

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

"OTIMIZAÇÃO DOS PROCESSOS SINTERIZAÇÃO -
ALTO FORNO - ACIÁRIA LD ATRAVÉS DA
PROGRAMAÇÃO LINEAR"

- DONG SU CHIO -

Trabalho apresentado à Comissão
de Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia de Campinas, como par
te dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Í N D I C E

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

- I.1. TERMINOLOGIAS METALÚRGICAS E NOTAÇÕES ADOPTADAS
- I.2. PROCESSOS SINTERIZAÇÃO - ALTO FORNO - ACIARIA
- I.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

CAPÍTULO II - MODELO DA SINTERIZAÇÃO

- II.1. DESCRIÇÃO DA SINTERIZAÇÃO
- II.2. BALANÇO MATERIAL

CAPÍTULO III - MODELO DO ALTO-FORNO

- III.1. DESCRIÇÃO DO ALTO-FORNO
- III.2. BALANÇO MATERIAL
- III.3. BALANÇO TÉRMICO

CAPÍTULO IV - MODELO DA ACIARIA LD

- IV.1. DESCRIÇÃO DA ACIARIA LD
- IV.2. BALANÇO MATERIAL
- IV.3. BALANÇO TÉRMICO

CAPÍTULO V - UM EXEMPLO PRÁTICO

- V.1. DADOS
- V.2. RESULTADOS

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

ANEXOS 1, 2,3

BIBLIOGRAFIAS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de manifestar uma profunda gratidão a aquelas pessoas que me ajudaram sob diversas formas durante o desenvolvimento desta tese; a minha esposa, Fátima, por seus incentivos carinhosos nos momentos mais difíceis; aos professores Dr. Hermano Tavares e Dr. Jurandir F.R. Fernandes que me orientaram com toda atenção e críticas construtivas, sugerindo inclusive a análise de sensibilidade do problema; a Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira que me concedeu o tempo e as informações necessárias para este trabalho e em especial ao Eng^o Carlos Augusto de Oliveira pelo seu apoio técnico e administrativo; e finalmente a minha secretária Sra. Maria Angela que me prestou um valioso serviço de datilografia.

SUMÁRIO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer um modelo matemático através do qual se possa otimizar o uso das matérias primas na produção de semi-produtos siderúrgicos como gusa e aço, numa usina siderúrgica integrada. Tais semi-produtos são caracterizados pelas respectivas faixas de composições químicas que devem ser obedecidas, assim como os processos metalúrgicos que foram representados pelas equações do balanço material e térmico para cada equipamento de produção. Algumas relações metalúrgicas foram convenientemente restringidas dentro das faixas operacionais visando obter um modelo para a aplicação do algoritmo de Programação Linear, utilizando o programa MPSX / 370 do IBM, que se mostrou bastante eficiente. Como resultado computacional, as composições químicas ótimas dos semi-produtos podem direcionar os setores de produção a fim de obter melhor retorno global. As influências das relaxações de algumas restrições ou pequenas alterações dos preços das matérias primas sobre o retorno global podem ser diagnosticadas através da análise de sensibilidade.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

I.1. TERMINOLOGIAS METALÚRGICAS E NOTAÇÕES ADOPTADAS

I.2. PROCESSOS SINTERIZAÇÃO - ALTO FORNO - ACIARIA

I.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

I.1. TERMINOLOGIAS METALÚRGICAS E NOTAÇÕES ADOTADAS

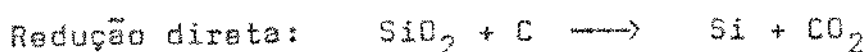
Em se tratando de um problema metalúrgico, é inevitável o uso de alguns termos específicos da metalurgia que devem ser esclarecidos inicialmente.

No decorrer do desenvolvimento do modelo, também foram adotadas algumas notações com a finalidade de facilitar a sua compreensão.

e. TERMINOLOGIAS

- Corrida: retirada periódica de uma porção de produtos em estado líquido de um forno. Pode se referir ao vazamento do gusa líquido no alto-forno ou a retirada de aço líquido do forno na aciaria.
- Redução: transformação química que ocorre no alto-forno, das substâncias da forma oxidada para forma elementar. A redução é direta quando esta transformação se processa pela ação de carbono (C) e indireta quando ela ocorre pela ação de monóxido de carbono (CO).

Exemplos:



- Calcinação: redução de carbonatos.



- Entalpia: calor contido numa substância na temperatura T ($^{\circ}\text{K}$). Por convenção, é calculado tomando como referência a temperatura ambiente, 298°K .

Notação: $(H_T - H_{298})$

Unidade: Cal / mol

- Entalpia de formação ou calor de formação: pode ser entendida como o calor gerado ou consumido na formação de uma substância química na temperatura ambiente. Portanto para substâncias químicas na forma elementar, este valor é zero.

Notação: ΔH_{298}

Unidade: Cal / mol

b. NOTAÇÕES ADOTADAS

- Nm^3 : Normal metro cúbico - unidade de volume ocupado pelo gás nas condições normais de pressão e temperatura.
- th: thérmia - unidade de calor, 10^6 calorias.
- M_x : mol de uma substância química x
- $(x)_i$: teor de substância química x na matéria prima i.
Por exemplo $(CaO)_i$ representa o teor de CaO na matéria prima i.

1.2. PROCESSO SINTERIZAÇÃO - ALTO FORNO - ACIARIA

Atualmente as modernas usinas siderúrgicas integradas possuem instalações de Sinterização, Alto-Forno e Aciaria trabalhando em linha. O processo de sinterização é basicamente uma aglomeração de partículas minerais numa massa porosa chamado sinter, pela fusão incipiente causada pelo calor produzido com a queima de um combustível a elas adicionado, empregando-se como fundentes cal ou calcário para auxiliar a aglomeração.

O enformamento de sinter proporciona maior produtividade do alto-forno em relação ao minério de ferro pela sua dimensão e porosidade que facilitam a passagem de gás acelerando as reações. A composição química do sinter desempenha uma função importante no alto-forno: ela deve ser de tal modo que assegure uma boa resistência física evitando a geração de finos e ao mesmo tempo atender às restrições operacionais do alto-forno principalmente quanto às faixas de variações de Alumina (Al_2O_3), Silica (SiO_2) e Óxido de Cálcio (CaO) que influenciam no volume de escória.

As matérias primas como sinter, combustível e adições são carregadas pelo topo do alto-forno e após percorrer todo o interior do forno são reduzidas aos elementos químicos como Ferro (Fe), Silício (Si), Carbono (C), etc, que incorporam no gusa líquido sendo periodicamente retirado através de uma região chamada cadinho, conforme figura 1. A combustão, entre o carbono do combustível e oxigênio do ar quente soprado pelas ventaneiras, é realizada numa zona inferior do forno. Os gases provenientes desta combustão CO e CO_2 , sobem percorrendo todo o corpo do alto-forno em contra-corrente em relação às cargas, reagindo com elas. Portanto as reduções podem ocorrer indiretamente, pela ação destes gases ascendentes ou diretamente em contato com carbono do combustível na zona de combustão. A proporção das reduções diretas e indiretas depende, entre outros, do estado térmico do forno. Os sub-produtos deste processo são:

- A escória, para a qual destinam-se as impurezas;

- O gás de alto-forno, que contém alta percentagem de CO, portanto combustível, e é utilizado para o aquecimento do ar nos regeneradores de calor chamados "cowpers", que posteriormente é soprado no alto-forno através das ventaneiras;
- Poeiras, que são partículas das cargas arrastadas pelos gases.

O Ferro-gusa assim obtido é então transportado para a aciaria ainda no estado líquido e posteriormente enornado junto com outras matérias primas como sucatas de aço, gusa sólido e cal numa panela cilíndrica móvel, revestida internamente de refratários, chamado convertedor. O processo de elaboração de aço consiste em basicamente elevar a temperatura desta mistura em pouco tempo, quer por combustão no caso da aciaria com sopragem a oxigênio, quer por via térmica no caso da aciaria elétrica, formando primeiro a escória através da qual as reações de refino ocorrem. Em geral, obtém-se no final de elaboração, o aço líquido cuja composição química é relativamente padronizada, com alta percentagem de Fe ($> 99\%$) e poucas impurezas. As adições específicas como cromo, níquel, FeMn, etc, são feitas posteriormente dependendo do tipo de aço que se queira produzir.

O desenvolvimento do modelo foi baseado na planta da Usina de João Monlevade, Minas Gerais, da Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira (CSBM), cujo fluxograma de produção é visualizado na figura 2. Os combustíveis utilizados na sinterização e no alto-forno são carvão vegetal e óleo. O processo de elaboração de aço é do tipo sopragem a oxigênio, chamado LD (Linz-Donawitz) no qual o calor é gerado principalmente através da combustão entre carbono do gusa e oxigênio soprado pela lança que se movimenta verticalmente em relação à boca do convertedor.

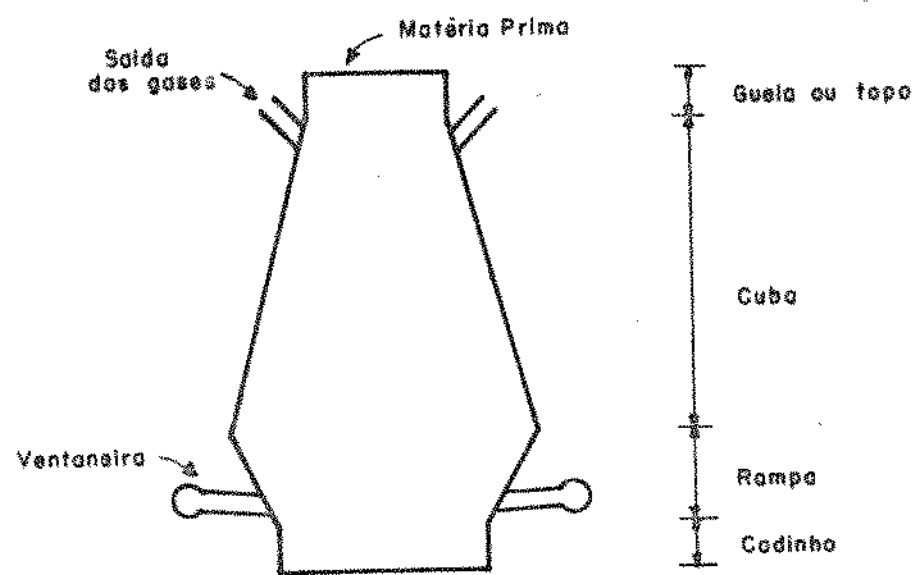


Figura 1 - Estrutura do Alto Forno.

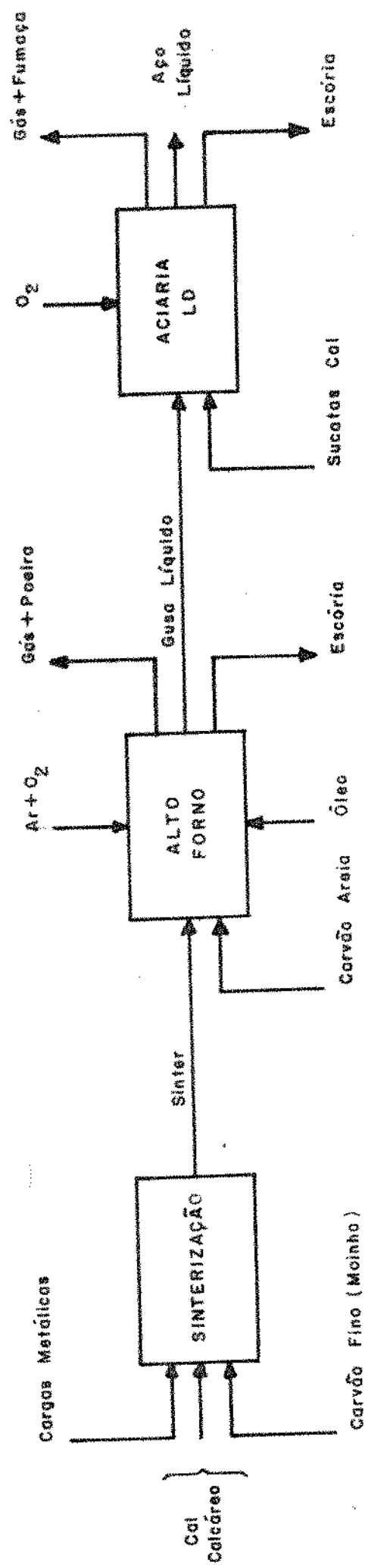


Figura 2 — FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DA PRODUÇÃO ; SINTERIZAÇÃO , ALTO FORNO E ACIARIA LD .

I.3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Com advento da Programação Linear no final da década de 1940, um dos campos de sua aplicação tem sido no ramo siderúrgico. Em particular, o problema da mistura ótima de matérias primas utilizados na produção de gusa no alto-forno tem recebido atenção especial conforme os modelos desenvolvidos por Geiger Jr. (5) e IBM (6). Geiger formulou o problema procurando obter o processo ótimo de operação do alto-forno no que se refere à temperatura e ma térias primas, enquanto que o modelo da IBM trata o problema de forma mais genérica com enfoque especial para planejamento de produção.

Mais recentemente, com o desenvolvimento tecnológico e no esforço de reduzir os custos industriais através da economia em escala, a verticalização, controle de todas as etapas, dos processos siderúrgicos se tornou um fato para a maioria das grandes empresas do ramo no mundo inteiro. Acompanhando a mudança desse perfil industrial, diversos metalurgistas passaram a estudar com maior profundidade a correlação entre diferentes fases de produção. Czovek (3) comprovou, através das regressões estatísticas, que o incremento dos teores de Silício, Manganês e Carbono assim como a temperatura do gusa, dentro dos limites operacionais, permite diminuir o custo da elaboração do aço. Por outro lado, também destacou que esse incremento causa a elevação do custo do gusa, sendo necessário portanto um processo de ponderação. Já Boccuni (16) estudou mais especificamente a influência do teor de Silício no gusa na produtividade do alto-forno e aciaria LD como mostra a figura 3.

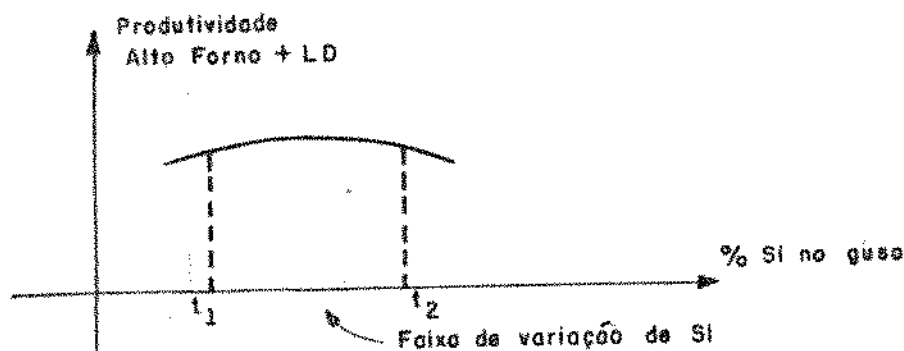


Figura 3 — Variação da produtividade conjunta do Alto Forno e da Aciaria LD em função do teor de Si no gusa

Ao mesmo tempo, as propriedades termodinâmicas das reações químicas que ocorrem nos fornos foram sendo mais esclarecidas conforme atestem as referências (7) e (14).

A proposição deste trabalho é então, a partir destes conhecimentos, desenvolver um modelo matemático para o sistema integrado de produção de semi-produtos siderúrgicos como sinter, gusa e aço, que possibilite estabelecer uma estratégia ótima de produção baseada na melhor utilização das matérias primas, delegando aos setores de produção o gerenciamento da operação, dada a aleatoriedade dos fatores que influenciam tal estratégia.

O modelo foi desenvolvido para aplicação da técnica de Programação Linear que permite a manipulação de grande quantidade de variáveis oferecendo rapidamente as soluções ótimas e a sua utilidade cresce com a complexidade do processo industrial. Como resultado deste modelo podem ser obtidos:

- Composições ótimas do gusa e sinter;
- Enfornamento com menor custo de matérias primas;
- Planejamento de produção do sinter e do gusa para uma dada demanda de aço;

O balanço material e térmico de cada processo forma o conjunto das restrições no modelo junto com as limitações de produção e suprimento das matérias primas. Alguns parâmetros indicadores de "performance" operacional dos equipamentos, como a relação CO / CO_2 do gás do alto-forno e da aciaria LD, serão fixados a fim de equacionar de maneira mais real os processos metalúrgicos. Pela mesma razão as temperaturas envolvidas em cada fase da produção também devem ser estabelecidas a priori.

O modelo foi dividido em várias partes, para facilitar a sua compreensão, acompanhando o processo de produção.

No Capítulo II foram descritas as equações do balanço material da Sinterização como ele é feito atualmente, cujas variáveis de decisão são as quantidades de matérias primas e a composição do

sinter. As restrições dos balanços materiais e térmicos do alto-forno e de aciaria LD foram equacionadas nos capítulos III e IV respectivamente. A formulação é feita de maneira genérica nestes capítulos e finalmente no capítulo V um exemplo prático com dados reais é apresentado, cujos resultados serão objetos de discussão no capítulo VI.

CAPÍTULO II - MODELO DA SINTERIZAÇÃO

II.1. DESCRIÇÃO DA SINTERIZAÇÃO

II.2. BALANÇO MATERIAL

II.1. DESCRIÇÃO DA SINTERIZAÇÃO

A Sinterização tem por objetivo reconstituir, a partir de materiais finos, pedaços grandes de minério, adequados ao carregamento e operação do alto-forno. O minério fino é misturado com quantidades precisamente dosadas do combustível sólido (no caso carvão vegetal fino chamado moinha), calcário e água para obter uma certa aglomeração. A mistura é depositada sobre uma grelha e a sua superfície levada à incandescência, enquanto se faz a sucção do ar, por baixo da grelha. A combustão se realiza progressivamente até atingir a camada inferior da mistura junto a grelha. No final, resulta um material poroso que depois é quebrado no tamanho adequado e resfriado para ser enforcado no alto-forno.

Existem dois tipos de processos de sinterização: Contínuo e Descontínuo. O processo utilizado da Usina de Monlevade é contínuo do tipo Dwight-Lloyd, cujo fluxo é mostrado de forma simplificada na figura 4.

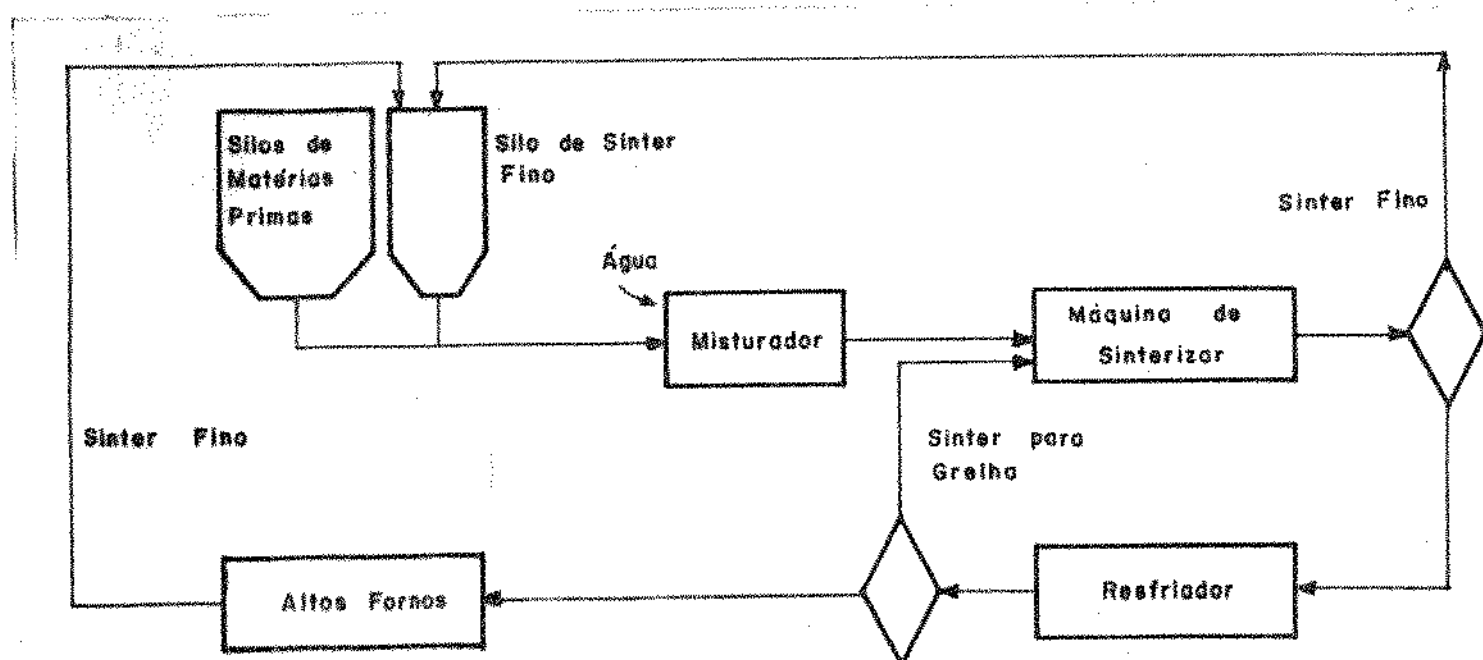


Figura 4 — Fluxograma da Sinterização Dwight-Lloyd

Neste processo a velocidade da máquina de sinterizar é automaticamente controlada, de acordo com o estado térmico da mistura em combustão, e consequentemente a dosagem dos materiais em proporções pré-fixadas.

