



MODELAGEM MATEMÁTICA DO REFINO EM FORNO PANELA NA CSN ¹

*Antônio Augusto Martins*²
*Rodrigo da Silva Magalhães*²
*Wellington Ferreira Barbosa*²
*Vanessa Cavalheiro de Azevedo*²
*Fernando da Rocha V. Pinto*³
*Leonardo Felipe da Silva Teixeira*³
*Hugo Cabral Folly*³

Resumo

Construído a partir das práticas operacionais, o modelo matemático para refino de aço no Forno Panela da Companhia Siderúrgica Nacional torna-se uma representação simplificada da realidade, possibilitando um controle de processo mais efetivo. Elaborado com três módulos distintos: banco de dados composto dos parâmetros de engenharia e padrões operacionais, módulo com os cálculos de previsão de resultados de composição química e temperatura e módulo contemplando os cálculos das ligas a serem adicionada, quantidade de energia para o aquecimento elétrico e determinação da temperatura de liberação do equipamento. O módulo de previsão recebe ajustes cíclicos dos resultados reais da corrida, tais como composição química do metal e medições de temperatura, sendo também abastecido pelos eventos provenientes do nível 1. Os dados de entradas para os cálculos citados acima são fornecidos pelo módulo de previsão e pelos parâmetros do módulo de engenharia. Nos primeiros meses de operação do modelo foi observado uma redução no tempo de aquecimento e na dispersão da análise química final da corrida.

Palavras-chave : Forno panela; Modelo matemático; Sistema de automação nível 2

MATHEMATICAL MODELING OF LADLE FURNACE REFINING AT CSN

Abstract

Developed from operational practices, the mathematical model for refining steel in the Ladle Furnace of Companhia Siderúrgica Nacional is used to being a simplified representation of reality, allowing a more effective process control. Three independents modules were designed: a database of the engineering parameters and operating standards, other one is a prediction results of process and finally the module where can be calculated of alloys added and the amount of energy for electric heating. The prediction module is updated by cyclical adjustments of the actual results such as chemical composition and temperature measurements, also the events from level 1. The input data for the calculations are provided by the prediction module and the module parameters of engineering. In the first months of operation of the model a reduction was observed in the time of heating and in the dispersion of the chemical analysis.

Keywords: Ladle furnace; Mathematic model; Level 2 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 *Analista de Sistema – CSN.*



1 INTRODUÇÃO

Tendência moderna em controle de processo os modelamentos matemáticos são ferramentas efetivas. Nas aciarias estes softwares de supervisão estão instalados em estações de operação que interagem com os CLP's através de redes de comunicação industriais. Habitualmente classificado como nível 2 este método de operação tem sido aplicada com maior intensidade nas últimas décadas impactando diretamente no desempenho dos processos.

Dentro deste contexto a Companhia Siderúrgica Nacional finaliza a automação dos principais equipamentos da aciaria com desenvolvimento do modelo matemático para refino de aço no Forno Panela que possui como principais funções o ajuste da composição química através dos cálculos das adições de ligas e controle da temperatura por meio de aquecimento elétrico ou eventualmente por resfriamento.

O desenvolvimento e a implantação do nível 2 do Forno Panela constituíram um desafio para o corpo técnico, pois substitui a simplicidade e acertividade da experiência dos operadores que atuavam diretamente no nível 1, principalmente no que se refere ao tempo de aquecimento de cada etapa que com o modelo passou a ser calculado pela quantidade de energia para alcançar a temperatura objetivada.

O trabalho descreve sucintamente as funcionalidades, algoritmo e a fase inicial de operação do sistema.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O algoritmo do nível 2 do Forno Panela é arquitetado em três módulos distintos: parâmetros de engenharia e padrões operacionais, módulo de previsão e módulo de cálculos das adições, aquecimento e temperatura de final de tratamento.

O banco de dados com os parâmetros de engenharia e padrões operacionais fornece os valores de entrada tanto para o modulo de previsão como para o modulo de cálculos (Figura 1).

