidação;

De posse do conhecimento do aporte térmico requerido, efetua-se a equação 13 obtendo o volume de oxigênio.

$$Or.end = \frac{Gap.temp * P_{aço}}{52} + O.end.Temp \quad \text{(Equação 13)}$$

Onde:



Paço= Peso de aço líquido; e

O end.Temp= PPM de oxigênio no final da descarburização.

Resultados práticos apontam que valores elevados de oxigênio dissolvido dificultam a descarburização, sendo necessário limitar estes valores por meio da adição de alumínio conforme a equação 14:

$$Al. req = \frac{\left[(Oend. max - Or. end) * \frac{54}{48} \right]}{Red. Al} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde:

Oend.max= PPM máximo de oxigênio;

Or.end= PPM de oxigênio após o sopro para aquecimento; e

Red.Al = Rendimento do alumínio.

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Dentre as principais vantagens verificadas com a implantação do novo sistema, destaca-se a melhoria da eficiência operacional como um todo, devido à comunicação rápida e segura entre os níveis 1 e 2.

O sistema “amigável” e, portanto facilmente aceito, promoveu uma redução do trabalho dos operadores que anteriormente realizavam cálculos e consultas a tabelas, reduzindo a possibilidade de erros.

Outras melhorias constatadas: redução das dispersões da composição química final dos aços, redução do consumo total de alumínio (Figura 4), redução do volume de oxigênio soprado (Figura 5) e redução do tempo total de tratamento (Figura 6).

Esta redução de tempo permite a Aciaria uma maior capacidade de produção de aços IF, em função do aumento do seqüencial médio no lingotamento contínuo limitados hoje, pelo tempo de tratamento no RH.

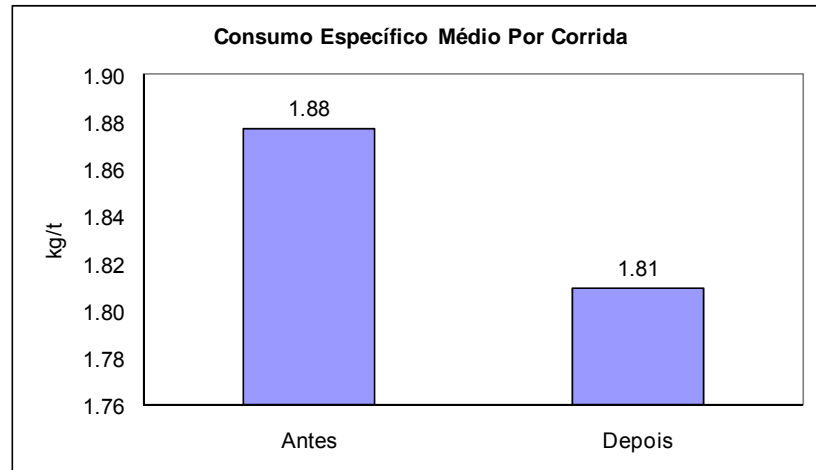


Figura 4 – Consumo específico de alumínio por corrida.

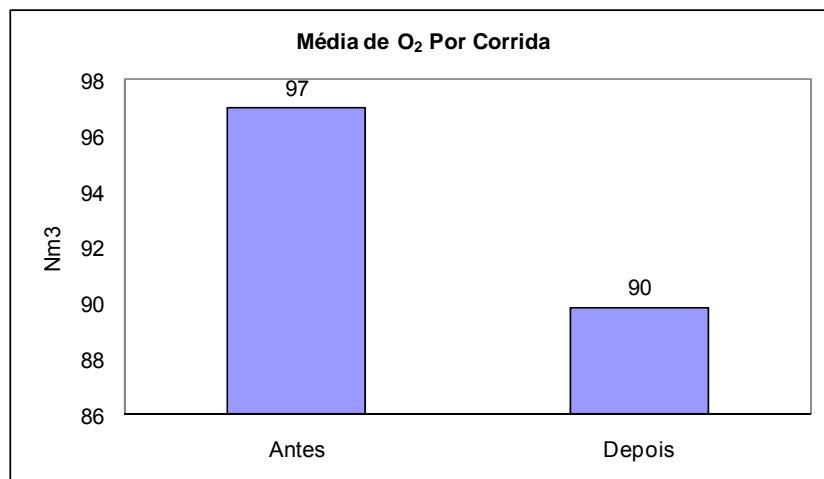


Figura 5 – Consumo médio de oxigênio por corrida.