Com a finalidade de proteger os equipamentos contra poeiras e obter melhor rendimento no alto-forno, o fino do sinter (sinter degradado) é recirculado, adicionando-se posteriormente numa dosagem fixa na mistura de materiais através de um silo regulador.

Como o processo de sinterização é, em síntese, uma aglomeração de materiais, não há praticamente a perda durante o processo, exceto perda ao fogo. Isto é, toda carga da mistura se transforma no final em sinter após a combustão. O balanço material da sinterização se baseia neste fato.

II.2. BALANÇO MATERIAL

As referências (1) e (2) serviram de base para este modelo de Sinterização.

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

CARGANT	- Quantidade de carga metálica seca	t
FINAF	- Quantidade de fino do alto forno (sinter degradado)	t
MNFEST	- Quantidade de minério de ferro	t
MNST	- Quantidade de minério de manganês	t
CARVAOST	- Quantidade de carvão fino (moinha)	t
SINTER	- Quantidade de sinter	t
CALST	- Quantidade de cal	t
CALCARST	- Quantidade de calcáreo	t
SISINT	- Quantidade de SiO_2 no sinter	t
CAOST	- Quantidade de CaO no sinter	t
MNSINT	- Quantidade de MnO no sinter	t
FERROST	- Quantidade de ferro total no sinter	t
FEO3ST	- Quantidade de Fe_2O_3 no sinter	t
FEOST	- Quantidade de FeO no sinter	t
FOSST	- Quantidade de P_2O_5 no sinter	t
ALUMST	- Quantidade de Al_2O_3 no sinter	t

II.2.1. CARGAS

As cargas metálicas são dosadas em peso úmido sabendo que a umidade não fará parte do sinter.

Seja U_i o teor de umidade na carga i , então a carga metálica total em peso seco será:

$$\text{CARGAMT} = (1 - U_1)\text{FINAF} + (1 - U_2)\text{MNFEST} + (1 - U_3)\text{MNST} \quad (2.1)$$

A quantidade do carvão pode ser considerada proporcional ao peso úmido total da carga metálica. Portanto uma pequena variação na composição do carvão deve afetar a composição de sinter no final do processo.

Seja k_1 essa proporção, então a quantidade de carvão a ser colocada será:

$$\text{CARVAOST} = k_1 (\text{FINAF} + \text{MNFEST} + \text{MNST}) \quad (2.2)$$

Dependendo da atuação do silo regulador, às vezes é necessário dosar o sinter degradado (FINAF) numa proporção fixa na carga metálica. Seja k_2 tal proporção, tem-se

$$\begin{aligned} (1 - U_1) \text{FINAF} &= k_2 \text{CARGAMT} \\ (1 - U_1) \text{FINAF} - k_2 \text{CARGAMT} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Desprezando as perdas ao fogo das matérias primas exceto o carvão e calcáreo, o sinter será composto por:

$$\begin{aligned} \text{SINTER} &= \text{CARGAMT} + r_1 \cdot \text{CARVAOST} + (1 - U_5) \text{CALST} + \\ &\quad + r_2 (1 - U_6) \text{CALCARST} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- r_1 = teor de cinza do carvão

- r_2 = rendimento de calcáreo

II.2.2. COMPOSIÇÃO DO SINTER

Seja X_i a quantidade da matéria prima i que irá fazer parte do sinter, isto é, peso seco das cargas e cinza do carvão.

$$a\text{-SISINT} = \sum (\text{SiO}_2)_i X_i \quad (2.5)$$

$(\text{SiO}_2)_i$ = teor de SiO_2 na matéria prima i

$$L_i(\text{SiO}_2) \leq \frac{\text{SISINT}}{\text{SINTER}} \leq L_s(\text{SiO}_2) \quad (2.6)$$

$L_i(\text{SiO}_2)$, $L_s(\text{SiO}_2)$ = limite inferior e superior do teor de SiO_2 no sinter

$$b\text{- CAOST} = \sum (\text{CaO})_i X_i \quad (2.7)$$

$$L_i(\text{CaO}) \leq \frac{\text{CAOST}}{\text{SINTER}} \leq L_s(\text{CaO}) \quad (2.8)$$

Para uma dada produtividade é possível determinar a relação de dosagem de cal e calcário conhecendo a capacidade de vazão dos respectivos silos. Sejam k_3 e k_4 proporções de CaO de cal e de calcário a serem dosadas, respectivamente, para atender a um certo teor de CaO no sinter:

$$(1 - U_5) b_5 \text{ CALST} = \frac{k_3}{k_4} (1 - U_6) b_6 \text{ CALCARST}$$

$$(1 - U_5) b_5 \text{ CALST} - \frac{k_3}{k_4} (1 - U_6) b_6 \text{ CALCARST} = 0 \quad (2.9)$$

- b_5 , b_6 = teor de CaO na cal e calcário

Analogamente outros componentes do sinter podem ser restringidos:

$$c\text{- MNSINT} = \sum (\text{MnO})_i X_i \quad (2.10)$$

$$L_i(\text{MnO}) \leq \frac{\text{MNSINT}}{\text{SINTER}} \leq L_s(\text{MnO}) \quad (2.11)$$

$$d\text{- FOSST} = \sum (\text{P}_2\text{O}_5)_i X_i \quad (2.12)$$

$$L_i(\text{P}_2\text{O}_5) \leq \frac{\text{FOSST}}{\text{SINTER}} \leq L_s(\text{P}_2\text{O}_5) \quad (2.13)$$

$$e- \text{ALUMST} = \sum (Al_2O_3)_i X_i \quad (2.14)$$

$$L_i(Al_2O_3) \leq \frac{\text{ALUMST}}{\text{SINTER}} \leq L_s(Al_2O_3) \quad (2.15)$$

$$f- \text{FERROST} = \sum (Fe)_i X_i \quad (2.16)$$

$$L_i(Fe) \leq \frac{\text{FERROST}}{\text{SINTER}} \quad (2.17)$$

A distribuição de Fe nas formas FeO e Fe₂O₃ deve ser determinada estatisticamente, uma vez que esses teores não são controláveis pelo balanço material:

$$\text{FEOST} = \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}} \cdot m_1 \cdot \text{FERROST} \quad (2.18)$$

$$\text{FEO3ST} = \frac{M_{Fe_2O_3}}{M_{2Fe}} \cdot (1 - m_1) \cdot \text{FERROST} \quad (2.19)$$

- m_1 = teor de Fe do sinter na forma de FeO, determinado estatisticamente.

II.2.3. PRODUÇÃO

Como foi mencionado antes, o controle automático da velocidade da máquina de sinterizar no processo contínuo permite a manutenção da produtividade constante nas condições normais, salvo falhas eletromecânicas. Sejam p_s a produção horária (t / h) da sinterização e ΔT o horizonte do tempo de planejamento de produção dado em horas, então:

$$\text{SINTER} \leq p_s \cdot \Delta T$$

CAPÍTULO III - MODELO DO ALTO-FORNO

III.1. DESCRIÇÃO DO ALTO-FORNO

III.2. BALANÇO MATERIAL

III.3. BALANÇO TÉRMICO

III.1. DESCRIÇÃO DO ALTO-FORNO

Conforme a rápida descrição feita no capítulo I, a produção de ferro-gusa num alto-forno é um processo termo-químico no qual as matérias primas carregadas pelo topo se transformam nos seguintes produtos: gusa líquido, escória, gás do alto-forno e poeira. Tradicionalmente costuma-se caracterizar o alto-forno através da sondagem vertical da temperatura (figura 5.a) e da evolução de CO e CO₂ no interior do forno, como mostra a figura 5.b., cuja influência no processo de redução é muito importante.

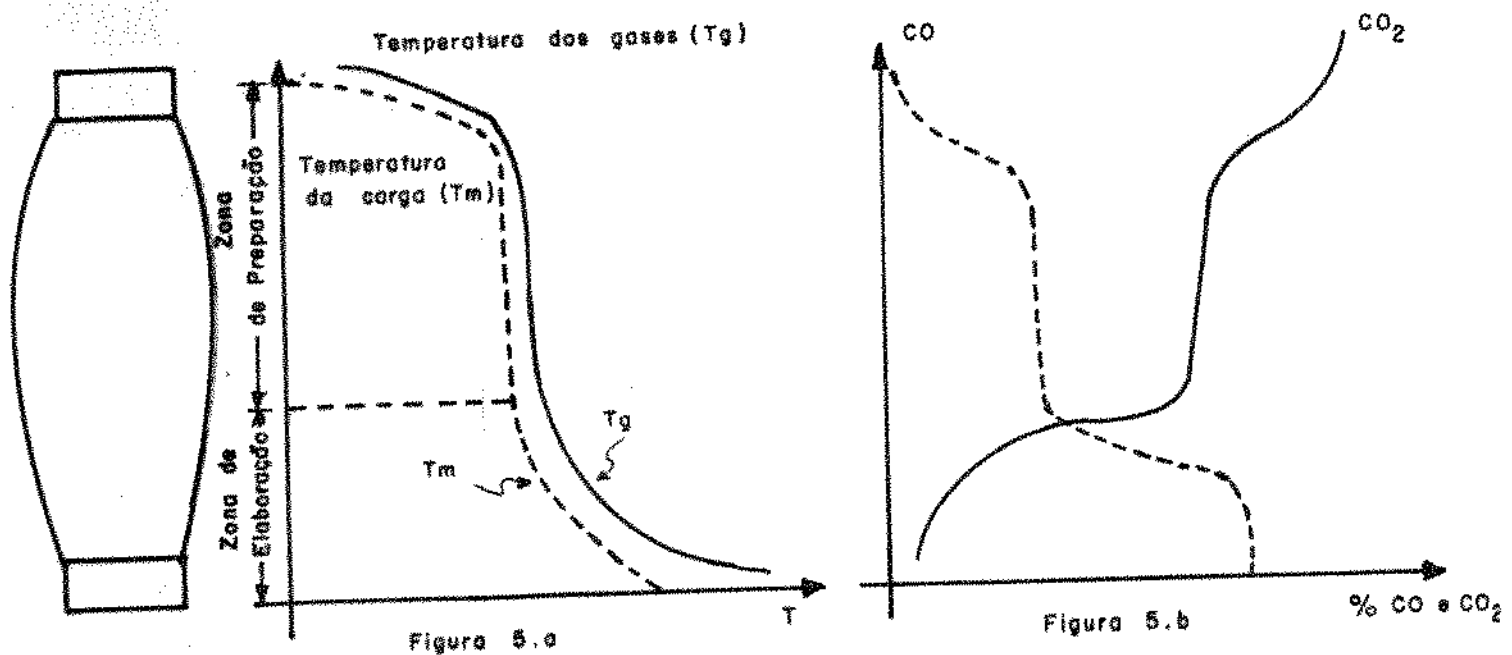


Figura 5 : Esquema do Alto Forno segundo modelo de Kitaev (a) perfil de temperatura dos gases e Sólidos (b) composição dos gases (as escalas de % de CO e % de CO₂ são diferentes)

As matérias primas, ao serem carregadas no alto-forno, entram em contato com uma corrente ascendente de gases quentes sofrendo a primeira modificação que é secagem completa. Continuando o movimento descendente, iniciam-se as primeiras reduções indiretas dos óxidos de ferro da carga, pela ação de CO em contra corrente. Com aumento da temperatura, ainda na zona de preparação, os carbonatos, CaCO_3 e MgCO_3 , são calcinados, principalmente MgCO_3 , obtendo-se CaO e MgO com liberação de CO_2 . Também nesta zona ocorre a grande parte da separação dos voláteis do carvão (CO , CO_2 e H_2). Nota-se na figura 5.a. que na região inferior da zona de preparação ocorre um equilíbrio térmico, isto é, o calor contido nos gases ascendentes mais reações exotérmicas está em equilíbrio com o aquecimento das cargas mais reações endotérmicas. As reações de elevado consumo de energia como reduções diretas de SiO_2 , MnO e P_2O_5 , carburação de gusa e regeneração de CO pela reação $\text{CO}_2 + \text{C} \longrightarrow 2 \text{CO}$, tomam lugar na zona de elaboração devido às condições térmicas favorecidas pela combustão do C dos combustíveis, com O_2 injetado através das ventaninhas. A calcinação dos carbonatos e volatilização são completadas nesta zona. Finalmente, na região inferior da zona de elaboração, chamado cadinho, obtém-se gusa líquido constituído de elementos já totalmente reduzidos com predominância absoluta de Fe. As impurezas como CaO , MgO , MnO , SiO_2 etc, formam a escória, que, devido à menor densidade em relação ao gusa, ocupa a camada superior servindo-se como trocador térmico.

Num alto-forno, quando bem operado, a grande parte dos óxidos de ferro já se encontra totalmente reduzida ao entrar na zona de elaboração, pela ação redutora de CO durante a descida da carga, produzindo como resultado CO_2 . Portanto a relação CO / CO_2 do gás do alto-forno reflete a "performance" da operação cujo valor é um parâmetro do modelo.

III.2. BALANÇO MATERIAL

Num regime estacionário, toda matéria que entra no alto-forno através das cargas, óleo e vento, deve sair pelo gás, poeira, gusa e escória, conforme figura 6.

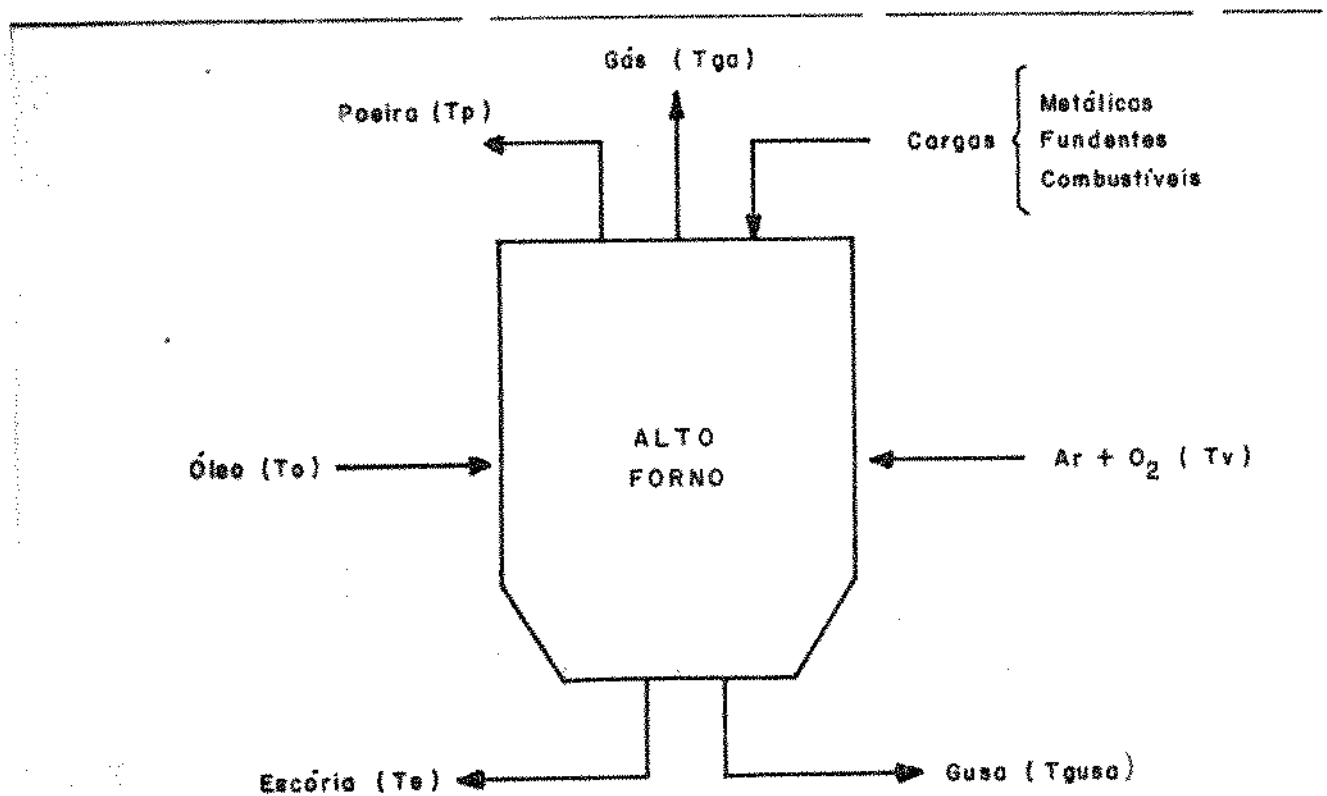


Figura 6: Esquema de fluxo de materiais no Alto Forno ;

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

ALUMIN	- Quantidade de Al_2O_3 na escória	t
AREIA	- Quantidade de areia (quartzito) enforcada	t
CACO3	- Quantidade de $CaCO_3$ enforcada	t
CALCAR	- Quantidade de calcário enforcado	t
CAOAF	- Quantidade de CaO enforcado	t
CARBOAF	- Quantidade de C que entra no alto-forno	t
CARFIN	- Quantidade de carvão fino enforcado	t
CARGAS	- Quantidade de C no gás	t
CARGRO	- Quantidade de carvão grosso enforcado	t
CARGUSA	- Quantidade de C no gusa	t
CARVAD	- Quantidade de carvão enforcado	t
CARVOL	- Quantidade de C nos voláteis	t
COVOL	- Quantidade de CO na carga	t
COVOL2	- Quantidade de CO_2 na carga	t
ESCORA	- Quantidade de escória	t
FEO	- Quantidade de FeO enforcado	t
FEO3	- Quantidade de Fe_2O_3 enforcado	t
FERED	- Quantidade de Fe no gusa	t
FEDES	- Quantidade de FeO na escória	t
FOSRED	- Quantidade de P no gusa	t
GUSA	- Quantidade de gusa produzido	t
HIDVOL	- Quantidade de H_2 dos voláteis da carga	t
HIDROG	- Quantidade de H_2 que entra no alto-forno	t
HIRED	- Quantidade de H_2 reduzido	t
MGCO3	- Quantidade de $MgCO_3$ enforcada	t
MGOAF	- Quantidade de MgO na escória	t
MNO	- Quantidade de MnO enforcado	t

MNRED	- Quantidade de Mn reduzida	t
OLEO	- Quantidade de óleo injetado	t
OXIGEN	- Quantidade de O_2 associado ao C do gás	t
PCO	- Quantidade de CO no gás	t
PCO2	- Quantidade de CO_2 no gás	t
PH2	- Quantidade de H_2 no gás	t
POS	- Quantidade de P_2O_5 enornado	t
POEIRA	- Quantidade de poeira na goela	t
SIESCOR	- Quantidade de SiO_2 na escória	t
SILIES	- Quantidade de SiO_2 enornado	t
SINTER	- Quantidade de sinter enornado	t
SIRED	- Quantidade de Si no gusa	t
UMIAR	- Quantidade de H_2O no ar	t
UMIDADE	- Quantidade de H_2O na carga	t
VO2	- Volume de O_2 enriquecido	Nm ³
VTAR	- Volume total de ar soprado	Nm ³
VTD2	- Volume total de O_2 injetado	Nm ³
VTN2	- Volume total de N_2 injetado	Nm ³

III.2.1. ENTRADA DE MATERIAIS

Seja V_i , $i = 1, 2, \dots, n$ a quantidade de matéria prima i , em peso, a ser enornado e α_i a perda pela poeira, então:

$$\beta_i = 1 - \alpha_i$$

Onde β_i é a proporção da carga i efetivamente enornada.

a. FERRO

Fe está presente nas matérias primas na forma de óxidos:
FeO e Fe_2O_3

$$\text{FeO} = \sum (\text{FeO})_i \beta_i Y_i \quad (3.1)$$

$$\text{FeO}_3 = \sum (\text{Fe}_2\text{O}_3)_i \beta_i Y_i \quad (3.2)$$

- Conforme a notação adotada os símbolos químicos $(\text{FeO})_i$ e $(\text{Fe}_2\text{O}_3)_i$ são teores de FeO e Fe_2O_3 na carga i.

b. FÓSFORO

Da mesma forma:

$$\text{PO}_5 = \sum (\text{P}_2\text{O}_5)_i \beta_i Y_i \quad (3.3)$$

c. MNO

$$\text{MNO} = \sum (\text{MnO})_i \beta_i Y_i \quad (3.4)$$

d. CaO

CaO pode entrar no alto-forno na sua forma já calcinada como no caso de sinter ou através de carbonatos (CaCO_3):

$$\text{CACO}_3 = \sum (\text{CaCO}_3)_i \beta_i Y_i \quad (3.5)$$

$$\text{CAOAF} = \frac{M_{\text{CaO}}}{M_{\text{CaCO}_3}} \cdot \text{CACO}_3 + \sum (\text{CaO})_i \beta_i Y_i \quad (3.6)$$

e. MgO

$$MgCO_3 = \sum (MgCO_3)_i \beta_i Y_i \quad (3.7)$$

$$MGOAF = \frac{M_{MgO}}{M_{MgCO_3}} \cdot MgCO_3 + \sum (MgO)_i \beta_i Y_i \quad (3.8)$$

f. Al_2O_3

$$ALUMIN = \sum (Al_2O_3)_i \beta_i Y_i \quad (3.9)$$

g. SiO_2

$$SILIES = \sum (SiO_2)_i \beta_i Y_i \quad (3.10)$$

h. UMIDADE DA CARGA

$$UMIDADE = \sum (H_2O)_i \beta_i Y_i \quad (3.11)$$

i. CARBONO: C

C pode entrar no alto-forno através de combustíveis e carbonatos:

$$COVOL = \sum (CO)_i \beta_i Y_i \quad (3.12)$$

$$COVOL2 = \sum (CO_2)_i \beta_i Y_i \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} CARVOL = & \frac{M_C}{M_{CO}} COVOL + \frac{M_C}{M_{CO_2}} COVOL2 + \frac{M_C}{M_{CaCO_3}} CaCO_3 + \\ & + \frac{M_C}{M_{MgCO_3}} MgCO_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

- Portanto CARVOL é a quantidade de C que entra através das cargas na forma de voláteis, CO e CO₂, e que irá fazer parte do gás.

$$\text{CARBOAF} = \sum (C)_i \beta_i Y_i + k \text{ OLEO} \quad (3.15)$$

- k : teor de C no óleo

J. ENTRADA DE AR ENRIQUECIDO COM O₂

É prática comum injetar O₂ puro junto com ar pelas ventaneiras no alto-forno, a fim de facilitar a combustão:

$$\text{VTO2} = a_1 \text{VTAR} + \text{VO2} \quad (3.16)$$

- a₁ : teor de O₂ no ar

$$\text{VTN2} = (1 - a_1) \text{VTAR} \quad (3.17)$$

A técnica de umedecimento do ar também pode ser utilizada para o controle da temperatura de chama:

$$\text{UMIAR} = a_2 \text{VTAR} \quad (3.18)$$

- a₂ : teor de H₂O no ar

O enriquecimento do ar pelo O₂ é limitado devido à excessiva temperatura da chama que pode danificar as ventaneiras:

% de O₂ do ar enriquecido - % de O₂ do ar = % de enriquecimento do O₂ < 1%

Ou seja:

$$\frac{a_1 \text{VTAR} + \text{VO2}}{\text{VTAR} + \text{VO2}} - a_1 \leq 0,01$$

$$\frac{(1 - a_1) \text{VO2}}{\text{VO2} + \text{VTAR}} \leq 0,01 \quad (3.19)$$

Seja C_v , capacidade máxima de vazão das ventaneiras dada em Nm^3 / h . Então para um período de produção ΔT com taxa de utilização μ_2 do alto-forno:

$$VTAR \leq C_v \cdot \Delta T \cdot \mu_2 \quad (3.20)$$

k. ENTRADA DO H_2

H_2 pode estar presente nos voláteis da carga, no óleo e na umidade do ar:

$$HIDVOL = \sum (H_2)_i \beta_i Y_i \quad (3.21)$$

$$HIDROG = h_o \text{ OLEO} + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \text{ UMIAR} + HIDVOL \quad (3.22)$$

III.2.2. SAÍDA DE MATERIAIS

a. GUSA LÍQUIDO.