The screenshot shows the 'Parâmetros do FP' (Furnace Parameters) window. At the top, there are navigation tabs: 'Coordenação', 'Especificações', 'Controle de Interferências', 'Padrões', 'Altera Parâmetros', 'Parâmetros dos Modelos', 'Modelo Escumagem', and 'Eventos'. The main window title is 'Parâmetros do FP' with a date and time '23/02/2011 13:27:48'. Below the title bar, there are buttons for 'Salvar' and 'Excluir'. The 'Dados Novo Grau' section shows 'Grau do Aço: 2710' and a dropdown for 'Esse Grau é Parecido com?'. There is a 'Copiar Dados' button. Below this is a table with columns for different types of additions and their respective amounts. The 'Parâmetros de Temperatura por Grau' section contains a table with heating parameters. The 'Cálculo de Aquecimento' section has a table with heating parameters. The 'Tempo Limite de Segurança' and 'Tolerância' section has input fields. The 'TAP Preliminar' section has a table with columns for TAP, Curva, Tempo, and TaxaAq. The 'TAP Sequenciais' section has a similar table. The 'Temperatura de liberação do FP por grau' section has a table with columns for KVEB, B1, and G1.

Parâmetro	Valor
FCT.FeMnST - Queda de temperatura a devida adição de FeMnST	-24
FCT.FeMnSiC - Queda de temperatura a devida adição de FeMnSiC	-22
FCT.FeMnSiC - Queda de temperatura a devida adição de FeMnSiC	-18,99
FCT.FeMnMet - Queda de temperatura a devida adição de Mn met.	-18
FCT.FeMnM - Queda de temperatura a devida adição de FeMnM	-26
FCT.FeCnB - Queda de temperatura a devida adição de FeCnB	-28
FCT.FeSiS - Queda de temperatura a devida adição de FeSiS	4
FCT.FeP - Queda de temperatura a devida adição de FeP	-34
FCT.FeS - Queda de temperatura a devida adição de FeS	-29
FCT.FeV - Queda de temperatura a devida adição de FeV	-16
FCT.FeW - Queda de temperatura a devida adição de FeW	-6,58
FCT.FeB - Queda de temperatura a devida adição de FeB	-14
FCT.FeTiB - Queda de temperatura a devida adição de FeTiB	-18
FCT.FeTiS - Queda de temperatura a devida adição de FeTiS	-16
FCT.FeMo - Queda de temperatura a devida adição de FeMo	-14

TAP	Curva	Tempo	TaxaAq. (C/s)
10	CURVA_3	3	2,2

TAP	Curva	Tempo	TaxaAq. (C/s)
4	CURVA_3		4,35

Parâmetro	Valor
KVEB - Cor. de Temp. para a casos onde a coersão será tratada no RH	53
B1 - Const. da equação KVEB (cor. de T para casos de rota FP para EB)	15,58
G1 - Const. da equação KVEB (cor. de T para casos de rota FP para EB)	6,58

Figura 1: Tela do Módulo de Engenharia com os parâmetros de entrada do modelo.



Outra finalidade do módulo de engenharia é o armazenamento das orientações aos operadores, através de um guia, sequenciando cronologicamente os eventos operacionais a serem seguidos para cada tipo de aço (Figura 2). O acesso a esta parte do software é restrita ao corpo técnico responsável a delinear o processo de refino.

Código	Programa	Ordem	Descrição
PESARCAL_ESC		1	Calcular pre-pesagem da Cal / SodaLita / Al
CHE_PAN	00:00	2	Chegada da Panela e acoplamento da mangueira de argônio
AVALIAR BORD	00:03	3	Avaliar borda livre e espessura da Escoria. Descer abobada e verificar nivelamento
INICIAR AQUE	00:05	4	Calcular aquecimento preliminar
VERIF_AR	00:08	5	Final do aquecimento preliminar. Verificar argônio
AO_NORMAL		6	Calcular aquecimento sequencial. Adicionar Al preliminar / Cal / SodaLita
FINAL AO	00:16	7	Final de Aquecimento
AMOST_TEMP		8	Retirar amostra e medir temperatura
RE-AO	00:18	9	Calcular aquecimento (importante verificar horário previsto de liberação da panela)
PE-CORR	00:21	10	Resultado da amostra. Calcular material para correção
FINAL_AO	00:22	11	Final do aquecimento. Medir temperatura
MAT CORR	00:24	12	Adicionar material para correção
AMOST_TEMP	00:27	13	Retirar amostra e medir temperatura
LIB GRAU 2	00:28	14	Liberar corrida para a EB / Lingotamento

Figura 2: Tela do Módulo de Engenharia com os eventos operacionais.