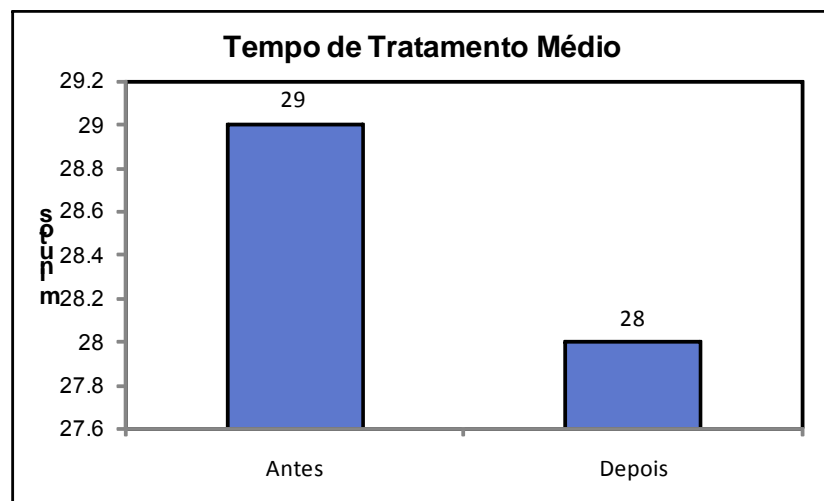


Figura 6 – Tempo médio de tratamento por corrida.



4 CONCLUSÕES

Nos primeiros meses de implantação do modelo de nível 2 do RH, é possível observar uma melhora direta nos índices operacionais do equipamento como a redução do consumo de Al e de oxigênio e uma ligeira melhora no tempo de tratamento médio das corridas.

Outro ganho obtido deve-se a redução da dispersão nos valores de análise química devido a cálculos precisos de adições de ligas. Com uma menor dispersão ganha-se em estabilidade de processo e repetibilidade de resultados. Além disso, cálculos automatizados e comunicação segura entre os níveis 1 e 2 reduzem a possibilidade da ocorrência de erros.

O desenvolvimento do nível 2 do RH pelo corpo técnico da CSN permite uma solução personalizada, considerando aspectos específicos da rotina operacional da empresa o que maximiza os ganhos potenciais e facilitando sua aceitação pelo nível operacional.

REFERÊNCIAS

- 1 RH-KTB unit for CSN BRAZIL – Manual de Operação SMS VACMETAL & BFI Betriebstechnik GmbH; Brasil, Volta Redonda, 1997
- 2 SUSAKI, K.; ARAÚJO, J.V.D.S.; SILVA, A.L.V.C. Simulação e Validação de Modelo Matemático da Descarburização em Degaseificador à Vácuo com Circulação.; Contribuição técnica XXX Seminário sobre Fusão e Refino e Solidificação dos Metais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Belo Horizonte, Maio, 1999, p.543-552
- 3 SUMIDA, N. et al. Production of ultra-low carbon steel by combined process of bottom-blown converter and RH degasser, **Kawasaki Steel Technical Report**, n.8, p.69-76, Sept. 1983
- 4 AKITA, K.; YOSHIDA F. Gas Holdup and Volumetric Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns. *Ind.Eng.Chem.Process Des.Develop.*, v.12,nº 1,1973.
- 5 KUWABARA, T. et al. *Investigation of decarburization behavior in RH-reactor and Operation Improvement*; Transactions ISIJ, Jpn,Tokyo, 1988. Vol 28: p. 305-314(1988).
- 6 NAKAI, K.; EHARA, T.; FUJIOKA, M. The KTB Method in the World Steel Industry: Recent Progress in Kawasaki Steel's Advanced Top Oxygen Blowing Method for the Vacuum Degasser **Kawasaki Steel Technical Report**, n.36, p.34-40, July. 1997.
- 7 KAWASAKI STEEL CORPORATION. **Relatório Técnico** - How to Calculate Oxygen Volume for KTB., Engineering Divisional Group. P.1-12, March, 1998.