O gusa líquido do alto-forno é constituído dos elementos já completamente reduzidos: Fe, P, Mn, Si e C.

$$GUSA = FERED + FOSRED + MNRED + SIRED + CARGUSA \quad (3.23)$$

Nas condições térmicas do alto-forno praticamente todos os óxidos de fósforo (P_2O_5) são reduzidos a P, incorporando-se no gusa líquido:

$$FOSRED = \frac{M_{P_2}}{M_{P_2O_5}} \cdot P_{O5} \quad (3.24)$$

O teor de Mn no gusa líquido é uma parte m do MnO efetivamente enornado cujo valor varia entre 50% a 75% de acordo com cada alto-forno, sendo portanto um parâmetro

do processo que deve ser determinado com dados estatísticos.

$$MNRED = \frac{M_{Mn}}{M_{MnO}} \cdot m \cdot MNO \quad (3.25)$$

A redução de SiO_2 é fortemente endotérmica, portanto ela só ocorre em pequena escala nas circunstâncias especiais com alto consumo de C, consequentemente do carvão. Como a capacidade do sistema de carregamento é limitada tal aumento de consumo de carvão ocorre à custa de menor carregamento de carga metálica, que efetivamente se transforma em ferro-gusa. Por outro lado o Si no gusa propicia a condição térmica da aciaria, como será visto no capítulo IV, sendo portanto uma variável a ser otimizada.

A quase totalidade dos óxidos de ferro é reduzida formando-se ferro-gusa e uma pequena parte é desviada para escória na forma de FeO :

$$FERED = \frac{M_{Fe}}{M_{FeO}} \cdot FEO + \frac{M_{Fe_2}}{M_{Fe_2O_3}} \cdot FEO_3 - FEDES \cdot \frac{M_{Fe}}{M_{FeO}} \quad (3.26)$$

A incorporação de C no gusa é um processo ainda pouco conhecido, no entanto, sabe-se que ela tende a atingir o carbono de saturação cuja relação é conhecida segundo a ref.(7). Portanto, com razoável precisão, o CARGUSA pode ser considerado como carbono de saturação para uma dada temperatura de gusa líquido:

$$CARGUSA = (1,3 \cdot 10^{-2} + 2,57 \cdot 10^{-5} \cdot T_{gusa}) \cdot GUSA + 0,03 MNRED - 0,3 SIRED - 0,35 FOSRED \quad (3.27)$$

onde T_{gusa} = temperatura de gusa líquido em °C.

O enxofre (S) cuja presença no gusa líquido é de grande importância nos altos-fornos que utilizam carvão mineral, pode ser negligenciado quando se trata de carvão vegetal, pois o seu teor no gusa neste caso é insignificante.

A presença das impurezas, P, Mn e Si deve ser restringida dentro das respectivas faixas operacionais:

$$\text{Mínimo} \leq \frac{\text{FOSRED}}{\text{GUSA}} \leq \text{Máximo} \quad (3.28)$$

$$\text{Mínimo} \leq \frac{\text{MNRED}}{\text{GUSA}} \leq \text{Máximo} \quad (3.29)$$

$$\text{Mínimo} \leq \frac{\text{SIRED}}{\text{GUSA}} \leq \text{Máximo} \quad (3.30)$$

b. ESCÓRIA

A escória resulta da fusão do material inerte (ganga) do sinter, fundentes e das cinzas do carvão, que, chegando às zonas mais quentes do forno (região das ventaneiras) reagem entre si. A escória é constituída principalmente dos seguintes componentes: Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , MnO e FeO .

$$\begin{aligned} \text{ESCORA} = & \text{CADA} + \text{SIESCOR} + \text{MGDA} + \text{ALUMIN} + \text{FEDES} + \\ & + \text{MNO} - \frac{M_{\text{MnO}}}{M_{\text{Mn}}} \text{MNRED} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Como foi dito antes uma parte de SiO_2 enfiado se reduz incorporando-se no gusa líquido:

$$\text{SIESCOR} = \text{SILIES} - \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{Si}}} \text{SIREO} \quad (3.32)$$

A presença de FeO na escória é pequena e pode ser considerada numa proporção fixa, para uma dada temperatura de gusa e escória:

$$\text{pESCORA} - \text{FEDES} = 0 \quad (3.33)$$

p = teor de FeO na escória

Uma das propriedades mais importantes da escória é a sua fluidez. Uma escória espessa, muito viscosa, dificulta a operação do alto-forno, agarrando-se ao revestimento interno. Esta fluidez é representada pela basicidade cuja relação $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$ é restringida dentro de uma faixa opera-

cional:

$$\text{Mínimo} \leq \frac{\text{CAOAF}}{\text{SIESCOR}} \leq \text{Máximo} \quad (3.34)$$

A quantidade de escória é uma outra variável com grande influência na operação do alto-forno, que deve ser limitada em relação a gusa:

$$\text{Mínimo} \leq \frac{\text{ESCORIA}}{\text{GUSA}} \leq \text{Máximo} \quad (3.35)$$

c. POEIRA

Uma pequena parte das matérias primas enforadas é arrasada pelos gases ascendentes que abandonam o alto-forno. Naturalmente a proporção de uma determinada carga na poeira depende da sua densidade:

$$\text{POEIRA} = \sum \alpha_i Y_i \quad (3.36)$$

d. GÁS DO ALTO-FORNO

O gás ao deixar o alto-forno é constituído basicamente de CO , CO_2 , N_2 , H_2 e H_2O . Segundo Penna (12) podem existir 2 situações no balanço de H_2 : $\Delta(\text{H}_2) > 0$ ou $\Delta(\text{H}_2) < 0$, onde $\Delta(\text{H}_2) = \text{H}_2 \text{ no gás (PH}_2) - \text{H}_2 \text{ que entrou no alto-forno (HIDROG)}$:

$\Delta(\text{H}_2) > 0 \longrightarrow$ houve uma redução da água:



$\Delta(\text{H}_2) < 0 \longrightarrow$ houve formação da água:



Seja $|\Delta(\text{H}_2)| = \text{HIRED}$, então H_2 no gás (PH_2) será:

$$\text{PH}_2 = \text{HIDROG} \pm \text{HIRED} \quad \text{e} \quad (3.37)$$

$$\frac{\text{HIRED}}{\text{HIDROG}} = r_n \longrightarrow \text{HIRED} - r_n \text{ HIDROG} = 0 \quad (3.38)$$

onde r_n é um parâmetro da operação do alto-forno significando o rendimento da redução.

Balanço de C - O no gás do alto-forno

Todo O_2 que entra no alto-forno sairá através do gás exceto a parcela que vai para escória. Como será visto mais adiante no Balanço Térmico, o O_2 do gás associado ao C é oriundo das seguintes fontes:

$\text{OXIGEN} = \text{O}_2 \text{ do ar enriquecido} + \text{O}_2 \text{ liberado pelos óxidos ferrosos nas reduções indiretas} + \text{O}_2 \text{ liberado pelos óxidos não ferrosos nas reduções diretas} + \text{O}_2 \text{ dos CO e CO}_2 \text{ das cargas} + \text{O}_2 \text{ liberado pe}$

la umidade do ar durante a redução direta - O_2
para formação de FeO da escória $\pm$ resultado do
balanço de H_2 .

$$\begin{aligned}
 \text{OXIGEN} = & \frac{M_{O_2}}{22,4 \cdot 10^3} V_{TO2} + \frac{3}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{Fe_2O_3}} FE03 + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{FeO}} \\
 & FE0 + \frac{M_{O_2}}{M_{Si}} SIRED + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{Mn}} MNRED + \\
 & + \frac{5}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{P_2}} FOSRED + \frac{M_{O_2}}{M_{CaCO_3}} CACO3 + \\
 & + \frac{M_{O_2}}{M_{MgCO_3}} MGCO3 + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{CO}} COVOL + \\
 & + \frac{M_{O_2}}{M_{CO_2}} COVOL2 + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2O}} UMIAR - \\
 & - \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{FeO}} FE0ES + \frac{1}{2} \frac{M_{O_2}}{M_{H_2}} (PH2 - HIDROG)
 \end{aligned}$$

(3.39)

OBS.: Nas condições normais 1 k mol de gás ocupa $22,4 \text{ Nm}^3$
de volume.

O carbono presente no gás é a diferença entre o que entrou
no alto-forno e o carbono no gusa:

$$\text{CARGAS} = \text{CARBOAF} + \text{CARVOL} - \text{CARGUSA} \quad (3.40)$$

Como foi mencionado no início do capítulo, a relação entre os volumes de CO e CO₂ no gás reflete a "performance" operacional do forno, sendo portanto um parâmetro que deve ser obtido a partir dos dados históricos ou experimentalmente. Seja:

$$\frac{\text{Volume de CO}}{\text{Volume de CO}_2} = \gamma_{AF}$$

Sabe-se que nas condições normais de temperatura e pressão 1 kmol de um gás ocupa 22,4 Nm³ de volume; portanto a expressão acima pode ser transformada em:

$$\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}} = \frac{n_{CO}}{n_{CO_2}} \gamma_{AF} \longrightarrow \frac{P_{CO} \cdot n_{CO_2}}{P_{CO_2} \cdot n_{CO}} = \gamma_{AF}$$

Ou alternativamente:

$$\frac{\text{CARGAS}}{\text{OXIGEN}} = \frac{\frac{n_C}{n_{CO}} \cdot P_{CO} + \frac{n_C}{n_{CO_2}} \cdot P_{CO_2}}{\frac{n_C}{n_{CO}} \cdot P_{CO} + \frac{2 n_O}{n_{CO_2}} \cdot P_{CO_2}}$$

$$= \frac{n_C (n_{CO_2} P_{CO} + n_{CO} P_{CO_2})}{n_O (n_{CO_2} P_{CO} + 2 n_{CO} P_{CO_2})}$$

Fazendo $n_C = 12$, $n_O = 16$

$$\frac{n_{CO_2} P_{CO} + n_{CO} P_{CO_2}}{n_{CO_2} P_{CO} + 2 n_{CO} P_{CO_2}} = \frac{\frac{n_{CO_2} P_{CO}}{n_{CO} P_{CO_2}} + 1}{\frac{n_{CO_2} P_{CO}}{n_{CO} P_{CO_2}} + 2}$$

tem-se:

$$\frac{\text{CARGAS}}{\text{OXIGEN}} = \frac{(\lambda_M + 1) H_C}{(\lambda_M + 2) H_O} = \frac{(\lambda_M + 1) 12}{(\lambda_M + 2) 16} \quad (3.41)$$

III.2.3. RESTRIÇÕES DE CARREGAMENTO

Para uma produção de gusa líquido num dado período ΔT , podem existir restrições de disponibilidade de matérias primas. Expressando de forma genérica tais restrições:

$$Y_i \leq D_i$$

Ou ainda pode existir a limitação quanto à capacidade de carregamento do alto-forno:

$$\sum Y_i \leq \text{Capacidade de carregamento}$$

Sejam C_{AF} - Capacidade em peso do equipamento de transporte de carga do silo ao alto-forno: belão ou "skip"

ΔT - Período de produção

h_{AF} - ciclo de operação de transporte.

Então:

$$\sum Y_i \leq \frac{C_{AF} \cdot \Delta T}{h_{AF}} \quad (3.42)$$

As proporções das matérias primas também podem ser relacionadas, caso existirem. Um exemplo típico é o enformamento proporcional do carvão grosso e fino, devido às diferentes características físico-químicas que influem

na operação do alto-forno:

$$\frac{\text{CARGO}}{\text{CARVÃO}} \geq q_1 \quad (3.43)$$

$$\frac{\text{CARFIN}}{\text{CARVÃO}} \geq q_2 \quad (3.44)$$

$$\text{CARGO} + \text{CARFIN} = \text{CARVÃO} \quad (3.45)$$

III.3. BALANÇO TÉRMICO DO ALTO-FORNO

O balanço térmico baseia-se no princípio de conservação da energia, isto é, uma contabilização das quantidades de calor nas entradas e saídas cujos totais devem ser iguais, a menos das perdas. Conforme a figura 7 o esquema clássico de balanço térmico consiste em passar do estado inicial (I) ao estado final (II) através do caminho (I) $\rightarrow$ (I') $\rightarrow$ (II') $\rightarrow$ (II), tomando uma temperatura de referência T_r . Os dados termodinâmicos são normalmente tabelados considerando T_r como temperatura ambiente, 25°C ou 298°K (ANEXO I).

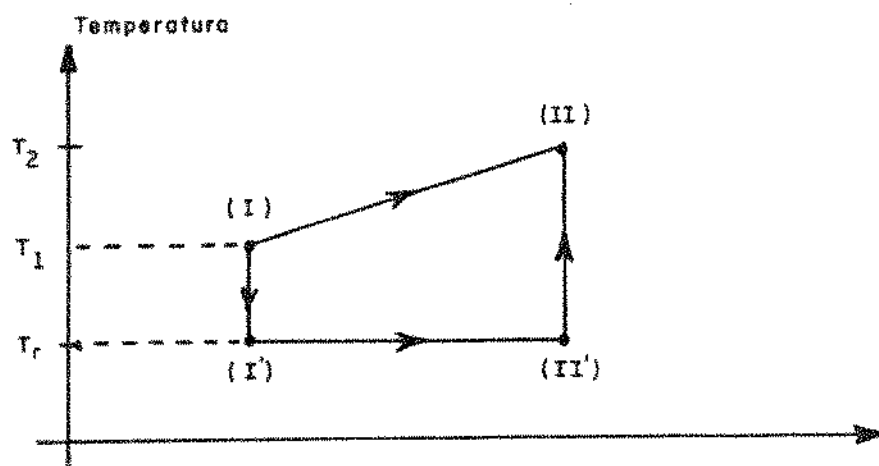


Figura 7 ; Esquema de balanço térmico

Inicialmente na fase (I) $\longrightarrow$ (I') são computadas as entalpias , calores contidos, dos elementos que entram no alto-forno. Em seguida os calores gerados e consumidos nas transformações físico-químicas são contabilizados na fase (I') $\longrightarrow$ (II') e finalmente as entalpias dos produtos nas respectivas temperaturas são determinadas na fase (II') $\longrightarrow$ (II). Portanto o balanço térmico se traduz na prática pela equação:

Entalpia do sistema no estado final (II) + variação da entalpia entre (I') $\longrightarrow$ (II') + perdas térmicas - Entalpia do sistema no estado inicial (I) = 0

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

CALVENT	- Entalpia do ar	th
CALOLED	- Entalpia do óleo	th
COMB	- Calor gerado da reação $\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	th
CALFE3	- Calor gerado na redução indireta de Fe_2O_3	th
CALFE	- Calor gerado na redução indireta de FeO	th
CALESCOR	- Calor de formação da escória	th
CALRED	- Calor de redução da água pelo CO	th
CALFORAF	- Calor fornecido	th
CALCRAQ	- Calor de craqueamento do óleo	th
CALUM	- Calor de redução da água pelo C	th
CALSI	- Calor de redução de SiO_2	th
CALMN	- Calor de redução de MnO	th
CALFDS	- Calor de redução de P_2O_5	th
CALGANG	- Calor de redução de gangas	th
CALREG	- Calor de regeneração de CO	th
CAREG	- Quantidade de C consumido na regeneração	t
CALHO	- Calor de reação de gás à água de CO	th
CALCARB	- Calor de decomposição de carbonatos	th

CALCO3	- Calor de decomposição de CaCO_3	th
CALMG	- Calor de decomposição de MgCO_3	th
CALCA	- Calor de carburação do gusa	th
CALVAP	- Calor de vaporização da umidade	th
CALGUSA	- Entalpia do gusa líquido	th
CALESCO	- Entalpia da escória	th
CALPOER	- Entalpia da poeira	th
CALGAS	- Entalpia do gás	th
CALCONS	- Calor consumido	th
CALPERAF	- Calor perdido	th

O esquema de balanço térmico do alto-forno a seguir é baseado na ref.(12) por se tratar de um caso já aplicado num alto-forno a carvão vegetal na Usina de Monlevade.