O módulo de previsão é atualizado de forma cíclica, em tempo real, por análises químicas proveniente do laboratório, medições de temperatura e oxigênio dissolvido no metal, potência ativa da voltagem do transformador secundário utilizado, da vazão de gases inertes soprados pelo “plug” poroso, adição de ligas e agente refrigerante. Como resultado deste módulo, tem-se uma estimativa da progressão da composição química e temperatura do metal ao longo do refino. O cálculo da previsão de temperatura do banho metálico segue a estrutura abaixo:

$$\text{Se } T_{\text{atual}} = \text{Valor medido}; T_{\text{prev}_{n-1}} = T_{\text{atual}}$$

$$T_{\text{prev}} = T_{\text{prev}_{n-1}} + \left[\frac{Pot_{At} \cdot \Delta t}{C_p \cdot \eta \cdot P_{aço}} \right] - \left(\sum P_{\text{ligas}} \cdot F_{\text{refr}} \right) - (P_{\text{suc}} \cdot F_{\text{suc}}) - P_{\text{erdas}} \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 1})$$

$$T_{\text{prev}_{n-1}} = T_{\text{prev}}; \text{ retornando a sentença 1 em um processo cíclico}$$

Onde:

T_{Atual} = temperatura real [°C];

$T_{\text{prev}_{n-1}}$ = Temperatura prevista ciclo anterior [°C];

T_{prev} = Temperatura prevista [°C];

Pot_{At} = Potência ativa no transformador secundário [kW];

C_p = Calor específico do aço líquido [kW/ t °C];

Δt = tempo do ciclo [horas];



$P_{aço}$ = Peso do Aço líquido [t];
 η = Rendimento do aquecimento elétrico;
 P_{ligas} = Peso da liga adicionada [kg];
 F_{refr} = Fator de resfriamento da respectiva liga adicionada [°C/kg];
 P_{suc} = Peso de material refrigerante (sucata de aço) [kg];
 F_{suc} = Fator de resfriamento da sucata; e
 $P_{perdasTratamento}$ = Perdas de temperatura durante o tratamento [°C/horas]
(valores distintos para condição com e sem sopro pelo “plug”

poroso)

Quanto à composição química, a previsão dos elementos Al, Si, N, Cr, Mo, Ti, B e Nb, é definida genericamente pela equação 2:

$$\%E_{prev} = \%E_{prev_{n-1}} + \left(\frac{P_{ligas} \cdot \%R_{end} \cdot \%E_{ligas}}{100000 \cdot P_{aço}} \right) - F_{perdasAr} \cdot \Delta t - F_{perdasAQ} \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

$\%E_{prev}$ = % Elemento na previsão;
 $\%E_{prev_{n-1}}$ = % Elemento na previsão no ciclo anterior;
 P_{ligas} = Peso da ferro-liga adicionada [kg];
 $\%E_{ligas}$ = % Elementos na liga adicionada;
 $\%R_{end}$ = Rendimento das ligas;
 $P_{aço}$ = Peso do Aço líquido [t];
 $F_{perdasAr}$ = fator de perdas com o sopro de argônio;
 $F_{perdasAQ}$ = fator de perdas com o aquecimento elétrico; e
 Δt = tempo do ciclo em [minutos].

Especificamente para a previsão de Carbono utiliza-se o seguinte cálculo:

$$\%C_{prev} = \%C_{prev_{n-1}} + \left(\frac{P_{ligas} \cdot \%R_{end} \cdot \%E_{ligas}}{100000 \cdot P_{aço}} \right) + F_{RecEleAQ} \cdot \Delta t \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

$\%C_{prev}$ = % Carbono na previsão;
 $\%C_{prev_{n-1}}$ = % Carbono na previsão no ciclo anterior;
 P_{ligas} = Peso da liga adicionada [kg];
 $\%E_{ligas}$ = % Elementos na liga adicionada;
 $\%R_{end}$ = Rendimento das ligas;
 $P_{aço}$ = Peso do Aço líquido [t];
 $F_{RecEleAQ}$ = fator de recuperação com o aquecimento elétrico; e
 Δt = tempo do ciclo [minutos].

Em relação ao S, P e Mn a previsão é feita baseada somente no aumento do teor dos elementos no aço com a adição das ligas uma vez que seu comportamento durante o tratamento depende fortemente da composição da escória.



$$\% E_{prev} = \% E_{prev_{n-1}} + \left(\frac{P_{ligas} \cdot \% R_{end} \cdot \% E_{ligas}}{100000 \cdot P_{aço}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

- % E_{prev} = % Elemento na previsão;
- % E_{prev n-1} = % Elemento na previsão no ciclo anterior;
- P_{ligas} = Peso da liga adicionada [kg];
- %E_{ligas} = % Elementos na liga adicionada;
- %R_{end} = Rendimento das ligas; e
- P_{aço} = Peso do Aço líquido [t].

O módulo de previsão permite o acompanhamento on-line e o registro do comportamento da composição química e temperatura do metal durante todo o tratamento da corrida no Forno Panela (Figura 3).

Conectado ao módulo de previsão, o módulo de cálculos utiliza como valores de referência as estimativas citadas anteriormente e como valores objetivados os parâmetros localizados no módulo de engenharia. Os seguintes cálculos são realizados: cálculo de adição de elementos de liga, cálculo da temperatura objetivada de liberação e cálculo de aquecimento e resfriamento.

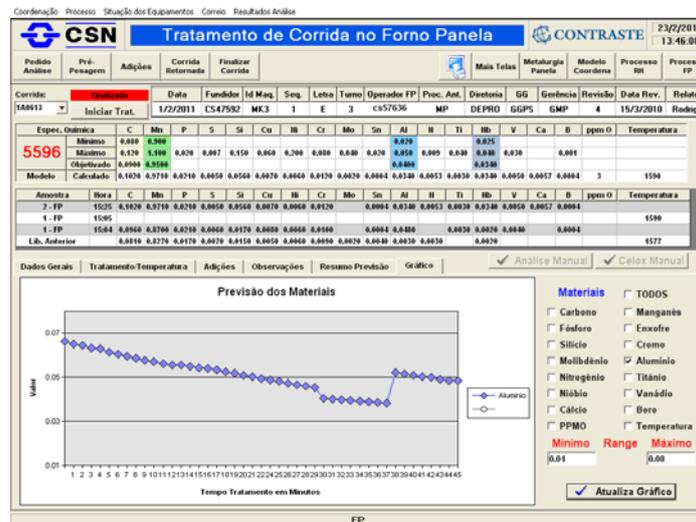


Figura 3: Comportamento da previsão de Al durante o tratamento no Forno Panela.

O cálculo de adição dos elementos de liga é dividido em pesagem preliminar e pesagem de correção. Os cálculos são realizados segundo a equação 4:⁽¹⁾

$$P_{adicionar} = \left[\frac{P_{aço} \cdot 100000 \cdot (\% E_{lib} - \% E_{prev})}{\% R_{end} \cdot \% E_{ligas}} \right] - \sum P_{rec} \quad (\text{Eq. 4})$$



Onde:

$P_{\text{adicionar}}$ = Peso da liga a se adicionar [kg];

$P_{\text{aço}}$ = Peso do Aço líquido [t];

$\%E_{\text{lib}}$ = % objetivado do elemento;

$\%E_{\text{prev}}$ = % elemento na previsão;

$\%E_{\text{ligas}}$ = % Elementos na liga adicionada;

$\%R_{\text{end}}$ = Rendimento das ligas; e

P_{Rec} = Peso recuperado do elemento na adição de outras ligas [kg].

O peso recuperado dos elementos após adição é calculado pela equação 5:

$$P_{\text{rec}} = \left(\frac{P_{\text{ligas}} \cdot \% R_{\text{end}} \cdot E_{\text{ligas}}}{10000} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

P_{Rec} = Peso recuperado do elemento na adição de outras ligas [kg];

$\%E_{\text{ligas}}$ = % Elementos na liga adicionada;

$\%R_{\text{end}}$ = Rendimento das ligas; e

P_{ligas} = Peso adicionado das ligas [kg].