ENTRADA DE CALOR	CONSUMO DE CALOR
. Entalpia do ar úmido	. "Cracking" de óleo
. Entalpia do óleo	. Redução da umidade do ar
. Combustão: $\text{C} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	. Calor de regeneração: $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$
. Reduções indiretas dos óxidos de ferro	. Redução direta dos óxidos não ferrosos
. Calor de formação da escória	. Decomposição de carbonatos
. $\Delta(\text{H}_2) > 0 \rightarrow$ calor de redução de água:	. Carburação do gusa
$\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	. Vaporização da umidade da carga
	. $\Delta(\text{H}_2) < 0 \rightarrow$ calor de reação do gás à água: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$
	. Entalpia do gusa
	. Entalpia da escória
	. Entalpia do gás
	. Entalpia da poeira

III.3.1. ENTRADA DE CALOR

a. ENTALPIA DO AR ÚMIDO: CALVENT

$$\begin{aligned} \text{CALVENT} = & (H_{T_v} - H_{298})_{O_2} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{22,4} \text{VT02} + (H_{T_v} - \\ & - H_{298})_{N_2} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{22,4} \text{VTN2} + (H_{T_v} - H_{298})_{H_2O} \cdot \\ & \cdot \frac{1}{18} \text{UMIAR} \end{aligned} \quad (3.46)$$

T_v : temperatura do ar em $^{\circ}\text{K}$

Conforme a notação adotada $(H_{T_v} - H_{298})_{O_2}$ representa a entalpia de O_2 , na temperatura T_v , dada em cal / mol ou Kcal / Kmol ou th / 10^3 Kmol, etc. Como foram adotadas, por convenção, a unidade de calor em th (10^6 calorias), unidade de volume de ar em Nm^3 e peso em t, é necessário fazer alguns ajustes de forma conveniente. Por exemplo, na primeira parcela da equação (3.46) VT02 é dada em Nm^3 , portanto $\frac{\text{VT02}}{22,4}$ representa kmol de O_2 do ar nas condições normais. Multiplicando a expressão

$$(H_{T_v} - H_{298})_{O_2} \cdot \frac{\text{VT02}}{22,4} \text{ por } 10^{-3} \text{ obtem-se finalmente a en}$$

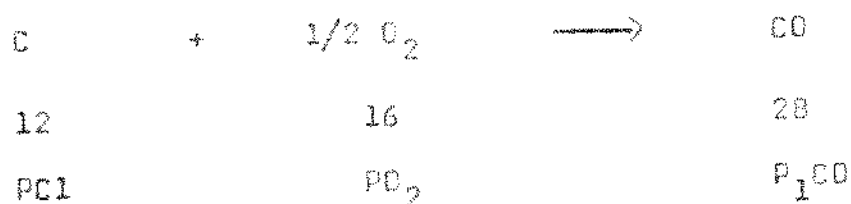
talpia de O_2 do ar em th , na temperatura T_v . O cálculo da entalpia de N_2 do ar é similar do O_2 . Na terceira parcela da equação, a unidade do ar (UMIAR) é dada em t, portanto dividindo UMIAR por mol de H_2O (18) obtem-se 10^3 kmol de H_2O , que multiplicada por $(H_{T_v} - H_{298})_{H_2O}$ fornece a entalpia da unidade do ar em th . Tais ajustes de unidades são utilizados nos demais cálculos de entalpia a seguir.

b. ENTALPIA DO ÓLEO: CALOLEO

$$\text{CALOLEO} = [(H_{T_o} - H_{298})_C \cdot \frac{1}{12} (C)_{\text{oleo}} + (H_{T_o} - H_{298})_{H_2} \cdot \frac{1}{2} (H_2)_{\text{oleo}}] \text{OLEO}$$

T_o : temperatura de óleo em $^{\circ}\text{K}$

c. COMBUSTÃO DE $C \longrightarrow CO$: COMB



Um mol de CO (28) é obtido a partir da reação de um mol de C (12) com meio mol de O_2 (16). Sabendo o peso de O_2 envolvido na reação pela relação: $PO_2 = \frac{32}{22,4} \text{ VT}O_2$, o consumo de C (PC_1) e a geração de CO (P_1CO) podem ser obtidos pelo cálculo estequiométrico:

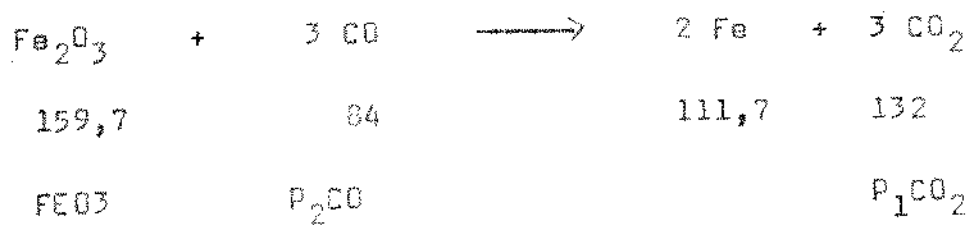
$$PC_1 = \frac{12}{16} PO_2 ; P_1CO = \frac{28}{16} PO_2$$

O calor envolvido na reação é o resultado da diferença entre o calor de reação ou de formação (ΔH_{298}) dos produtos e reagentes. Quando esta diferença for positiva, a reação é dita exotérmica e caso contrário, endotérmica:

$$\text{COMB} = P_1CO (\Delta H_{298})_{CO} \cdot \frac{1}{28}$$

$$\text{COMB} = 2,35857 \cdot \text{VT}O_2 \quad \text{th}$$

d. REDUÇÃO INDIRETA DE Fe_2O_3 : CALFE3



$$\text{P}_2\text{CO} = \frac{84}{159,7} \text{ FEO3} \quad , \quad \text{P}_1\text{CO}_2 = \frac{132}{159,7} \text{ FEO3}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALFE3} = & \text{P}_1\text{CO}_2 \cdot (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot \frac{1}{44} - \text{P}_2\text{CO} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot \\
 & \cdot \frac{1}{28} - (\Delta H_{298})_{\text{Fe}_2\text{O}_3} \cdot \frac{1}{159,7} \cdot \text{FEO3}
 \end{aligned}$$

$$\text{CALFE3} = 42,00375 \text{ FEO3} \quad \text{th}$$

e. REDUÇÃO INDIRETA DE FeO : CALFE



$$\text{P}_3\text{CO} = \frac{28}{71,85} (\text{FEO} - \text{FEDES}) \quad , \quad \text{P}_2\text{CO}_2 = \frac{44}{71,85} (\text{FEO} - \text{FEDES})$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALFE} = & \text{P}_2\text{CO}_2 \cdot (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot 1/44 - \text{P}_3\text{CO} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot \\
 & \cdot 1/28 - (\Delta H_{298})_{\text{FeO}} \cdot 1/71,85 (\text{FEO} - \text{FEDES})
 \end{aligned}$$

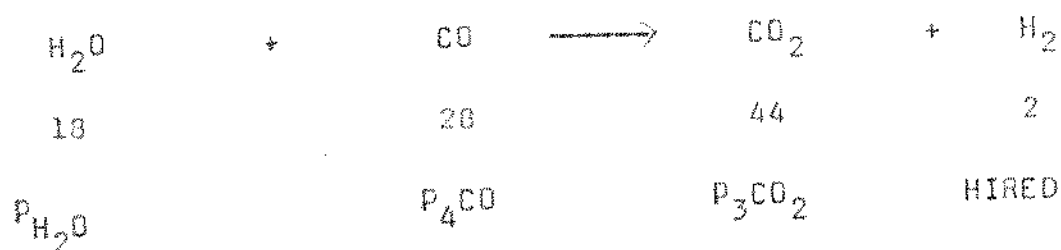
$$\text{CALFE} = 57,564 (\text{FEO} - \text{FEDES}) \quad \text{th}$$

f. CALOR DE FORMAÇÃO DA ESCÓRIA: CALESCOR

A ref. (12) menciona esse calor sendo proporcional à presença de SiO_2

$$\text{CALESCOR} = 125,0 \text{ SIESCOR} \quad \text{th}$$

g. CALOR DE REDUÇÃO DA ÁGUA: CALRED, para $\Delta(\text{H}_2) > 0$



$$P_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{2} \text{ HIRED}, \quad P_4\text{CO} = \frac{28}{2} \text{ HIRED}, \quad P_3\text{CO}_2 = \frac{44}{2} \text{ HIRED}$$

$$\begin{aligned} \text{CALRED} = & P_3\text{CO}_2 \cdot (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot 1/44 - P_4\text{CO} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \\ & \cdot 1/28 - P_{\text{H}_2\text{O}} (\Delta H_{298})_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1/18 \end{aligned}$$

$$\text{CALRED} = 4919 \text{ HIRED} \quad \text{th}$$

Portanto o calor fornecido total será:

$$\begin{aligned} \text{CALFORAF} = & \text{CALVENT} + \text{CALOLEO} + \text{COMB} + \text{CALFE3} + \text{CALFE} + \\ & + \text{CALESCOR} + \text{CALRED} \end{aligned} \quad (3.47)$$

III.3.2. SAÍDA DE CALOR

a. "CRACKING" DO ÓLEO

Segundo a ref. (12) o calor necessário para o craqueamento de óleo combustível é 350 Kcal/Kg:

$$\text{CALCRAQ} = 350,0 \text{ OLEO} \quad \text{th}$$

b. REDUÇÃO DE H_2O DO AR: CALUM



$$PC_2 = \frac{12}{18} UMIAR, \quad P_5CO = \frac{28}{18} UMIAR, \quad PH_1 = \frac{2}{18} UMIAR$$

$$\begin{aligned}
 CALUM &= P_5CO (\Delta H_{298})_{CO} \cdot 1/28 - UMIAR \cdot (\Delta H_{298})_{H_2O} \cdot \\
 &\quad \cdot 1/18
 \end{aligned}$$

$$CALUM = 1743,44 \quad UMIAR \quad th$$

c. REDUÇÃO DIRETA DOS ÓXIDOS NÃO FERROSOS: CALGANG

(i) Redução de SiO_2 : CALSI



$$PC_3 = \frac{24}{28,09} SIRED, \quad P_6CO = \frac{56}{28,09} SIRED$$

$$\begin{aligned}
 CALSI &= P_6CO \cdot (\Delta H_{298})_{CO} \cdot 1/28 - X(\Delta H_{298})_{SiO_2} \cdot \\
 &\quad \cdot 1/60,09
 \end{aligned}$$

$$CALS I = 5586,26 \quad SIRED \quad th$$

(ii) Redução de MnO: CALMN



$$\text{PC}_4 = \frac{12}{54,94} \text{ MNRED} \quad , \quad \text{P}_7\text{CO} = \frac{28}{54,94} \text{ MNRED}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALMN} &= \text{P}_7\text{CO} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot 1/28 - X \cdot (\Delta H_{298})_{\text{MnO}} \cdot \\
 &\quad \cdot 1/70,94
 \end{aligned}$$

$$\text{CALMN} = 1194,65 \text{ MNRED} \quad \text{th}$$

(iii) Redução de P₂O₅: CALFOS



$$\text{PC}_5 = \frac{60}{61,95} \text{ FOSRED} \quad , \quad \text{P}_8\text{CO} = \frac{140}{61,95} \text{ FOSRED}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALFOS} &= \text{P}_8\text{CO} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot 1/28 - X \cdot (\Delta H_{298})_{\text{P}_2\text{O}_5} \cdot \\
 &\quad \cdot 1/141,95
 \end{aligned}$$

$$\text{CALFOS} = 3544,31 \text{ FOSRED} \quad \text{th}$$

$$\therefore \text{CALGANG} = \text{CALSI} + \text{CALMN} + \text{CALFOS}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALGANG} &= 5586,26 \text{ SIRED} + 1194,65 \text{ MNRED} + \\
 &\quad + 3544,31 \text{ FOSRED} \quad (3.48)
 \end{aligned}$$

d. CALOR DE REGENERAÇÃO $\text{CO}_2 \longrightarrow \text{CO}$: CALREG

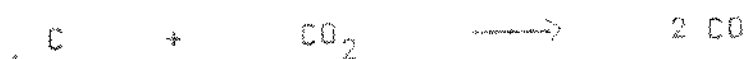
C envolvido nesta reação será o restante do C dos combustíveis após as reações diretas e carburação do gusa, isto é:

$$\text{CAREG} = \text{CARBOAF} - \text{CARGUSA} - \text{PC}_1 - \text{PC}_2 - \text{PC}_3 - \text{PC}_4 - \text{PC}_5$$

$$\text{CAREG} = \text{CARBOAF} - \text{CARGUSA} - \frac{12}{16} \left(\frac{32}{22,4} \text{VTO2} \cdot 10^{-3} \right) -$$

$$- \frac{12}{18} \text{UNIAR} - \frac{24}{28,09} \text{SIRED} - \frac{12}{54,94} \text{MNRED} - \frac{60}{61,95}$$

$$\text{FOSRED} \quad (3.49)$$



$$\begin{array}{ccc} 12 & 44 & 56 \end{array}$$

$$\text{CAREG} \quad \text{P}_4 \text{CO}_2 \quad \text{P}_9 \text{CO}$$

$$\text{P}_4 \text{CO}_2 = \frac{44}{12} \text{CAREG}, \quad \text{P}_9 \text{CO} = \frac{56}{12} \text{CAREG}$$

$$\text{CALREG} = \text{P}_9 \text{CO} \cdot (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot 1/28 - \text{P}_4 \text{CO}_2 (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot 1/44$$

$$\text{CALREG} = 3435,0 \text{ CAREG th}$$

e. CALOR DE REAÇÃO DO GÁS A ÁGUA: $\text{CALHD}, \Delta(\text{H}_2) < 0$



$$\begin{array}{ccc} 44 & 2 & 20 \quad 18 \end{array}$$

$$\text{P}_5 \text{CO}_2 \quad \text{HIRED} \quad \text{P}_{10} \text{CO} \quad \text{P}_{\text{H}_2\text{O}}$$

$$\text{P}_5 \text{CO}_2 = \frac{44}{2} \text{HIRED}, \quad \text{P}_{10} \text{CO} = \frac{20}{2} \text{HIRED}, \quad \text{P}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{2} \text{HIRED}$$

$$CALHO = P_{H_2O} (\Delta H_{298})_{H_2O} \cdot 1/18 + P_{10CO} (\Delta H_{298}) \cdot$$

$$\cdot 1/28 - P_{5CO_2} (\Delta H_{298})_{CO_2} \cdot 1/44$$

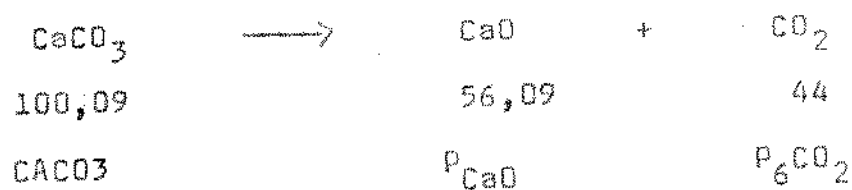
$$CALHO = 4919 \text{ HIRED} \quad \text{th}$$

f. DECOMPOSIÇÃO DE CARBONATOS: CALCAB

Dois tipos de carbonatos são enfeados no alto-forno:

$CaCO_3$ e $MgCO_3$

(i) Decomposição de $CaCO_3$: CALCO3



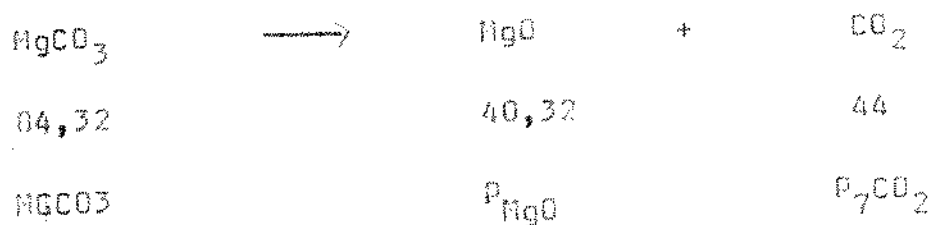
$$P_{CaO} = \frac{56,09}{100,09} CACO3, \quad P_{CO_2} = \frac{44}{100,09} CACO3$$

$$CALCO3 = P_{CO_2} (\Delta H_{298})_{CO_2} \cdot \frac{1}{44} + P_{CaO} (\Delta H_{298})_{CaO} \cdot$$

$$\cdot 1/56,09 - (\Delta H_{298})_{CaCO_3} \cdot CACO3 \cdot 1/100,09$$

$$CALCO3 = 427,095 \text{ CACO3} \quad \text{th}$$

(ii) Decomposição de $MgCO_3$: CALMG



$$P_{HgO} = \frac{40,32}{84,32} \text{ MgCO}_3, \quad P_{CO_2} = \frac{44}{84,32} \text{ MgCO}_3$$

$$\begin{aligned} \text{CALMG} &= P_{CO_2} (\Delta H_{298})_{CO_2} \cdot 1/44 + P_{HgO} (\Delta H_{298})_{HgO} \cdot \\ &\cdot 1/40,32 - \text{MgCO}_3 (\Delta H_{298})_{MgCO_3} \cdot 1/84,32 \end{aligned}$$

$$\text{CALMG} = 287,534 \text{ MgCO}_3 \quad \text{th}$$

$$\therefore \text{CALCARB} = 427,095 \text{ CaCO}_3 + 287,534 \text{ MgCO}_3 \quad \text{th}$$

g. CALOR DE CARBURAÇÃO DO GUSA : CALCA

Segundo a ref.(12) o calor necessário para carburação do gusa é de 430 Kcal/Kg de C:

$$\text{CALCA} = 430,0 \text{ CARGUSA} \quad \text{th}$$

h. VAPORIZAÇÃO DA UNIDADE DA CARGA: CALVAP

O calor necessário para vaporização da água é de 9,820 Kcal/M_{H₂O}:

$$\text{CALVAP} = 545,55 \text{ UNIDADE} \quad \text{th}$$

i. ENTALPIA DO GUSA : CALGUSA

Adotando o calor específico do gusa, $C_{\text{gusa}} = 0,165$ e o calor de fusão = 70 Kcal/Kg gusa:

$$\text{CALGUSA} = [70 + 0,165 (T_{\text{gusa}} - 25)] \text{ GUSA} \quad \text{th}$$

T_{gusa} : temperatura do gusa líquido em °C

J. ENTALPIA DA ESCÓRIA: CALESCO

Adotando-se a fórmula empírica de Pavlov:

$$\text{CALESCO} = [347 + 0,5 (T_e - 1300)] \text{ ESCORAF} \quad \text{th}$$

para temperatura da escória: $T_e < 1450^\circ\text{C}$

$$\text{CALESCO} = [422,5 + 0,4 (T_e - 1450)] \text{ ESCORAF} \quad \text{th}$$

para $T_e > 1450^\circ\text{C}$

K. ENTALPIA DA POEIRA: CALPOER

Sendo T_p a temperatura da poeira em $^\circ\text{C}$ e o calor específico da poeira $C_{\text{poeira}} = 0,2 \text{ Kcal/}^\circ\text{C/Kg}$:

$$\text{CALPOER} = 0,2 \cdot T_p \cdot \text{POEIRA} \quad \text{th}$$

L. ENTALPIA DO GÁS: CALGAS

Assumindo que no gás do alto-forno estejam presentes apenas CO , CO_2 , H_2 , N_2 e H_2O tem-se:

$$\begin{aligned} \text{CALGAS} = & [(H_{T_{\text{gas}}} - H_{298})_{\text{CO}} \cdot \text{PCO} \cdot 1/28 + (H_{T_{\text{gas}}} - H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot \\ & \cdot \text{PCO}_2 \cdot 1/44 + (H_{T_{\text{gas}}} - H_{298})_{\text{H}_2} \cdot \text{PH}_2 \cdot 1/2 + \\ & + (H_{T_{\text{gas}}} - H_{298})_{\text{N}_2} \cdot \text{VTN}_2 \cdot 1/22,4 \cdot 10^3 + (H_{T_{\text{gas}}} - \\ & - H_{298})_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\text{UMIDADE} \pm \frac{18}{2} \text{ HIRED}) \cdot 1/18 \\ & \quad \quad \quad (3.50) \end{aligned}$$

T_{gas} : temperatura do gás em $^\circ\text{K}$

$$PCO = P_1CO + P_5CO + P_6CO + P_7CO + P_8CO + P_9CO + P_{10}CO - \\ - P_2CO - P_3CO - P_4CO + COVOL$$

$$PCO = \frac{56}{22,4 \cdot 10^3} VTO2 + \frac{28}{18} UNIAR + \frac{56}{28,09} SIRED + \frac{28}{54,94} MNRED + \\ + \frac{140}{61,95} FOSRED + \frac{56}{12} CAREG + \frac{28}{2} HIRED - \\ - \frac{84}{159,7} FED3 - \frac{28}{71,85} (FED - FEDES) + COVOL \quad (3.51)$$

$$PCO2 = P_1CO_2 + P_2CO_2 + P_3CO_2 + P_6CO_2 + P_7CO_2 - P_4CO_2 - \\ - P_5CO_2 + COVOL2$$

$$PCO2 = \frac{132}{159,7} FED3 + \frac{44}{71,85} (FED - FEDES) + \frac{44}{2} HIRED + \\ + \frac{44}{100,09} CACO3 + \frac{44}{84,32} MGCD3 - \frac{44}{12} CAREG \\ + COVOL2 \quad (3.52)$$

Portanto a necessidade calorífica total em th será:

$$CALCONS = CALCRAQ + CALUM + CALGANG + CALREG + CALHO + \\ + CALCARB + CALCA + CALVAP + CALCUSA + CALESCO + \\ + CALPOER + CALGAS \quad th$$

$$CALCONS = 350,0 \cdot OLEO + 1743,44 UNIAR + CALGANG + 3435,0 \\ CAREG + 4919,0 HIRED + 427,095 CACO3 + 287,534 \\ MGCD3 + 430,0 CARCUSA + 545,55 UNIDADE + CALCUSA + \\ + CALESCO + CALPOER + CALGAS \quad th \quad (3.53)$$

A perda de calor pelo sistema de refrigeração depende das características físicas de cada alto-forno, portanto deve ser determinada experimentalmente. A ref.(4) sugere a estimação desse valor medindo-se a temperatura da água de refrigeração.

$$\text{CALPERAF} = \text{CALFORAF} - \text{CALCONS}$$

(3.54)

CAPÍTULO IV - MODELO DA ACIARIA LD

IV.1. DESCRIÇÃO DA ACIARIA LD

IV.2. BALANÇO MATERIAL

IV.3. BALANÇO TÉRMICO

IV.1. DESCRIÇÃO DA ACIARIA LD

A fabricação do aço é um processo de refino no qual as impurezas do gusa são oxidadas incorporando-se à escória. No processo de sopragem a oxigênio, tipo LD, as cargas metálicas como gusa líquido e sucatas de aço são inicialmente carregadas num forno de formato cilíndrico, chamado de convertedor, numa posição inclinada. A seguir este é colocado em posição vertical e começa o sopro de oxigênio puro através da lança introduzida verticalmente em relação à boca do convertedor. Na zona de impacto do jato de oxigênio, a reação com metal líquido é violenta e imediata, resultando uma enérgica movimentação do banho. Devido ao excesso de oxigênio, nesta fase inicial de sopro, a escória rica em FeO é rapidamente formada, junto com descarburção acelerada do gusa, seguindo-se as oxidações dos outros elementos como Si, Mn e P. Do ponto de vista térmico a metalurgia do aço pode ser considerada como inversa da metalurgia de gusa líquido, isto é, os elementos incorporados ao gusa no alto-forno através das reduções fortemente endotérmicas são agora oxidados liberando o calor. Além do calor contido no gusa líquido, as reações de C e Si do gusa com oxigênio, formando CO e SiO_2 , são as principais fontes de calor necessário ao processo.