Os fundentes adicionados para formação da escória sintética são pré fixados e planejadas basicamente para duas finalidades: potencializar o processo de dessulfuração e impedir a exposição do arco elétrico afetando o refratário da panela.

Para atender a primeira finalidade objetiva-se uma composição química ao longo do refino no Forno Panela, localizada nas regiões do diagrama ternário CaO-SiO₂-Al₂O₃⁽²⁾ em isotérmicas de baixo ponto fusão (aproximadamente 1.500°C) e com baixos teores sílica (valores menores que 5%). A segunda condição é atendida calculando o montante de materiais suficiente para envolver o arco voltaico.

No caso específico da CSN as quantidades são grandes para serem adicionadas durante o vazamento. Adição total no Forno Panela também é descartada em função da dificuldade de homogeneização. Como opção adota-se parcelar a adição de escorificantes entre o vazamento e início de aquecimento segundo a equação 6.

$$P_{\text{adicionar}} = P_{\text{obj}} - P_{\text{Conv}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$P_{\text{adicionar}}$ = Peso da liga a se adicionar no Forno Panela [kg];

P_{obj} = Peso objetivado de adição [kg]; e

P_{Conv} = Peso adicionado no conversor [kg].

A seqüência do cálculo de adição é feita de forma a contemplar os elementos residuais das ligas visando reduzir o peso dos materiais a serem adicionados como é o caso do cálculo de carbono em fio e/ou coque.



O cálculo da temperatura objetivada de liberação do Forno Panela é dividido em três equações selecionadas de acordo com o destino da corrida:

a) Destino = Lingotamento

$$TLFP = TODT + KPLA + KSEQ + KTTB + KTVO + KTLG + KATV \quad (\text{Eq. 7})$$

b) Destino = RH

$$TLFP = TODT + KSEQ + KTTB + KTVO + KTLG + KATV + KVRH \quad (\text{Eq. 8})$$

c) Destino = EB

$$TLFP = TODT + KSEQ + KTTB + KTVO + KTLG + KATV + KVEB \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

TLFP = Temperatura objetivada de liberação do FP [°C];

TODT = Temperatura objetivada no distribuidor [°C];

KPLA = Fator devido ao tempo entre liberação a abertura no lingotamento [°C];

KSEQ = Fator devido à seqüência da corrida [°C];

KTVO = Fator devido à troca no vôo [°C];

KTLG = Fator devido ao tempo de lingotamento [°C];

KATV = Fator para a corrida que antecede troca no vôo [°C];

KVRH = Fator de temperatura onde a liberação é feita para o RH [°C]; e

KVEB = Fator de temperatura onde a liberação é feita para a EB [°C].

Com o objetivo de facilitar a interação do operador com o modelo, o cálculo da energia necessária para aquecer o aço líquido até a temperatura objetivada de liberação é convertida em unidade de tempo segundo a equação 10:⁽³⁾

$$t_{aq} = \left(\frac{\Delta T_{Rec} \cdot C_p \cdot \eta \cdot P_{aço}}{60 \cdot Pot_{Prog}} \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

t_{aq} = Tempo necessário para aquecimento [minutos];

ΔT_{Rec} = Variação de temperatura necessária para aquecimento [°C];

C_p = Calor específico do aço líquido [kW/ t °C];

$P_{aço}$ = Peso do Aço líquido [t];

η = Rendimento do aquecimento elétrico; e

Pot_{Prog} = Potência programada no transformador secundário [kW].