Devido à rapidez do processo e pela sua característica violenta, uma parte considerável de materiais é arrastada pela fumaça com a presença predominante de CO .

O atendimento às especificações metalúrgicas do aço líquido é conseguido por duas formas: O cálculo das proporções das matérias primas a enformar em função das respectivas análises químicas e pelo controle da altura da lança. Com raras exceções referentes aos aços especiais, em geral o aço líquido produzido pelo processo LD possui uma composição química bastante uniforme no final do sopro. A variedade do tipo de aço é obtida posteriormente efetuando-se as adições específicas de metais, durante o vazamento do aço líquido numa panela. No modelo serão consideradas as restrições metalúrgicas do aço no final do sopro.

O consumo de matérias primas no processo LD será equacionado convenientemente pelo balanço material e térmico da forma similar ao modelo do alto-forno, com notações e conceitos análogos.

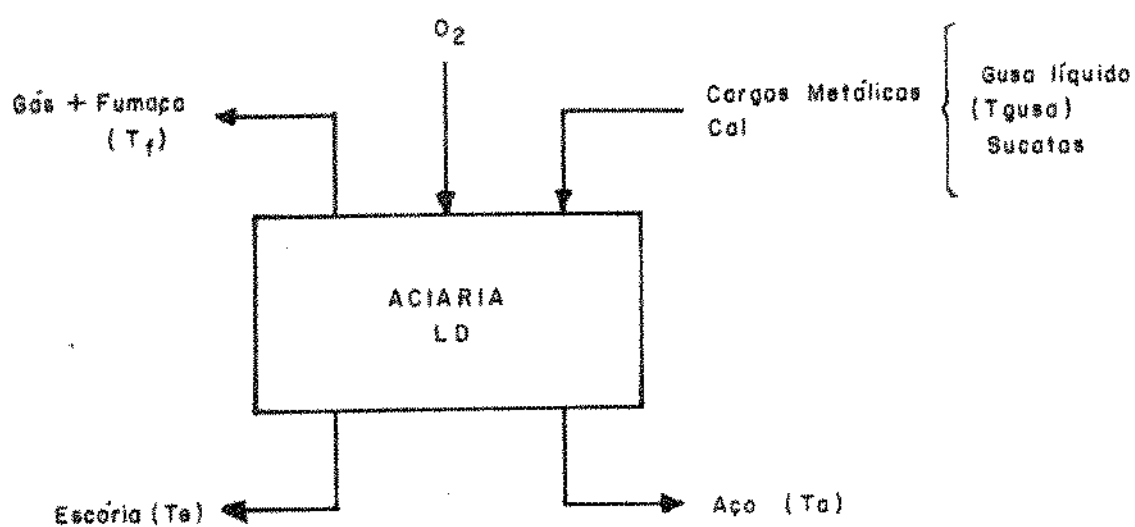


Figura 8 : Esquema de fluxo de materiais na Aciaria LD

IV.2. BALANÇO MATERIAL DO PROCESSO LD

Baseada na esquematização do fluxo de materiais da figura 8, serão desenvolvidos balanço material e balanço térmico tomando-se como subsídios teóricos as referências (14), (15), (16) e (17).

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

ACO	- Quantidade de aço a ser produzido	t
CACO	- Quantidade de C no aço	t
CAL	- Quantidade de cal enornado	t
CAD	- Quantidade de CaO na escória	t
CAOES	- Quantidade de CaO em excesso na escória	t
CARBON	- Quantidade de C enornado	t
CO	- Quantidade de C de CO no gás	t
CO2	- Quantidade de C de CO ₂ no gás	t
ESCOR	- Quantidade de escória	t
FEACO	- Quantidade de Fe no aço	t
FEPERD	- Quantidade de Fe perdido pela fumaça	t
FERRO	- Quantidade de Fe enornado	t
FESC	- Quantidade de Fe na escória	t
FOPERD	- Quantidade de P perdido pela fumaça	t
FOSACO	- Quantidade de P no aço	t
FOSENF	- Quantidade de P enornado	t
FOSES	- Quantidade de P na escória	t
GUSOL	- Quantidade de gusa sólido enornado	t
MGO	- Quantidade de MgO enornado	t
MNACO	- Quantidade de Mn no aço	t

MNEN	- Quantidade de Mn enornado	t
MNESC	- Quantidade de Mn na escória	t
MNPERD	- Quantidade de Mn perdido pela fumaça	t
PO2	- Quantidade de O ₂ consumido	t
REVEST	- Consumo de revestimento (MgO)	t
SIAUX	- Quantidade de SiO ₂ que vai para escória	t
SIENF	- Quantidade total de SiO ₂ enornado (SiO ₂ +Si)	t
SIESC	- Quantidade de Si enornado	t
SILICO	- Quantidade de SiO ₂ na escória	t
SIOES	- Quantidade de SiO ₂ enornado	t
SIPERD	- Quantidade de SiO ₂ perdido pela fumaça	t
SUCA	- Quantidade de sucata tipo A enornado	t
SUCATA	- Quantidade de sucata de aço enornado	t
SUCB	- Quantidade de sucata tipo B enornado	t
VAD2	- Consumo de O ₂ em volume	Nm ³

IV.2.1. ENTRADA DE MATERIAIS

Seja Z_i a quantidade de matéria prima i efetivamente enornado. No caso de cel a perda através da poeira durante o enornamento já está incorporada.

$$MNENF = \sum_i (Mn)_i Z_i \quad (4.1)$$

$$FOSENF = \sum_i (P)_i Z_i \quad (4.2)$$

$$SIENF = \sum_i (SiO_2)_i Z_i + \frac{n_{SiO_2}}{n_{Si}} \sum_i (Si)_i Z_i \quad (4.3)$$

$$MGO = \sum_i (MgO)_i Z_i \quad (4.4)$$

$$CAO = \sum_i (CaO)_i Z_i \quad (4.5)$$

$$CARBON = \sum_i (C)_i Z_i \quad (4.6)$$

$$FERRO = \sum_i (Fe)_i Z_i \quad (4.7)$$

IV.2.2. SAÍDA DE MATERIAIS

a. FUMAÇA

As perdas de materiais através da fumaça durante o processo de elaboração de aço serão consideradas proporcionais às quantidades enforçadas.

$$MNPER = a_1 MNENF \quad (4.8)$$

$$FOPERD = a_2 FOSENF \quad (4.9)$$

$$SIPERD = a_3 SIENF \quad (4.10)$$

$$FEPERD = a_4 FERRO \quad (4.11)$$

Estes são elementos presentes na fumaça cujo estado térmico é diferente, temperatura mais elevada, comparado quando do enforçamento, portanto, são de interesse do balanço térmico. Naturalmente outros elementos compõem a fumaça, por exemplo CaO, no entanto, eles representam a perda do material antes de serem efetivamente enforçados no convertedor sem participar do balanço material e tér-

mico. Por esta razão a presença de tais elementos na fumaça não foi relacionada.

b. AÇO

Desprezando os pequenos teores de S e Si, o aço líquido é constituído basicamente de Fe, C, Mn e P. Segundo a ref.(16) existem 5 Kg de O_2 em cada t de aço líquido, então:

$$0,995 \text{ ACO} = \text{FEACO} + \text{CACO} + \text{MNAO} + \text{FOSAO} \quad (4.12)$$

c. ESCÓRIA

Quase totalidade da escória é constituída de FeO , MnO , SiO_2 , P_2O_5 , CaO e MgO .

$$(1 - k) \text{ ESCOR} = \frac{M_{FeO}}{M_{Fe}} \text{ FESC} + \frac{M_{MnO}}{M_{Mn}} \text{ MNESC} + \text{SILICO} + \\ + \frac{M_{P_2O_5}}{M_{P_2}} \text{ FOSSES} + \text{CAO} + \text{MGO} \quad (4.13)$$

k: teor de outros elementos na escória

Evidentemente para acertar o balanço material, seguintes equações são necessárias:

$$\text{MNENF} - \text{MNAO} - \text{MNESC} - \text{MNPERD} = 0 \quad (4.14)$$

$$\text{FOSENF} - \text{FOSAO} - \text{FOSES} - \text{FOPERD} = 0 \quad (4.15)$$

$$\text{SIENF} - \text{SILICO} - \text{SIPERD} = 0 \quad (4.16)$$

$$\text{FERRO} - \text{FEACO} - \text{FESC} - \text{FEPERD} = 0 \quad (4.17)$$

Nesta altura a seguinte observação se faz necessária:

Para descrever com exatidão o processo de elaboração do aço é preciso conhecer: (1) As reações que tomam parte do processo; (2) As quantidades de matérias primas ou seus derivados que são envolvidos em cada reação. A respeito da primeira parte diversas informações são disponíveis nas bibliografias existentes, porém quanto a segunda parte não se pode estabelecer, a priori, a relação quantitativa dos elementos envolvidos nas reações pois isso depende, entre outras coisas, do modo com que é operado o processo. Por essa razão, será admitido que os teores de elementos no aço e na escória sejam controláveis separadamente, embora se saiba que a composição final da escória influencia de alguma forma a composição do aço e vice-versa. Uma forma de amenizar esta hipótese é restringir a presença de alguns elementos na escória em função de uma dada composição do aço. Tais restrições seriam obtidas estatisticamente e através da experiência adquirida pelos aciaristas.

$$\text{Min} \leq \frac{\text{ESCOR}}{\text{ACD}} \leq \text{Max} \quad (4.18)$$

$$\text{Min} \leq \frac{\text{FESC}}{\text{ESCOR}} \leq \text{Max} \quad (4.19)$$

$$\text{Min} \leq \frac{\text{SILICO}}{\text{ESCOR}} \leq \text{Max} \quad (4.20)$$

$$\text{Min} \leq \frac{\text{MNESC}}{\text{ESCOR}} \leq \text{Max} \quad (4.21)$$

$$\text{Min} \leq \frac{\text{MGO}}{\text{ESCOR}} \leq \text{Max} \quad (4.22)$$

Basicidade:

$$\text{Min} \leq \frac{\text{CAO} + \text{MGO}}{\text{SILICO}} \leq \text{Max} \quad (4.23)$$

d. GÁS

O gás da LD é composto basicamente por CO e CO₂ e, como no alto-forno, a sua relação reflete o padrão de operação

$$\frac{\text{Volume de CO}}{\text{Volume de CO}_2} = m \longrightarrow \frac{\text{CO}}{\text{CO}_2} = m \quad (4.24)$$

$$\text{CARBON} - \text{CACD} - \text{CO} - \text{CO}_2 = 0 \quad (4.25)$$

e. RESTRIÇÕES DE ENFORNAMENTO

As sucatas e gusa sólido são acondicionadas e corregadas numa caixa metálica cuja capacidade é uma restrição:

$$\sum (\text{Sucatas} + \text{gusa sólido}) \leq \text{Capacidade da caixa} \quad (4.26)$$

A disponibilidade de matérias primas também pode participar no conjunto de restrições.

IV.3. BALANÇO TÉRMICO DO PROCESSO LD

DESCRIÇÃO DAS VARIÁVEIS

CALG	- Entalpia do gusa líquido	th
CALS	- Calor de formação de Ca_2SiO_4	th
CALS1	- Calor de formação de Ca_2SiO_4 a partir de Si	th
CALS2	- Calor de formação de Ca_2SiO_4 a partir de SiO_2	th
CALP	- Calor de formação de $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_{10}$	th
CALM	- Calor de formação de MnO na escória	th
CALF	- Calor de formação de FeO na escória	th
CALCO	- Calor de formação de CO	th
CALCO2	- Calor de formação de CO_2	th
CALPO	- Calor de formação de P_2O_5	th
CALFEP	- Calor de formação de FeO na fumaça	th
CALMP	- Calor de formação de MnO na fumaça	th
CALFOR	- Calor fornecido	th
ENTACO	- Entalpia do aço	th
ENTES	- Entalpia da escória	th
ENTGAS	- Entalpia do gás	th
ENTFUM	- Entalpia da fumaça	th

CALOR FORNECIDO	CONSUMO DE CALOR
. Entalpia do gusa líquido	. Entalpia do aço
. Calor de formação da escória	. Entalpia da escória
	. Entalpia do gás
. Calor de formação de gás	. Entalpia da fumaça
. Calor de formação da fumaça	. Perdas

IV.3.1. CALOR FORNECIDO

a. ENTALPIA DO GUSA LÍQUIDO : CALG

$$\text{CALG} = [70 + 0,165 (T_{\text{gusa}} - 25)] \text{ GUSA} \quad \text{th}$$

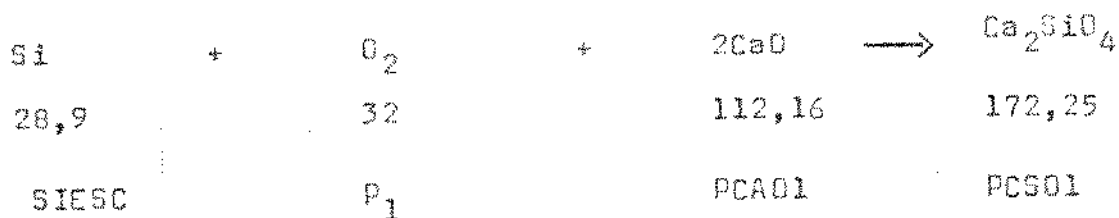
T_{gusa} : temperatura do gusa líquido enfundado em $^{\circ}\text{C}$

b. ENTALPIA DE FORMAÇÃO DA ESCÓRIA

Na escória da aciaria LD CaO combina com SiO_2 e P_2O_5 formando-se silicatos (Ca_2SiO_4) e fosfatos ($\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$) com liberação de calor. Mn e Fe também são oxidados. Apenas MgO oriundo de cal e do revestimento interno de refratários compõe a escória de forma neutra.

- Formação de Ca_2SiO_4 : CALS

Si pode entrar no convertedor em 2 formas: Si e SiO_2

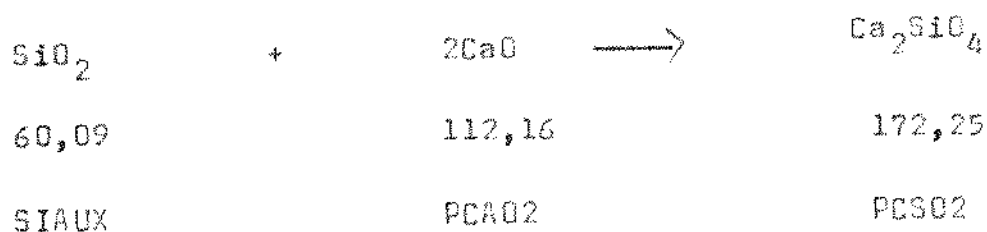


$$\text{PCSO1} = \frac{172,25}{28,09} \text{ SIESC}, \quad \text{P}_1 = \frac{32}{28,09} \text{ SIESC}, \quad \text{PCAO1} = \frac{112,16}{28,09}$$

SIESC

$$\begin{aligned} \text{CALS1} &= \text{PCSO1} \cdot (\Delta H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} \cdot 1/172,25 - \text{PCAO1}(\Delta H_{298})_{\text{Ca}} \\ &\quad \cdot 1/56,08 \end{aligned}$$

$$\text{CALS1} = 8835,9 \text{ SIESC} \quad \text{th}$$



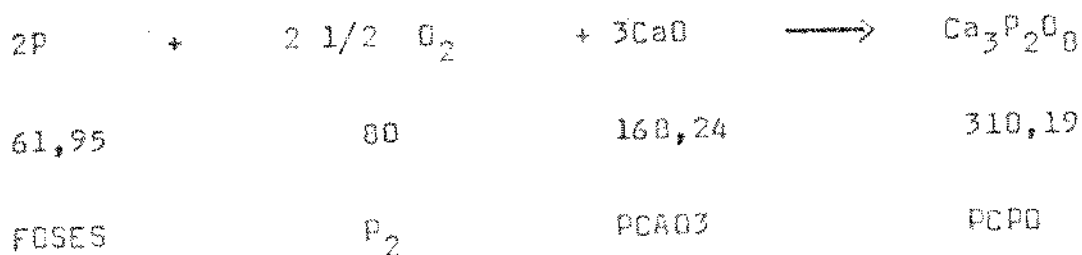
$$\text{PCSO2} = \frac{172,25}{60,09} \text{ SIAUX}, \text{ PCAO2} = \frac{112,16}{60,09} \text{ SIAUX}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALS2} = & \text{PCSO2} (\Delta H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} \cdot 1/172,25 - \text{PCAO2} (\Delta H_{298})_{\text{CaO}} \\
 & \cdot 1/56,08 - \text{SIAUX} \cdot (\Delta H_{298})_{\text{SiO}_2} \cdot 1/60,09
 \end{aligned}$$

$$\text{CALS2} = 639,9 \text{ SIAUX} \quad \text{th}$$

- Formação de $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$: CALP

Embora a formação de $\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8$ resulte de várias reações, podem ser entendidas da seguinte forma:



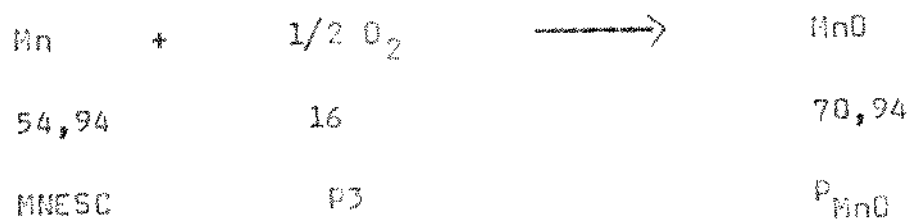
$$\text{PCPO} = \frac{310,19}{61,95} \text{ FOSES}, \text{ PCAO3} = \frac{168,24}{61,95} \text{ FOSES}, \text{ P}_2 = \frac{80}{61,95}$$

FOSES

$$\begin{aligned}
 \text{CALP} = & \text{PCPO} (\Delta H_{298})_{\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8} \cdot 1/310,19 - \text{PCAO3} (\Delta H_{298})_{\text{CaO}} \\
 & \cdot 1/56,09
 \end{aligned}$$

$$\text{CALP} = 8577,9 \text{ FOSES} \quad \text{th}$$

- Formação de MnO : CALM

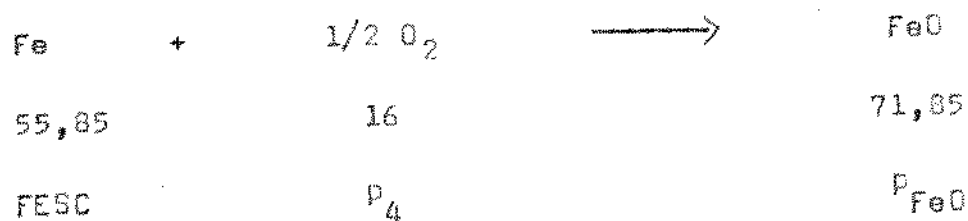


$$P_{MnO} = \frac{70,94}{54,94} \text{ MNESC}, P_3 = \frac{16}{54,94} \text{ MNESC}$$

$$\text{CALM} = P_{MnO} \cdot (\Delta H_{298})_{MnO} \cdot 1/70,94$$

$$\text{CALM} = 1675,5 \text{ MNESC} \quad \text{th}$$

- Formação de FeO : CALF



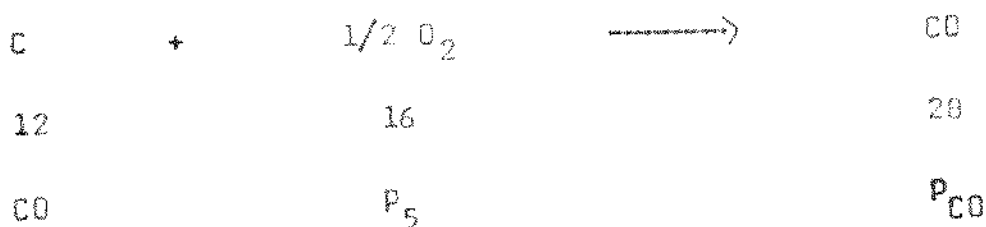
$$P_{FeO} = \frac{71,85}{55,85} \text{ FESC}, P_4 = \frac{16}{55,85} \text{ FESC}$$

$$\text{CALF} = P_{FeO} (\Delta H_{298})_{FeO} \cdot 1/71,85$$

$$\text{CALF} = 1136,9 \text{ FESC} \quad \text{th}$$

c. ENTALPIA DE FORMAÇÃO DOS GASES

- Formação de CO : CALCO

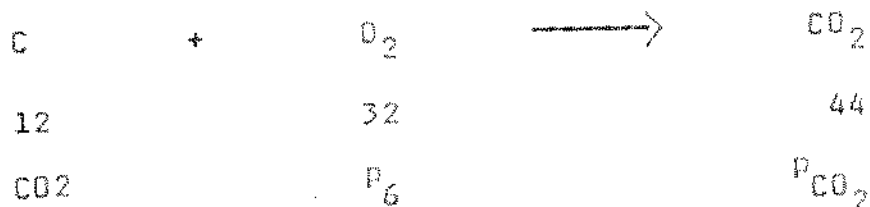


$$P_{\text{CO}} = \frac{28}{12} \text{ CO} , \quad P_5 = \frac{16}{12} \text{ CO}$$

$$\text{CALCO} = P_{\text{CO}} (\Delta H_{298})_{\text{CO}} \cdot 1/28$$

$$\text{CALCO} = 2201,3 \text{ CO} \quad \text{th}$$

- Formação de CO₂ : CALCO₂



$$P_{\text{CO}_2} = \frac{44}{12} \text{ CO}_2 , \quad P_6 = \frac{32}{12} \text{ CO}_2$$

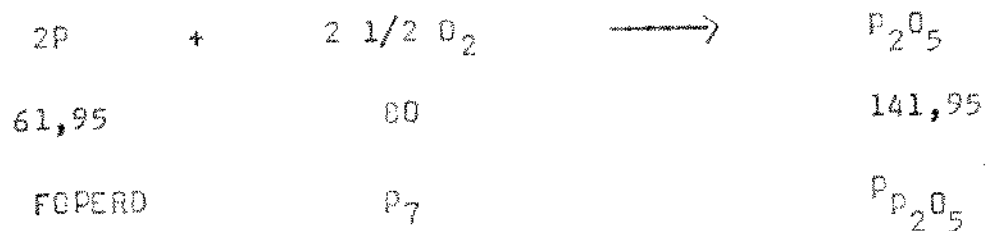
$$\text{CALCO}_2 = P_{\text{CO}_2} (\Delta H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot 1/44$$

$$\text{CALCO}_2 = 7837,7 \text{ CO}_2 \quad \text{th}$$

d. ENTALPIA DE FORMAÇÃO DA FUMAÇA

Entre os elementos que compõem fumaça os de interesse para balanço térmico são P₂O₅, FeO, MnO e SiO₂. Será suposto que SiO₂ da fumaça provém do SiO₂ enfeitado, portanto sem sofrer a oxidação.

- Formação de P_2O_5 : CALPO



$$P_{P_2O_5} = \frac{141,95}{61,95} FOPERD, \quad P_7 = \frac{80}{61,95} FOPERD$$

$$CALPO = P_{P_2O_5} (\Delta H_{290})_{P_2O_5} \cdot 1/141,95$$

$$CALPO = 5676,3 FOPERD \quad th$$

- Formação de FeO : CALFEP

Da mesma forma:

$$P_8 = \frac{16}{55,85} FEPERD$$

$$CALFEP = 1136,9 FEPERD \quad th$$

- Formação de MnO : CALMP

Também é análogo:

$$P_9 = \frac{16}{54,94} MNPERD$$

$$CALMP = 1675,4 MNPERD \quad th$$

Portanto o calor total fornecido será:

$$\begin{aligned}
 CALFOR = & CALG + CALS1 + CALS2 + CALP + CALM + CALF + CALCO + \\
 & + CALCO2 + CALPO + CALFEP + CALMP
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CALFOR} = & \text{CALG} + 8835,9 \text{ SIESC} + 639,9 \text{ SIAUX} + 8577,9 \text{ FOSSES} + \\
 & + 1675,5 \text{ MNESC} + 1136,9 \text{ FESC} + 2201,3 \text{ CO} + 7837,7 \\
 & \text{CO}_2 + 5676,3 \text{ FOPERD} + 1136,9 \text{ FEOPERD} + 1675,4 \text{ MNPERD} \\
 & (4.27)
 \end{aligned}$$

IV.3.2. CONSUMO DE CALOR

a. ENTALPIA DO AÇO : ENTACO

$$\text{ENTACO} = (-1435 + 10,55 T_a) 1/55,85 \text{ ACO} \quad \text{th}$$

T_a : temperatura do aço em $^{\circ}\text{K}$

b. ENTALPIA DA ESCÓRIA

Na escória é necessário um excesso de CaO para mantê-la fluída e proteger o revestimento interno contra ataque de SiO_2 .

$$\text{CAO} - \text{PCAO1} - \text{PCAO2} - \text{PCAO3} > 0$$

$$\text{CAO} - 3,99288 \text{ SIESC} - 1,86653 \text{ SIAUX} - 2,71574 \text{ FOSSES} > 0$$

ou

$$\begin{aligned}
 \text{CAO} - 3,99288 \text{ SIESC} - 1,86653 \text{ SIAUX} - 2,71574 \text{ FOSSES} - \\
 - \text{CAOES} = 0 \quad (4.28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ENTES} = & [(H_{Te} - H_{298})_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4} \cdot 1/172,25 (\text{PCSO1} + \text{PCSO2}) + \\
 & (H_{Te} - H_{298})_{\text{Ca}_3\text{P}_2\text{O}_8} \cdot 1/310,19 \cdot \text{PCPO} + (H_{Te} - \\
 & - H_{298})_{\text{MnO}} \cdot 1/70,94 \cdot P_{\text{MnO}} + (H_{Te} - H_{298})_{\text{FeO}} \cdot \\
 & \cdot 1/71,85 \cdot P_{\text{FeO}} + (H_{Te} - H_{298})_{\text{CaO}} \cdot 1/56,08 \cdot \text{CAOES} + \\
 & + (H_{Te} - H_{298})_{\text{MgO}} \cdot 1/40,32 \cdot \text{MGO}] \quad \text{th} \\
 & (4.29)
 \end{aligned}$$

T_e : temperatura da escória LD em $^{\circ}\text{K}$

c. ENTALPIA DOS GASES : ENTGAS

$$\begin{aligned} \text{ENTGAS} = & (H_{Tg} - H_{298})_{\text{CO}} \cdot 1/28 \cdot P_{\text{CO}} + (H_{Tg} - H_{298})_{\text{CO}_2} \cdot \\ & \cdot 1/44 \cdot P_{\text{CO}_2} \quad \text{th} \quad (4.30) \end{aligned}$$

T_g : temperatura do gás LD em $^{\circ}\text{K}$

d. ENTALPIA DA FUMAÇA : ENTFUM

$$\begin{aligned} \text{ENTFUM} = & (H_{Tf} - H_{298})_{\text{SiO}_2} \cdot 1/60,09 \text{ SiPERD} + (H_{Tf} - H_{298})_{\text{P}_2\text{O}_5} \cdot \\ & \cdot 1/141,95 \cdot P_{\text{P}_2\text{O}_5} + (H_{Tf} - H_{298})_{\text{FeO}} \cdot 1/55,85 \cdot \\ & \cdot \text{FePERD} + (H_{Tf} - H_{298})_{\text{MnO}} \cdot 1/54,94 \cdot \text{MnPERD} \quad \text{th} \quad (4.31) \end{aligned}$$

T_f : temperatura da fumaça em $^{\circ}\text{K}$

e. PERDA TÉRMICA

$$\text{Perda térmica} = \text{CALFOR} - \text{ENTACO} - \text{ENTES} - \text{ENTGAS} - \text{ENTFUM} \quad (4.32)$$

Diversos autores, ref.(14), (15) e (16), quantificam esta perda em trono de 4% a 6%, dependendo do tipo de sucatas enforçadas e estado do revestimento interno do convertedor.

IV.3.3. CONSUMO DE O_2

Consumo de O_2 = oxidação do aço + oxidação da escória +
+ formação da fumaça + formação do gás

$$PO_2 = 0,005 ACO + \sum_{i=1}^5 P_i$$

$$VAO_2 = \frac{22,4}{32} PO_2 \times 10^3 \quad (Nm^3) \quad (4.33)$$

CAPÍTULO V - UM EXEMPLO PRÁTICO

V.1. DADOS

V.2. RESULTADOS

V.1. DADOS

Os dados utilizados neste exemplo foram obtidos na Usina de João Monlevade da CSBM. Os dados termodinâmicos são tabelados no ANEXO I.

V.1.a. DADOS DA SINTERIZAÇÃO

- Cargas metálicas: Fino do alto-forno (sinter degradado), Minério de Ferro e Minério de Manganês.
- Consumo de carvão fino: 12% em média sobre a carga metálica úmida: $k_1 = 0,12$
- Consumo de sinter degradado na carga metálica: $k_2 = 0,15$
- Cinza do carvão = 17% $\longrightarrow r_1 = 0,17$
- Rendimento de calcáreo = 60% $\longrightarrow r_2 = 0,6$
- Devido à limitação da capacidade de vazão do silo de calcáreo, apenas 80% do CaO necessário pode vir deste. Portanto o restante 20% deve ser suprido através do cal: $k_3 = 0,2$ e $k_4 = 0,8$
- Análise química das matérias primas:

	% SiO ₂	% CaO	% Mn	% Fe	% P ₂ O ₅	% Al ₂ O ₃	% H ₂ O
Sinter degradado	4,00	4,00	0,50	61,00	0,21	1,56	2,00
Min. Fe	3,00	-	0,08	69,94	0,16	1,10	5,00
Min. Mn	2,00	-	30,00	23,00	-	-	12,00
Cal	2,30	90,00	-	-	-	-	-
Calcáreo	1,90	52,00	-	-	-	-	5,00
Cinza	40,00	20,00	-	-	-	-	12,00

- Restrições da composição do sinter

	% min	% max
SiO ₂	3,50	4,50
CaO	4,00	5,20
MnO	0,71	0,85
P ₂ O ₅	-	0,27
Al ₂ O ₃	-	2,30
Fe	60,00	-

- Teor de Fe na forma de FeO em relação Fe total = 14,76% →
 $m_1 = 0,1476$ (média estatística)

Baseado nestes dados foi estabelecido seguinte conjunto de restrições da Sinterização, conforme o modelo desenvolvido no Cap. II .

SINTERIZAÇÃO

EQUAÇÃO DO VARIÁVEL DE
CAP. II LINHA MPSX

0,98 FINAF + 0,95 MNFEST + 0,88 MNST - - CARGAMT	= 0 (2.1)	SINT 1
0,12 FINAF + 0,12 MNFEST + 0,12 MNST - - CARVAOST	= 0 (2.2)	SINT 2
0,98 FINAF - 0,15 CARGAMT	= 0 (2.3)	SINT 3
CARGAMT + 0,17 CARVAOST + CALST + 0,57 CALCARST - SINTER	= 0 (2.4)	SINT 4
0,0392 FINAF + 0,0285 MNFEST + 0,0176 MNST + 0,023 CALST + 0,0180 CALCARST + + 0,0680 CARVAOST - SISINT	= 0 (2.5)	SINT 5
SISINT - 0,035 SINTER	$\geq$ 0 (2.6a)	SINT 6A
- SISINT + 0,045 SINTER	$\geq$ 0 (2.6b)	SINT 6B
0,0392 FINAF + 0,9 CALST + 0,494 CALCARST + 0,034 CARVAOST - CAOST	= 0 (2.7)	SINT 7
CAOST - 0,048 SINTER	$\geq$ 0 (2.8a)	SINT 8A
- CAOST + 0,052 SINTER	$\geq$ 0 (2.8b)	SINT 8B
0,9 CALST - 0,13 CALCARST	= 0 (2.9)	SINT 9
0,0063 FINAF + 0,001 MNFEST + 0,3409 MNST - MNSINT	= 0 (2.10)	SINT 10
MNSINT - 0,0071 SINTER	$\geq$ 0 (2.11a)	SINT 11A
- MNSINT + 0,0085 SINTER	$\geq$ 0 (2.11b)	SINT 11B
0,002 FINAF + 0,0015 MNFEST - FOSST	= 0 (2.12)	SINT 12
- FOSST + 0,0027 SINTER	$\geq$ 0 (2.13)	SINT 13
0,0153 FINAF + 0,0104 MNFEST - ALUMST	= 0 (2.14)	SINT 14
- ALUMST + 0,023 SINTER	$\geq$ 0 (2.15)	SINT 15
0,5978 FINAF + 0,6645 MNFEST + 0,2024 MNST - FERROST	= 0 (2.16)	SINT 16

SINTERIZAÇÃO

EQUAÇÃO DO VARIÁVEL DE
CAP. II LINHA NPSX

FERROST - 0,6 SINTER

≥ 0 (2.17) SINT 17

FEOST - 0,1899 FERROST

$= 0$ (2.18) SINT 18

FE03ST - 1,2187 FERROST

$= 0$ (2.19) SINT 19

V.1.b. DADOS DO ALTO-FORNO

- Matérias primas enforcadas: sinter, carvão (grosso e fino), calcário e areia (quartzito).

- Análise química das matérias primas:

SUBST. (%)	CINZAS DO CARVÃO		AREIA	CALCÁREO
	GROSSO	FINO		
SiO_2	18,90	19,10	91,04	3,04
Fe_2O_3	4,86	11,75	3,32	2,70
MnO	0,80	0,71	0,14	-
Al_2O_3	2,92	1,67	2,44	-
CaO	31,85	27,59	-	-
MgO	6,32	5,30	-	-
P_2O_5	3,69	1,17	0,11	-
CaCO_3	-	-	-	94,17
MgCO_3	-	-	-	0,19
H_2O	-	-	5,00	5,00

OBS.: As análises químicas são feitas na base seca, isto é, considerando 100% do material após a eliminação completa da umidade (H_2O).

- Análise do ar:

% O_2 = 21,0 , % N_2 = 79,0

umidade = 15 g de H_2O / Nm^3 de ar

- Análise do óleo combustível:

% C = 86,0 , % H_2 = 13,0 , % H_2O = 0,4

- Poeira = 2% das matérias primas enforcadas $\longrightarrow \alpha_1 = 0,02$

- Índice de redução de $MnO = 66,0\% \longrightarrow m = 0,66$

- Restrições da escória:

$$0,15 \leq \frac{\text{PESO DA ESCÓRIA}}{\text{PESO DO GUSA LÍQUIDO}} \leq 0,25$$

$$0,8 \leq \text{Basicidade} = \frac{CaO}{SiO_2} \leq 1,1$$

- Restrições da composição do gusa líquido:

	% min	% max
P	0,1	2,5
Mn	0,3	4,0
Si	0,2	0,6

- Capacidade de sopro de ar pelas ventaneiras:

$$C_v = 24.000 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

- Balanço de gás do alto-forno:

• Balanço de H_2 :

$$\Delta (H_2) < 0$$

$$r_h = \text{rendimento de redução} = 0,4$$

• Balanço de C - 0

$$\gamma_{AF} = \frac{V_{CO}}{V_{CO_2}} = 1,6$$

- Restrições de enformamento de carvão:

$$\frac{\text{CARVÃO GROSSO}}{\text{CARVÃO TOTAL ENFORNADO}} \geq 0,6$$

$$\frac{\text{CARVÃO FINO}}{\text{CARVÃO TOTAL ENFORNADO}} \geq 0,2$$

- Capacidade de carregamento:

$$C_{AF} = 7 \text{ t}$$

$$h_{AF} = \text{ciclo de transporte} = 5 \text{ min}$$

- Temperaturas envolvidas

- . Temperatura do ar = $850^{\circ}\text{C} = 1.123^{\circ}\text{K}$
- . Temperatura do óleo = $100^{\circ}\text{C} = 373^{\circ}\text{K}$
- . Temperatura do gusa = $1.250^{\circ}\text{C} = 1.523^{\circ}\text{K}$
- . Temperatura da escória = $1.250^{\circ}\text{C} = 1.523^{\circ}\text{K}$
- . Temperatura da poeira = $127^{\circ}\text{C} = 400^{\circ}\text{K}$
- . Temperatura do gás = $127^{\circ}\text{C} = 400^{\circ}\text{K}$

Baseado nestes dados obtém-se seguinte conjunto de restrições do alto-forno conforme o modelo do Cap. III:

ALTO - FORNO

0,98 FEOST - FEO	= 0 (3.1)	AF 1
0,0325 AREIA + 0,0264 CALCAR + 0,98 FEOST + 0,0021 CARGRO + 0,0050 CARFIN - FEO3	= 0 (3.2)	AF 2
0,0011 AREIA + 0,0016 CARGRO + 0,0005 CARFIN + 0,98 FOSST - POS	= 0 (3.3)	AF 3
0,0013 AREIA + 0,98 MNSINT + 0,0003 CARGRO + 0,0003 CARFIN - MNO	= 0 (3.4)	AF 4
0,9228 CALCAR - CACO3	= 0 (3.5)	AF 5
0,5603 CACO3 + 0,98 CAOST + 0,0142 CARGRO + 0,0117 CARFIN - CAOAF	= 0 (3.6)	AF 6
0,0019 CALCAR - MGCO3	= 0 (3.7)	AF 7
0,4781 MGCO3 + 0,0028 CARGRO + 0,0022 CARFIN - MGOAF	= 0 (3.8)	AF 8
0,0239 AREIA + 0,98 ALUMST + 0,0013 CARGRO + 0,0007 CARFIN - ALUMIN	= 0 (3.9)	AF 9
0,8922 AREIA + 0,0298 CALCAR + 0,98 SISINT + 0,0084 CARGRO + 0,0001 CARFIN - - SILIES	= 0 (3.10)	AF 10
0,049 AREIA + 0,049 CALCAR + 0,0882 CARGRO + 0,147 CARFIN - UMIDADE	= 0 (3.11)	AF 11
0,0864 CARGRO + 0,0766 CARFIN - COVOL	= 0 (3.12)	AF 12
0,0789 CARGRO + 0,0700 CARFIN - COVOL2	= 0 (3.13)	AF 13
0,12 CACO3 + 0,4286 COVOL + 0,2727 COVOL2 + 0,1423 MGCO3 - CARVOL	= 0 (3.14)	AF 14
0,6534 CARGRO + 0,6022 CARFIN + 0,86 OLEO - CARBOAF	= 0 (3.15)	AF 15
0,21 VTAR + VO2 - VTO2	= 0 (3.16)	AF 16
0,79 VTAR - VTN2	= 0 (3.17)	AF 17

ALTO - FORNO

0,000015 VTAR - UMIAR	= 0 (3.18)	AF 18
0,01 VTAR - 0,78 VO2	≥ 0 (3.19)	AF 19
0,0252 CARGRO + 0,0224 CARFIN - HIDVOL	= 0 (3.21)	AF 21
0,13 OLEO + 0,1111 UMIAR + HIDVOL - - HIDROG	= 0 (3.22)	AF 22
FERED + FOSRED + MNRED + SIRED + + CARGUSA - GUSA	= 0 (3.23)	AF 23
0,4364 POS - FOSRED	= 0 (3.24)	AF 24
0,511 MNO - MNRED	= 0 (3.25)	AF 25
0,7773 FEO + 0,6994 FEO3 - 0,7773FEDES - - FERED	= 0 (3.26)	AF 26
0,0477 GUSA + 0,03 MNRED - 0,3 SIRED - - 0,35 FOSRED - CARGUSA	= 0 (3.27)	AF 27
FOSRED - 0,001 GUSA	≥ 0 (3.28a)	AF 28A
- FOSRED + 0,025 GUSA	≥ 0 (3.28b)	AF 28B
MNRED - 0,003 GUSA	≥ 0 (3.29a)	AF 29A
- MNRED + 0,04 GUSA	≥ 0 (3.29b)	AF 29B
SIRED - 0,002 GUSA	≥ 0 (3.30a)	AF 30A
- SIRED + 0,006 GUSA	≥ 0 (3.30b)	AF 30B
CARGUSA - 0,04 GUSA	≥ 0 (3.30c)	AF 30C
- CARGUSA + 0,045 GUSA	≥ 0 (3.30d)	AF 30D
CAQAF + SIESCOR + MGOAF + ALUMIN + FEDES + + MNO - 1,2912 MNRED - ESCORAF	= 0 (3.31)	AF 31
SILIES - 2,1392 SIRED - SIESCOR	= 0 (3.32)	AF 32
0,01 ESCORAF - FEDES	= 0 (3.33)	AF 33
CAQAF - 0,8 SIESCOR	≥ 0 (3.34a)	AF 34A
- CAQAF + 11 SIESCOR	≥ 0 (3.34b)	AF 34B
ESCORAF - 0,15 GUSA	≥ 0 (3.35a)	AF 35A

ALTO - FORNO

ESCORA + 0,25 GUSA	> 0 (3.35b)	AF 35B
0,02 AREIA + 0,02 CALCAR + 0,02 SINTER + + 0,02 CARVÃO - POEIRA	= 0 (3.36)	AF 36
HIDROG - HIRED - PH2	= 0 (3.37)	AF 37
HIRED - 0,4 HIDROG	= 0 (3.38)	AF 38
0,0014 VTO2 + 0,3005 FEO3 + 0,2227 FEO + + 1,1392 SIRED + 0,2912 MNRED + 1,2913 FOSRED + 0,32 CACO3 + 0,3794 MGCO3 + + 0,5714 COVOL + 0,7273 COVOL2 + 0,8889 UMIAR - 0,2227 FEDES - 8,0 HIRED - OXIGEN	= 0 (3.39)	AF 39
CARBOAF + CARVOL - CARGUSA - CARGAS	= 0 (3.40)	AF 40
0,5417 OXIGEN - CARGAS	= 0 (3.41)	AF 41
SINTER + CALCAR + AREIA + CARVAO ≤ 55600	(3.42)	AF 42
CARGRO - 0,6 CARVAO	> 0 (3.43)	AF 43
CARFIN - 0,2 CARVAO	> 0 (3.44)	AF 44
CARGRO + CARFIN - CARVAO	= 0 (3.45)	AF 45
0,2855 VTO2 + 0,2737 VTN2 + 414,6111 UMIAR - CALVENT	= 0 (3.46)	AF 46
CALVENT + 47,3716 OLEO + 2,3585 VTO2 + 42,0037 FEO3 + 57,564 FEO - 57,564 FEDES + + 125,0 SIESCOR - CALFORAF	= 0 (3.47)	AF 47
5586,26 SIRED + 1194,65 MNRED + 3544,31 FOSRED - CALGANG	= 0 (3.48)	AF 48
CARBOAF - CARGUSA - 0,00107 VTO2 - 0,6666 UMIAR - 0,8544 SIRED - 0,2184 MNRED - - 0,9685 FOSRED - CAREG	= 0 (3.49)	AF 49
25,357 PCO + 21,702 PCO2 + 353,5 PH2 + + 0,0317 VTN2 + 45,83 UMIDADE + 412,5 HIRED - CALGAS	= 0 (3.50)	AF 50

ALTO - FORNO

0,0025 VT02 + 1,5555 UMIAR + 1,9936 SIRED + + 0,5096 MNRED + 2,2599 FOSRED + 4,6667 CAREG + 14,0 HIRED - 0,526 FEO3 - 0,3897 FEO + 0,3897 FEDES + COVOL - PCO	= 0 (3.51)	AF 51
0,8265 FEO3 + 0,6124 FEO - 3,6667 CAREG - - 22,0 HIRED - 0,6124 FEDES + 0,4397 CACO3 + 0,5218 MGCO3 + COVOL2 - PCO2	= 0 (3.52)	AF 52
350,0 OLEO + 1743,44 UMIAR + CALGANG + + 3435,0 CAREG + 4919,0 HIRED + 427,095 CACO3 + 287,534 MGCO3 + 430,0 CARGUSA + + 545,55 UMIDADE + 272,125 GUSA + 322,0 ESCORAFA + 25,4 POEIRA + CALGAS - CALCONS	= 0 (3.53)	AF 53
CALFORAF - CALCONS - CALPERAF	= 0 (3.54)	AF 54
CALPERAF - 100,0 GUSA	> 0 (3.55a)	AF 55A
- CALPERAF + 400,0 GUSA	> 0 (3.55b)	AF 55B

V.1.c. DADOS DA ACIARIA LD

- Cargas metálicas: gusa líquido, gusa sólido, sucata de aço , sucata tipo A e sucata tipo B.