A variação de temperatura necessária para o aquecimento e a queda de temperatura devido a adição de ligas são calculados pelas equações 11 e 12. respectivamente



$$\Delta T_{\text{Rec}} = TLFP - T_{\text{prev}} + T_{\text{add}} - P_{\text{erdasTratamento}} \cdot T_{\text{Trat}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

ΔT_{Rec} = Variação de temperatura necessária para aquecimento [°C];

TLFP = Temperatura objetivada de liberação do FP [°C];

T_{prev} = Temperatura prevista [°C];

T_{add} = Queda de temperatura devido as adições dos ferro-ligas [°C];

$P_{\text{erdasTratamento}}$ = Perdas de temperatura durante o tratamento [°C/h];

(valores distintos para condição com e sem sopro pelo “plug”

poroso); e

T_{Trat} = Tempo previsto de tratamento entre o momento do cálculo até a hora prevista de liberação [minutos].

$$T_{\text{add}} = \sum \left[(\% E_{\text{lib}} - \% E_{\text{prev}}) Fat_{\text{refr}} \right] \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

T_{add} = Queda de temperatura devido as adições dos ferro-ligas [°C];

$\% E_{\text{lib}}$ = % objetivado do elemento;

$\% E_{\text{prev}}$ = % elemento na previsão; e

Fat_{refr} = Fator de resfriamento da liga [°C/%].

O cálculo do resfriamento segue a equação 13:

$$P_{\text{suc}} = \frac{T_{\text{prev}} - TLFP}{F_{\text{suc}}} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

P_{suc} = Peso calculado de sucata [kg];

F_{suc} = Fator de resfriamento da sucata [°C/kg];

T_{prev} = Temperatura prevista [°C];

TLFP = Temperatura objetivada de liberação do FP [°C];

A Figura 5 mostra a janela de cálculo do tempo de aquecimento durante o tratamento da corrida no Forno Panela:

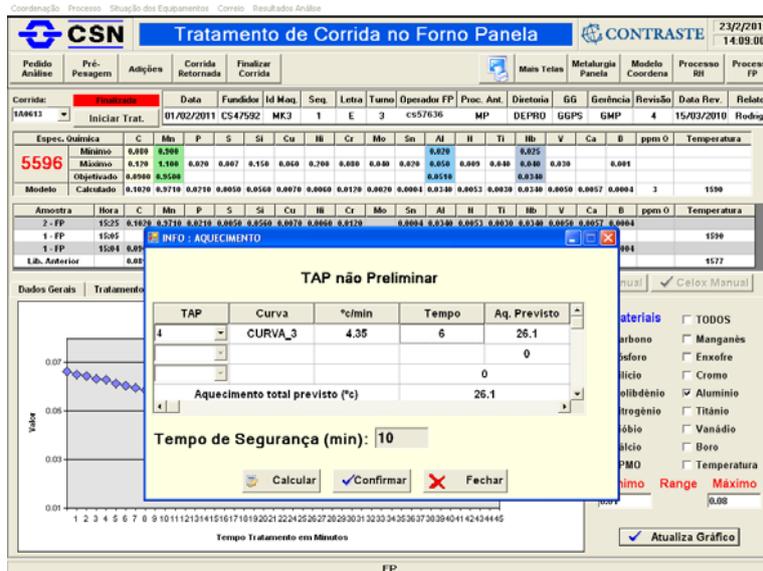


Figura 5: Janela de cálculo do tempo de aquecimento no Forno Panela.

Um ponto importante a se salientar é que toda a estrutura do modelo do Forno Panela foi idealizada visando atender a sequencia de tratamento da corrida que é descrita de forma geral na Figura 6:

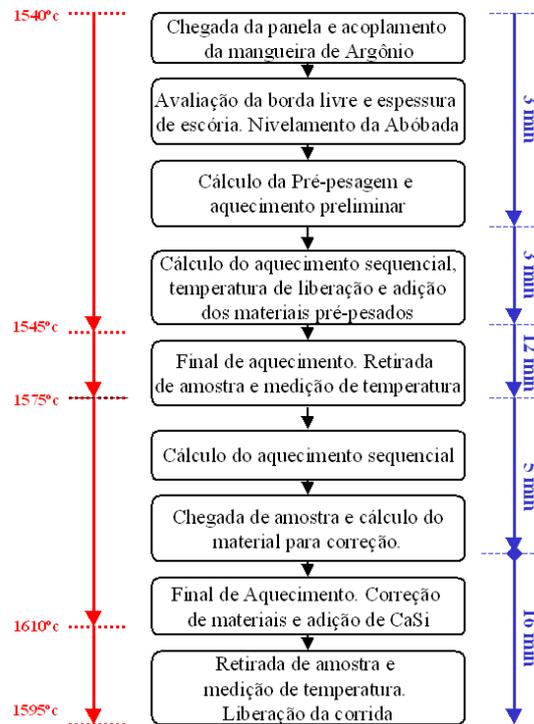


Figura 6: Fluxograma geral de tratamento de corrida no Forno Panela.



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros resultados obtidos com a implantação do modelo de nível 2 do Forno Panela apontam para uma redução do tempo de aquecimento na ordem de 5,1% devido à maior acurácia da temperatura ao final do tratamento. A Figura 7 mostra a redução do tempo de aquecimento em três famílias distintas de graus. A redução no tempo de aquecimento reflete de forma direta na economia do consumo de energia do equipamento.

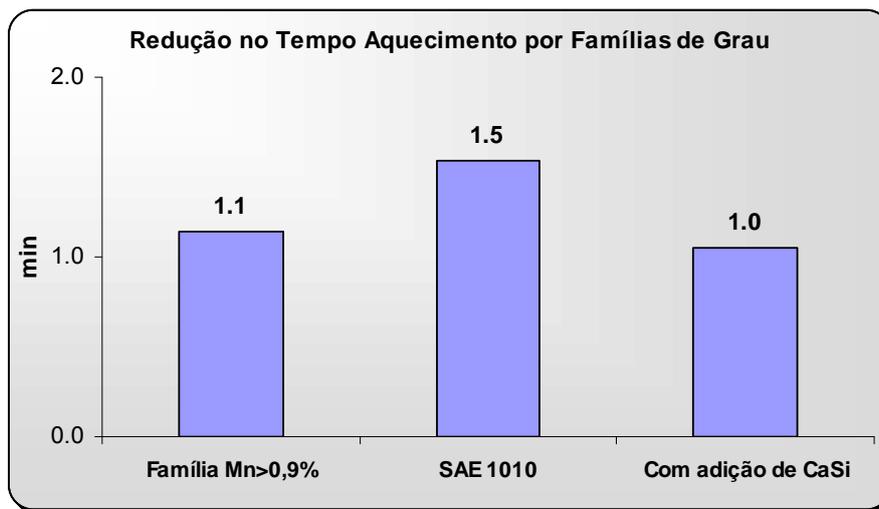


Figura 7: Redução do tempo de aquecimento após a implantação do modelo de nível 2.

O cálculo automático da correção de ligas aliada ao menor tempo de aquecimento possibilitou a redução no tempo de tratamento na ordem de 3,2 min por corrida.

Em relação a composição química foi observada uma menor dispersão dos resultados devido a maior precisão no cálculo do peso de ligas para correção quando comparado com adições baseada na consulta em tabelas. Com a redução da dispersão o processo se torna mais confiável e previsível. Além disso, cálculos automáticos de ligas e resultados enviados diretamente para o nível 1 reduzem a possibilidade de ocorrência de erros operacionais.

6 CONCLUSÃO

Nos primeiros meses de implantação do modelo de nível 2 do Forno Panela observou-se uma redução no tempo de aquecimento médio das corridas e na dispersão da análise química como reflexo da precisão do cálculo automático de adição de ligas e aquecimento. Além disso, cálculos automatizados e comunicação direta entre os níveis 1 e 2 reduzem a possibilidade da ocorrência de erros operacionais.

O desenvolvimento do modelo de nível 2 do Forno Panela pela equipe técnica da CSN possibilitou a inclusão de todos os aspectos operacionais relevantes do



equipamento de forma a facilitar sua utilização pelo operador e de maximizar os ganhos potenciais.

REFERÊNCIAS

- 1 Martins, A.A.; Azevedo, V. C.; Silva, A.C.S.; Arruda, M.D.S.; Automação dos cálculos e otimização das adições de ferro ligas e desoxidantes. Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24. 2009, São Paulo, SP
- 2 Slag Atlas 2nd Edition –Verlag Stahleisen GmbH, Dusseldorf, 1995
- 3 RH-KTB unit for CSN BRAZIL – Manual de Operação SMS VACMETAL & BFI Betriebstechnik GmbH; Brasil, Volta Redonda, 1997