- Análises químicas das cargas metálicas:

	% C	% Mn	% P	% Si	% SiO ₂	% Fe
GUSA SÓLIDO	3,80	0,90	0,15	0,80	-	91,0
SUCATA DE AÇO	0,15	0,45	0,03	0,15	-	99,2
SUCATA A	-	2,80	0,48	-	8,00	75,0
SUCATA B	-	2,80	0,48	-	15,06	65,0

- Rendimento de cal = 73 %

- Perdas: (esses dados foram estimados)

de Mn = 34,0% de Mn enornado

de P = 4,0% de P enornado

de SiO₂ = 16,6% de SiO₂ enornado

de Fe = 1,4% de Fe enornado

- Restrições da escória

$$0,085 \leq \frac{\text{PESO DA ESCORIA}}{\text{PESO DO AÇO}} \leq 0,09$$

Composição:

	% FeO	% SiO ₂	% MnO	% MgO
min	12,0	13,7	4,2	3,0
max	27,0	21,6	9,2	5,7

O peso das outras cargas que não foram consideradas neste modelo como Al_2O_3 , Cr_2O_3 etc, foi estimado em 4,5% da escória.

$$\text{Basicidade : } 2,8 \leq \frac{CaO + MgO}{SiO_2} \leq 3,2$$

- Composição padrão do aço líquido

0,2 % Mn , 0,018% P , 0,08% C

- Relação CO - CO_2 do gás:

$$\gamma_{LD} = \frac{V_{CO}}{V_{CO_2}} = 5,7$$

- Restrições de carregamento:

- . Capacidade da caixa sem gusa sólido = 7,3 t
- . Capacidade da caixa com gusa sólido = 15,0 t
- . Sucata de aço + Sucata A $\leq$ 175 Kg / t aço
- . Gusa sólido + 2(Sucata de aço + Sucata A) $\leq$ 350 Kg / t aço
- . Sucata A + Sucata B $\leq$ 40 Kg / t aço
- . Sucata B $\leq$ 20 Kg / t aço
- . 900 Kg / t aço $\leq$ gusa líquido $\leq$ 1.135 Kg / t aço

- Temperaturas envolvidas:

Temperatura do gusa líquido	= 1.200°C	= 1.473°K
Temperatura do aço líquido	= 1.620°C	= 1.893°K
Temperatura da escória	= 1.660°C	= 1.933°K
Temperatura do gás	= 1.620°C	= 1.893°K
Temperatura da fumaça	= 1.620°C	= 1.893°K

- Conjunto das restrições da ACIARIA LD:

ACIARIA LD

MNRED + 0,0045 SUCATA + 0,020 SUCA + 0,028 SUCB + 0,009 GUSOL - MNENF	= 0 (4.1)	ALD 1
FDSRED + 0,0003 SUCATA + 0,0048 SUCA + + 0,0048 SUCB + 0,0015 GUSOL - FOSENF	= 0 (4.2)	ALD 2
SIRED + 0,0015 SUCATA + 0,008 GUSOL - SIESC	= 0 (4.3a)	ALD 3A
0,08 SUCA + 0,1506 SUCB + 0,0146 CAL - SIDES	= 0 (4.3b)	ALD 3B
2,1392 SIESC + SIDES - SIENF	= 0 (4.3c)	ALD 3C
0,00384 CAL + REVEST - MGO	= 0 (4.4)	ALD 4
0,6497 CAL - CAO	= 0 (4.5)	ALD 5
CARGUSA + 0,0015 SUCATA + 0,038 GUSOL - - CARBON	= 0 (4.6)	ALD 6
FERED + 0,992 SUCATA + 0,75 SUCA + 0,65 SUCB + 0,91 GUSOL - FERRO	= 0 (4.7)	ALD 7
MNPERD - 0,3417 MNENF	= 0 (4.8)	ALD 8
FOPERD - 0,0393 FOSENF	= 0 (4.9)	ALD 9
SIPERD - 0,1664 SIENF	= 0 (4.10)	ALD 10
FEPERD - 0,0135 FERRO	= 0 (4.11)	ALD 11
FEACO + CACO + MNACO + FOSACO - 0,995 ACO	= 0 (4.12)	ALD 12
MNACO - 0,002 ACO	= 0 (4.12a)	ALD 12A
FOSACO - 0,00018 ACO	= 0 (4.12b)	ALD 12B
CACO - 0,0008 ACO	= 0 (4.12c)	ALD 12C
1,3485 FESC + 1,3535 MNESEC + 1,0482 SILICO+ + 2,4019 FOSSES + 1,0482 CAO + 1,0482 MGO - - ESCOR	= 0 (4.13)	ALD 13
MNENF - MNACO - MNPERD - MNESEC	= 0 (4.14)	ALD 14
FOSENF - FOSACO - FOPERD - FOSSES	= 0 (4.15)	ALD 15
SIENF - SIPERD - SILICO	= 0 (4.16)	ALD 16

ACIARIA LD

SIDES - SIPERD - SIAUX	= 0 (4.16a)	ALD 16A
FERRO - FESC - FEPERD - FEACO	= 0 (4.17)	ALD 17
ESCOR - 0,085 ACO	≥ 0 (4.18a)	ALD 18A
- ESCOR + 0,09 ACO	≥ 0 (4.18b)	ALD 18B
FESC - 0,09313 ESCOR	≥ 0 (4.19a)	ALD 19A
- FESC + 0,21059 ESCOR	≥ 0 (4.19b)	ALD 19B
SILICO - 0,1369 ESCOR	≥ 0 (4.20a)	ALD 20A
- SILICO + 0,2157 ESCOR	≥ 0 (4.20b)	ALD 20B
MNESC - 0,0271 ESCOR	≥ 0 (4.21a)	ALD 21A
- MNESC + 0,0712 ESCOR	≥ 0 (4.21b)	ALD 21B
MGO - 0,03 ESCOR	≥ 0 (4.22a)	ALD 22A
- MGO + 0,057 ESCOR	≥ 0 (4.22b)	ALD 22B
CAO + MGO - 2,8 SILICO	≥ 0 (4.23a)	ALD 23A
- CAO - MGO + 3,2 SILICO	≥ 0 (4.23b)	ALD 23B
CO - 5,7 CO2	= 0 (4.24)	ALD 24
CARBON - CO - CO2 - CACO	= 0 (4.25)	ALD 25
SUCATA + SUCA - SUCENF	= 0 (4.26a)	ALD 26A
GUSOL + 2 SUCENF - CAPACX	= 0 (4.26b)	ALD 26B
0,175 ACO - SUCENF	≥ 0 (4.26c)	ALD 26C
0,35 ACO - CAPACX	≥ 0 (4.26d)	ALD 26D
0,04 ACO - SUCA - SUCB	≥ 0 (4.26e)	ALD 26E
GUSA - 0,8 ACO	≥ 0 (4.26f)	ALD 26F
- GUSA + 1,135 ACO	≥ 0 (4.26g)	ALD 26G
0,02 ACO - SUCB	≥ 0 (4.26h)	ALD 26H
263,875 GUSA + 8835,9 SIESC + 639,9 SIAUX + + 8577,9 FIDES + 1675,5 MNESC + 1136,9 FESC + 2201,3 CO + 7837,7 CO2 + 5676,3 FOPERD + 1136,9 FEPERD + 1675,4 MNPERD - CALFOR	= 0 (4.27)	ALD 27

ACIARIA LD

CAO - 3,9929 SIESC - 1,8665 SIAUX - 2,7157 FOSES - CADES	= 0 (4.28)	ALD 28
1315,6 SILICO + 2263,2 FOSES + 404,4 MNESC + + 568,7 FESC + 383,8 CADES + 501,4 HGO - - ENTES	= 0 (4.29)	ALD 29
1035,8 CO + 1655,9 CO2 - ENTGAS	= 0 (4.30)	ALD 30
437,6 SIPERD + 1071,5 FOPERD + 531,0 FEPERD + 373,7 MNPERD - ENTFUM	= 0 (4.31)	ALD 31
0,945 CALFOR - 331,89 ACO - ENTES - - ENTGAS - ENTFUM - CALPERD	= 0 (4.32)	ALD 32
3,5 ACO + 797,3 SIESC + 203,7 MNESC + + 203,7 MNPERD + 200,2 FESC + 200,2 FEPERD + 933,1 CO + 1866,9 CO2 + 903,7 FOSES + 903,7 FOPERD - VAO2	= 0 (4.33)	ALD 33

V.1.d. FUNÇÃO OBJETIVA

A função objetiva adotada neste exemplo foi a maximização da lucratividade cuja expressão é:

$$\text{Maximizar } Z(x) = p_v \text{ ACO} - \sum_i C_i X_i$$

Sujeito à:

Conjunto de restrições da Sinterização

Conjunto de restrições do Alto-Forno

Conjunto de restrições da Aciaria LD

onde: p_v = preço de venda equivalente do aço líquido
(R\$ 50.000 / t)

C_i = custo por tonelada da matéria-prima i

X_i = quantidade de matéria-prima i

ACO = produção do aço líquido em t

A escolha desta função objetiva se baseou no fato de que normalmente a capacidade de produção da aciaria ser maior que a do alto-forno, exigindo portanto dos engenheiros de produção cuidados metalúrgicos no processo de produção de sinter e gusa, de modo que as respectivas composições químicas proporcionem maior produtividade na elaboração de aço, além da utilização econômica das matérias-primas disponíveis.

CUSTOS UNITÁRIOS (C_i)

- SINTERIZAÇÃO

Minério de Fe	: MNFEST	-	R\$ 661,10 / t
Minério de Mn	: MNST	-	R\$ 5.420,00 / t
Sinter degradado	: FINAF	-	R\$ 2.950,00 / t
Cal	: CALST	-	R\$ 12.030,00 / t
Calcáreo triturado	: CALCARST	-	R\$ 1.660,00 / t
Carvão fino (moinha)	: CARVAOST	-	R\$ 12.460,00 / t
Outros custos no sinter		-	R\$ 2.850,00 / t sinter

- ALTO-FORNO

Calcáreo britado	: CALCAR	-	R\$ 1.930,00 / t
Areia (quartzito)	: AREIA	-	R\$ 610,00 / t
Carvão grosso	: CARGRO	-	R\$ 15.230,00 / t
Carvão fino	: CARFIN	-	R\$ 12.460,00 / t
Óleo	: OLEO	-	R\$ 43.900,00 / t
O ₂	: VO2	-	R\$ 5,35 / Nm ³
Ar comprimido	:	-	R\$ 0,82 / Nm ³
Outros custos no gusa		-	R\$ 8.051,10 / t gusa

- ACIARIA LD

Gusa sólido	: GUSDL	-	R\$ 21.087,00 / t
Sucata de aço	: SUCATA	-	R\$ 19.000,00 / t
Sucata A	: SUCA	-	R\$ 7.101,60 / t
Sucata B	: SUCS	-	R\$ 3.550,80 / t
Cal	: CAL	-	R\$ 12.030,00 / t
O ₂	: VO2	-	R\$ 5,35 / Nm ³

V.2. RESULTADOS

O período de planejamento adotado no exemplo foi de um mês, durante o qual considerou-se a disponibilidade sem restrição das matérias primas. O exemplo, que contém 136 restrições e 155 variáveis na forma padronizada em 47 variáveis de folga, foi executado através de MPSX / 370 (MATHEMATICAL PROGRAMMING SYSTEM EXTENDED) com seguinte programa de controle:

MPSX/370 R1.6		MPSEL COMPILATION	
1			
2			
3	0001	PROGRAM	
4	0002	INITIAL	
5	0205	TITLE ('OTIMIZACAO DO PROCC. GINI-AP-LO')	
6	0206	MOVE(XDATA, 'GUSAOT')	
7	0207	MOVE(XPNAME, 'CTIPRC')	
8	0208	CONVERT('SUMMARY')	
9	0209	BCDOUT	
10	0210	MOVE(XBOUND, 'RESTRIC')	
11	0211	MOVE(XOBJ, 'OBJET')	
12	0212	MOVE(XRHS, 'LADOA')	
13	0213	MOVE(XMINMAX, 'MAX')	
14	0214	SETUP	
15	0215	OPTIMIZE	
16	0414	SOLUTION	
17	0415	RANGE	
18	0416	EXIT	
19	0417	PEND	
20			
21			

O programa, cujo tempo total de execução foi de 0,23 min de CPU, inicializa alocando os dados identificados através de XDATA, XPNAME, XBOUND, XOBJ e XRHS. Em seguida a síntese de um exame minucioso dos dados é imprimido pelo CONVERT, indicando se existem ou não os erros. BCDOUT imprime o conjunto de dados intitulado de "GUSAOT" e SETUP prepara o programa para otimização identificando o tipo, no caso maximização, e alo

cando os blocos de memória conforme as estatísticas do CONVERT. A otimização propriamente dita é processada pelo OPTIMIZE, que efetua inicialmente a 1ª fase pesquisando uma solução factível e em seguida passa para 2ª fase a procura de uma solução ótima factível pelo método SIMPLEX REVISADO.

Uma vez obtida uma solução ótima factível, os resultados são imprimidos através do SOLUTION (ANEXO 2). Os resultados consistem em 2 partes: secção 1 (ROWS) e secção 2 (COLUMNS). Na secção 1 cada restrição, equação ou inequação, é identificada conforme a notação adotada nos itens anteriores, V.l.a, V.l.b e V.l.c, por exemplo SINT5, AF20A e ALD15, respectivamente. Vale lembrar que o RHSX designa uma variável de folga para cada restrição.

A coluna AT indica o estado da variável:

BS - variável na base e factível

EQ - não básica, artificial ou fixo

UL - não básica, solução no limite superior

LL - não básica, solução no limite inferior

Coluna ACTIVITY - mostra o valor da restrição que é obtido pela diferença $b_i - l_i$, onde b_i é i-ésimo elemento do vetor $\underline{b}$ (Right-Hand-Side) e l_i é o valor da variável de folga.

Coluna SLACK ACTIVITY - mostra o valor da variável de folga (l_i)

Coluna LOWER LIMIT e UPPER LIMIT - mostram os limites inferiores e superiores adotados, respectivamente.

Coluna DUAL ACTIVITY - mostra a sensibilidade da solução, indicando a variação do valor da função objetiva em função da variação do valor da coluna ACTIVITY em torno da vizinhança. Trata-se do valor da variável dual ou vetor multiplicador (Simplex Multiplier).

Os resultados da secção 2 são semelhantes aos da secção 1. A solução de cada variável é mostrada na coluna ACTIVITY com respectivo estado, na coluna AT. As únicas diferenças residem na coluna INPUT COST no lugar de SLACK ACTIVITY da secção 1, indicando o custo (ou receita) unitário tomado na função objetiva, e REDUCED COST no lugar de DUAL ACTIVITY, vetor de custo relativo, cujo significado é similar ao da secção 1.

Após os resultados convencionais do SOLUTION, o RANGE (ANEXO 3) mostra, já na fase pós-otimização, os limites de análise de sensibilidade que permitem algumas inferências sobre as restrições e custos adotados. Os resultados do RANGE consistem em 4 partes: secção 1 e 3 contém informações econômicas para as restrições que estejam no limite (inferior ou superior) e no nível intermediário, respectivamente. Tais informações para variáveis são obtidas nas secções 2 e 4, sendo que a secção 2 refere-se para as variáveis não básicas e secção 4 refere-se às variáveis básicas. As colunas ACTIVITY, SLACK ACTIVITY, COST INPUT e LOWER (UPPER) LIMIT têm os mesmos significados do SOLUTION.

Nas secções 1 e 3 os dois valores da coluna UNIT COST que aparecem para cada restrição (equação ou inequação do problema) indicam a variação do valor da função objetiva em função da variação unitária de solução (ACTIVITY), até atingir os valores correspondentes na coluna LOWER (UPPER) ACTIVITY, se respectivos limites, LOWER (UPPER) LIMIT, fossem relaxados. Uma vez atingido o valor da coluna LOWER (UPPER) ACTIVITY, a variável correspondente na coluna LIMITING PROCESS sai da base, no caso da secção 1 ou entra na base no caso da secção 3, no estado indicado na coluna AT. Em outras palavras, tal mecanismo pode ser expresso da seguinte forma:

$$\Delta Z = \sum \Delta b \quad \text{para secção 1}$$

$$\Delta Z = \sum \Delta x \quad \text{para secção 3}$$

onde: ΔZ - variação do valor da função objetiva

- λ - vetor da variável dual
- Δb - variação do vetor disponibilidade ou de restrições
- $\underline{c}$ - vetor de custo ou de receita
- ΔX - variação do vetor de variáveis primais

Portanto, em ambos os casos, a variação do valor da função objetiva ΔZ indicada na coluna UNIT COST somente tem validade se Δb ou ΔX não implicar a mudança de base.

Nas secções 2 e 4 a análise de sensibilidade é feita em função da variação do vetor $\underline{c}$, custo ou receita unitário (INPUT COST), associado ao vetor de variável X . Portanto, a coluna LOWER (UPPER) COST, que indica os limites de variação de $\underline{c}$ sem que haja alteração do valor da solução ótima (ACTIVITY), só é preenchida nestas secções. Quando tais limites são atingidos a variável assume o valor correspondente indicado na coluna LOWER (UPPER) ACTIVITY e a variável indicada na coluna LIMITING PROCESS deixa a base, no caso da secção 2, ou entra na base, no caso da secção 4, no estado indicado na última coluna AT.

A variação da função objetiva ΔZ na coluna UNIT COST é por unidade de variação da solução da variável (ACTIVITY) e tem validade até o limite especificado na LOWER (UPPER) ACTIVITY. Na secção 2 esta variação ΔZ é o próprio vetor de custos relativos que aparece na coluna REDUCED COST da secção 2 (COLUMNS) do SOLUTION.

Pelo visto, os resultados do RANGE permitem análise de sensibilidade da solução ótima para os seguintes casos:

- a. variação do custo ou receita associado a cada variável (secções 2 e 4)
- b. relaxação das restrições metalúrgicas, operacionais ou de disponibilidade (secção 1)

c. variação dos valores das inequações em torno dos respectivos níveis ótimos (secção 3).

Esta análise dos resultados do atual exemplo será tratada no Capítulo VI.

A seguir são apresentados alguns principais resultados de interesse metalúrgico e operacional:

SINTERIZAÇÃO

a. Consumos específicos (Kg / t sinter)

Sinter degradado	-	143,27
Minério de ferro	-	822,90
Minério de manganês	-	15,77
Moinha de carvão	-	117,83
Cal	-	0,88
Calcáreo	-	61,50

b. Composição química (%)

SiO_2	-	3,86
CaO	-	4,80
MnO	-	7,10
P_2O_5	-	0,15
Al_2O_3	-	1,07
Fe	-	63,56

c. Custo do sinter = R\$ 5.524,00 / t

ALTO FORNO

a. Consumos específicos (Kg / t gusa)

Sinter	-	1.511,90
Areia	-	22,27
Calcáreo	-	0,0
Carvão grosso	-	409,39
Carvão fino	-	272,92
Óleo	-	0,0

b. Ar soprado	-	1.139,52 Nm ³ / t gusa
O ₂ injetado	-	14,61 Nm ³ / t gusa
Taxa de enriquecimento de O ₂ no ar		1,0 %

c. Composição química do gusa (%)

P	-	0,13
Mn	-	0,55
Si	-	0,46
C	-	4,60
Fe	-	94,25

d. Peso da escória = 177,31 Kg / t gusa

e. Composição química da escória (%)

SiO ₂	-	41,07
CaO	-	45,10
MgO	-	0,98
Al ₂ O ₃	-	9,69
MnO	-	2,06
FeO	-	1,00

f. Custo do gusa líquido = R\$ 27.110,00 / t

ACIARIA LD

a. Consumos específicos (Kg / t aço)

Gusa sólido	-	0,0
Gusa líquido	-	900,00
Sucata de aço	-	140,67
Sucata tipo A	-	20,00
Sucata tipo B	-	20,00
Cal	-	57,24

b. Consumo de O_2 - 59,25 Nm^3 / t aço

c. Composição química do aço líquido (%)

P	-	0,018
Mn	-	0,200
C	-	0,080
O_2	-	0,500
Fe	-	99,202

d. Peso da escória - 85,0 Kg / t aço

e. Composição química da escória (%)

FeO	-	20,40
MnO	-	3,87
SiO_2	-	15,31
P_2O_5	-	3,41
CaO	-	45,06
HgO	-	3,14

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES

VI . CONCLUSÕES

Foram apresentadas neste trabalho as estruturas básicas de um modelo de otimização dos processos siderúrgicos utilizando Programação Linear. A principal vantagem do modelo consiste em possibilitar um aproveitamento máximo da flexibilidade metalúrgica de uma usina siderúrgica integrada. Isto é, toda vez que houver uma alteração no sistema de produção (reparação de um alto-forno por exemplo) ou de suprimento de matérias-primas, novas composições de semi-produtos podem ser estabelecidas sempre visando o maior retorno global. No exemplo do capítulo anterior, deixando livre a disponibilidade das matérias-primas, foi obtido o teor de Si no gusa líquido, 0,46 % , ligeiramente superior ao nível normal da Usina de Monlevade que é em torno de 0,35 % . Tal composição permite menor consumo de gusa líquido, 900 Kg / t aço contra a média atual de 930 Kg / t aço na Usina, compensando-o com sucata de aço cujo preço é menor. Naturalmente caso seja limitada a disponibilidade de sucata de aço, como acontece frequentemente em certas épocas de falta de sucatas no mercado, uma nova solução ótima será pesquisada.

Por outro lado, este teor de Si no gusa líquido (0,46%) e maior custo de calcário em relação a areia sugerem operar o alto-forno com máxima basicidade permitida na escória, $\%CaO / \%SiO_2 = 45,18 / 41,07 = 1,1$.

Como foi dito no capítulo anterior a análise de sensibilidade do RANGE (ANEXO 3) pode proporcionar algumas conclusões interessantes. Lembrando que as restrições ou variáveis que estão no estado EQ na coluna AT são as equações de balanços de massa e térmico, portanto não podem ser relaxadas mesmo com altos retornos, inicialmente serão analisadas aquelas que estão fora da base.

Começando pela seção 1, no caso da sinterização duas restrições quanto à composição química do sinter podem ser questionadas: A restrição SINT8A que indica o limite inferior do teor de CaO no sinter, $CAOST - 0,048 SINTER \geq 0$, assumiu o valor zero, isto é, $\%CaO$ no sinter = 4,8 % . Entretanto a análise de sensibilidade mostra que o valor da função objetiva (lucratividade global) aumentaria

€ 24.221,50 para cada unidade (t) a menos no valor desta restrição até atingir - 189,04 (convém salientar que a unidade do custo ou receita é 1000 €). A relaxação deste limite inferior implica em admitir menor teor de CaO no sinter, que do ponto de vista metalúrgico seria prejudicial pois dificultaria a aglomeração adequada do minério, gerando muito sinter fino. Quanto à restrição SINT 11A que indica o limite inferior do teor de MnO no sinter, MNSINT - 0,0071 SINTER $\geq$ 0, a análise de sensibilidade mostra que para cada decréscimo de 1 t desta restrição poderá obter-se um aumento de € 25.760,67 na lucratividade global até atingir - 6,03 t. Isto significa admitir menor teor de MnO no sinter, que para Sinterização não seria problema pois a presença de MnO no sinter tem como finalidade principal suprir a necessidade deste elemento no alto-forno para elaboração do gusa líquido. Como não há mudanças de base até o limite de - 6,03 t, todas as outras restrições continuam sendo satisfeitas neste intervalo, inclusive as do alto-forno, portanto a restrição SINT 11A poderá ser revista sem prejuízo às restrições metalúrgicas das fases posteriores de produção.

No caso do alto-forno existem também duas restrições que são de interesse para análise: AF19 e AF 43. A restrição AF19 traduz o limite superior do enriquecimento de O_2 no ar soprado (veja cap. III, secção III.2.1.) que é no máximo 1,0%, 0,01 VTAR - 0,78 VO2 $\geq$ 0. Acima deste limite a temperatura de chama aumenta demasiadamente prejudicando a operação do alto-forno, portanto, embora permita uma alta lucratividade (até - € 234,6 . 10^6 / mês), a relaxação da restrição AF19 é difícil. Quanto a restrição AF43 que representa a proporção mínima de carvão grosso no carvão total enforado no alto-forno, CARGRO - 0,6 CARVAD $\geq$ 0, é previsto até - € 3,3 . 10^6 / mês de aumento de lucratividade com sua relaxação. Embora seja viável, a menor proporção de carvão grosso piora o escoamento de gases dentro do forno dificultando a condução da marcha regular. Portanto esta restrição deve ser revista com cuidado.

Na parte da aciaria LD duas restrições de carregamento de cargas metálicas serão analisadas: ALD26E e ALD26H. Estas restrições representam os limites superiores de enforamento de sucatas do tipo A e B juntas e apenas de sucata B, respectivamente:

0,04 ACO - SUCA - SUCB $\geq$ 0

ALD 26E

0,02 ACO - SUCB $\geq$ 0

ALD 26H

Estes limites foram estabelecidos pelos aciaristas devido às qualidades inferiores dessas sucatas que normalmente apresentam grandes variações nas composições químicas, dificultando o acerto final da composição do aço líquido. Mesmo assim, tendo em vista retornos significativos, até - R\$ 5,6 . 10⁶ / mês para ALD 26E e - R\$ 1,7 . 10⁶ / mês para ALD 26H, um investimento na melhoria de controle de processo pode ser uma alternativa economicamente viável.

A análise de sensibilidade das variáveis não básicas na seção 2 mostra que o consumo de óleo no alto-forno, cuja solução ótima indicou zero, somente será vantajoso caso o preço diminua de R\$ 43,90 / Kg para R\$ 26,67 / Kg. Da mesma forma o enformamento de gusa sólido na aciaria LD seria aconselhável somente quando o preço cair para R\$ 18,15 / Kg.

As seções 3 e 4 do RANGE mostram a variação no valor da função objetiva quando ocorram pequenos desvios em relação à solução ótima. Como são muitas variáveis básicas será comentado apenas um caso para cada seção a título de ilustração:

Na seção 3 a restrição AF42, que representa a capacidade de transporte de matérias primas para alto-forno cujo limite é de 55.600 t/mês, assumiu-se o valor 30.927 t. Isto significa que a capacidade de transporte através do balão ou skip, está suficientemente dimensionada e o fator limitante na produção de gusa neste caso é a capacidade de sopro no ar, como pode ser constatado na seção 2 do SOLUTION. Dessa maneira para cada tonelada a menos no enformamento no alto-forno há uma diminuição de R\$ 9.510,50 na lucratividade global até atingir 29.442 t. Abaixo deste valor a restrição AF19 entra na base, isto é, não seria mais necessário enriquecer o ar com O₂ para atender a demanda de O₂ no alto-forno. Por outro lado o enformamento acima do valor ótimo (30.927 t) acarreta o consumo de calcário (CALCAR entra na base), sem no entanto isso proporcione o aumento correspondente na produção de gusa e conse-

quentemente do aço, dando como resultado uma diminuição de lucratividade de R\$ 2.761,62 para cada t de acréscimo.

Agora na secção 4, o enformamento ótimo de carvão grosso foi de 5.712 t / mês com custo unitário de R\$ 15.230 / t. Caso o preço do carvão grosso aumentasse para R\$ 33.712,94 / t, o seu consumo passará a ser 93,6 t / mês sendo substituído em parte pelo óleo combustível que entra na base. Por outro lado, caso o preço diminuísse para R\$ 14.641,90 / t o consumo aumentará para 7.512 t / mês, fazendo com que a restrição AF43 entre na base, isto é, a proporção de carvão grosso no carvão total enformado superará o mínimo de 60%. Mantendo o preço adotado no exemplo, a lucratividade global diminui R\$ 18.491,94 para cada tonelada de carvão grosso que deixa de ser enformado. Da mesma forma, a redução da lucratividade será de R\$ 588,10 para cada tonelada a mais que a solução ótima.

Conforme visto até agora a análise de sensibilidade através do RANCE permite questionar algumas restrições adotadas no modelo com ponderações econômicas, assim como prever novas soluções na hipótese de mudança dos preços das matérias primas. Ainda através do modelo pode ser diagnosticada a economicidade de alguns insumos de uso comum ou de novas matérias primas, conhecendo-se as suas análises químicas e o grau de participação nas reações dos respectivos processos. Dessa forma, a alternativa econômica entre, por exemplo, o uso de um material exotérmico como FeSi 14/16 e o aumento do teor de Si no gusa líquido, a fim de acertar o balanço térmico do processo LD, pode ser testada.

Como pode ser constatado no exemplo do capítulo anterior, o modelo manipula um grande número de dados. Visando facilitar o levantamento de tais dados de forma sistemática para cada execução do modelo, é conveniente classificá-los em dois grupos: Operacionais e de Suprimento.

Os dados operacionais seriam aqueles inerentes ao sistema de produção, isto é, caracterizam o padrão de processo ou de funcionamento dos equipamentos e normalmente invariáveis durante diversos períodos de otimização. Citando como exemplos: as restrições meta-

lúrgicas dos semi-produtos e das escórias em geral, capacidade de vazão de ar nas ventaneiras do alto-forno, basicidade, a relação $\text{CO}-\text{CO}_2$ nos gases do alto-forno e da aciaria LD, perdas térmicas, etc. Tais dados refletem-se diretamente na confiabilidade dos resultados portanto devem ser obtidos após vários balanços materiais e térmicos, utilizando-se o modelo apresentado.

Os dados de suprimento constituem o universo das restrições que caracterizam um dado período em que se procura obter uma estratégia ótima de produção, portanto devem ser fornecidos para cada execução do modelo. Os preços unitários, disponibilidades e composições químicas das matérias primas são exemplos dos dados de suprimento.

ANEXO 1

ANEXO I

	Al	Ca	C	H	Fe	Mg	Mn	N
mol	26,98	40,08	12,011	1,008	55,85	24,32	54,94	14,008
	O	P	Si	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	MgCO ₃
mol	16	30,975	28,09	60,09	159,7	101,96	100,091	84,331
	FeO	H ₂ O	CO	CO ₂	MnO	CaO	MgO	Fe ₃ O ₄
mol	71,85	18,016	28,011	44,011	70,94	56,08	40,32	231,55
	P ₂ O ₅							
mol	141,95							

TABELA 1: Peso atômico e molecular das principais substâncias envolvidas na elaboração do gusa e do aço.

Fonte: ref.(9)

SUBST.	H ₂₉₈ ^o K	cal / mol
CO	26.416	
CO ₂	94.052	
H ₂ O	57.798	
SiO ₂	209.750	
MnO	92.050	
P ₂ O ₅	351.650	
FeO	63.500	
Fe ₂ O ₃	196.200	
Fe ₃ O ₄	266.800	
CaO	151.600	
Si + O ₂ + 2CaO = Ca ₂ SiO ₄	551.400	*
P ₂ O ₅ + 3CaO = Ca ₃ P ₂ O ₈	986.200	**

TABELA 2: Calor de formação de principais substâncias
Fontes: ref(9), * ref(15), ** ref (11)

SUBST.	$H_T - H_{298^0K}$	Cal / mol
O_2	$7,16T + 0,50 \cdot 10^{-3}T^2 + 0,40 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 2313$	
N_2	$6,83T + 0,45 \cdot 10^{-3}T^2 + 0,12 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 2117$	
H_2O	$7,30T + 1,23 \cdot 10^{-3}T^2 - 2286$	
C	$4,03T + 0,57 \cdot 10^{-3}T^2 + 2,04 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 1936$	
H_2	$6,52T + 0,39 \cdot 10^{-3}T^2 - 0,12 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 1938$	
CO	$6,79T + 0,49 \cdot 10^{-3}T^2 + 0,11 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 2105$	
CO_2	$10,57T + 1,05 \cdot 10^{-3}T^2 + 2,06 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} - 3936$	
MnO	$13,90T - 5670$	*
FeO	$16,30T - 1200$	*
CaO	$13,50T - 5520$	*
MgO	$12,60T - 5070$	*
SiO_2	$14,41T - 0,97 \cdot 10^{-3}T^2 - 4455$	
P_2O_5	$1/2 (73,60T - 6570)$	
Ca_2SiO_4	$49,0T - 19110$	*
$Ca_3P_2O_8$	$79,0T - 18600$	*

TABELA 3: Calor sensível de principais substâncias

Fontes: ref(10) , * ref.(15)

ANEXO

2

MPX/370 R1.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINI-AF-LD

SECTION 1 - ROWS

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	...LOWER LIMIT...	...UPPER LIMIT...	DUAL ACTIVITY
1	FORJT	BS	323040.37045	323040.37045	NONE	NONE	1.00000
2	SINI1	EQ	.	.	.	.	4.57671-
3	SINI2	EQ	.	.	.	.	12.72425-
4	SINI3	EQ	.	.	.	.	2.62314
5	SINI4	EQ	.	.	.	.	4.18324-
6	SINI5	EQ	.	.	.	.	1.47951
7	SINI6	BS	77.42635	77.42635-	NONE	NONE	.
8	SINI7	BS	133.53984	133.53984-	NONE	NONE	10.18398
9	SINI8	EQ	.	.	.	.	24.22150
10	SINI9	LL	84.38647	84.38647-	NONE	NONE	7.75291
11	SINI10	EQ	.	.	.	.	26.25942
12	SINI11	EQ	.	.	.	.	25.76058
13	SINI12	LL	29.53527	29.53527-	NONE	NONE	2.04242-
14	SINI13	BS	24.87540	24.87540-	NONE	NONE	8.10713-
15	SINI14	EQ	258.43070	258.43070-	NONE	NONE	9.86430
16	SINI15	EQ	752.12514	752.12514-	NONE	NONE	13.33178-
17	SINI16	EQ	.	.	.	.	6.01674-
18	SINI17	EQ	.	.	.	.	13.60385
19	SINI18	EQ	.	.	.	.	6.13953
20	SINI19	EQ	.	.	.	.	2.08411-
21	AF1	EQ	.	.	.	.	.50391
22	AF2	EQ	.	.	.	.	14.32400-
23	AF3	EQ	.	.	.	.	8.27279-
24	AF4	EQ	.	.	.	.	9.27279-
25	AF5	RS	.	.	.	.	1.51011
26	AF6	EQ	.	.	.	.	14.75168-
27	AF7	EQ	.	.	.	.	12.13375
28	AF8	EQ	.	.	.	.	13.53242-
29	AF9	EQ	.	.	.	.	107.27057
30	AF10	EQ	.	.	.	.	20.38335
31	AF11	EQ	.	.	.	.	.07453
32	AF12	EQ	.	.	.	.	.00635
33	AF13	EQ	.	.	.	.	13.67821-
34	AF14	EQ	.	.	.	.	.00182
35	AF15	EQ	.	.	.	.	128.53541
36	AF16	EQ	.	.	.	.	123.52941
37	AF17	EQ	.	.	.	.	13.52553
38	AF18	LL	.	.	.	.	4.77568-
39	AF19	EQ	.	.	.	.	17.18532
40	AF20	EQ	.	.	.	.	32.40711
41	AF21	EQ	.	.	.	.	23.34082-
42	AF22	EQ	.	.	.	.	.
43	AF23	EQ	.	.	.	.	.
44	AF24	EQ	.	.	.	.	.
45	AF25	EQ	.	.	.	.	.
46	AF26	EQ	.	.	.	.	.
47	AF27	EQ	.	.	.	.	.

MPSX/370 RI.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LO

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	...LOWER LIMIT...	...UPPER LIMIT...	DUAL ACTIVITY
50	AF28A	BS	4.73744	4.73744-			NONE
51	AF28B	BS	330.13992	330.13992-			NONE
52	AF29A	RS	34.81603	34.81603-			NONE
53	AF29B	RS	481.42322	481.42322-			NONE
54	AF30A	BS	37.12104	37.12104-			NONE
55	AF30B	BS	18.49185	18.49185-			NONE
56	AF30C	BS	83.65011	83.65011-			NONE
57	AF30D	BS	27.93567	27.93567-			8.27278-
58	AF31	EQ					1.51011
59	AF32	EQ					21.87644-
60	AF33	EQ					
61	AF34A	BS	304.92390	304.92390-			NONE
62	AF34B	LL					NONE
63	AF35A	BS	381.41961	381.41961-			NONE
64	AF35B	BS	1013.90270	1013.90270-			NONE
65	AF36	EQ					6.3532-
66	AF37	EQ					8.84191-
67	AF38	EQ					343.41829-
68	AF39	EQ					58.10847-
69	AF40	EQ					107.27057
70	AF41	EQ					107.27057-
71	AF42	BS	30927.71611	24672.28389	NONE	55600.00000	5.6378
72	AF43	LL					NONE
73	AF44	BS	1904.08117	1904.08117-			380.58-
74	AF45	EQ					0.2501
75	AF46	EQ					0.2501
76	AF47	EQ					0.2501
77	AF48	EQ					85.66731-
78	AF49	EQ					0.2501-
79	AF50	EQ					634.24-
80	AF51	EQ					54282-
81	AF52	EQ					0.2501-
82	AF53	EQ					0.2501
83	AF54	EQ					0.2501
84	AF55A	LL					0.2501
85	AF55B	BS	4185966.90325	4185966.90325-			21.81756
86	ALD1	EQ					54.48950
87	ALD2	EQ					115.64393
88	ALD3A	EQ					56.01342
89	ALD3B	EQ					58.06342
90	ALD3C	EQ					324.81000
91	ALD4	EQ					14.35679
92	ALD5	EQ					5.72773-
93	ALD6	EQ					18.87159
94	ALD7	EQ					34.75774
95	ALD8	EQ					41.75153
96	ALD9	EQ					97.24259
97	ALD10	EQ					29.21557
98	ALD11	EQ					19.14460
99	ALD12	EQ					14.56345
100	ALD12A	EQ					

MPSX/370 RL.6 OYIMIZACAO DO PRODC. SINT-AF-LO

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	...LOWER LIMIT...	...UPPER LIMIT...	DUAL ACTIVITY
101	ALD128	EQ	.	.	.	.	37.77224
102	ALD12C	EQ	.	.	.	.	24.81223-
103	ALD13	EQ	.	.	.	.	25.70945
104	ALD14	EQ	.	.	.	.	33.70795
105	ALD15	EQ	.	.	.	.	56.91674
106	ALD16	EQ	.	.	.	.	67.24259
107	ALD1AA	EQ	.	.	.	.	19.14450
108	ALD17	EQ	.	.	.	.	31.97971
109	ALD19A	LL	.	.	.	.	NONE
110	ALD1B3	BS	77.51791	77.51791-	.	.	NONE
111	ALD19A	BS	156.94202	156.94202-	.	.	NONE
112	ALD193	LL	.	.	.	.	14.45363
113	ALD20A	BS	12.12250	12.12250-	.	.	NONE
114	ALD209	BS	41.72349	41.72349-	.	.	NONE
115	ALD21A	BS	2.01486	2.01486-	.	.	NONE
116	ALD213	BS	55.10031	55.10031-	.	.	NONE
117	ALD22A	LL	.	.	.	.	310.47321
118	ALD223	BS	35.58072	35.58072-	.	.	NONE
119	ALD23A	BS	77.01197	77.01197-	.	.	NONE
120	ALD233	LL	.	.	.	.	12.56185
121	ALD24	EQ	.	.	.	.	74565-
122	ALD25	EQ	.	.	.	.	5.72773-
123	ALD25A	EQ	.	.	.	.	.
124	ALD260	EQ	.	.	.	.	NONE
125	ALD26C	BS	98.06501	98.06501-	.	.	NONE
126	ALD262	BS	156.13202	156.13202-	.	.	NONE
127	ALD26E	LL	.	.	.	.	12.40301
128	ALD26F	LL	.	.	.	.	32.00775
129	ALD26G	BS	3643.34156	3643.34156-	.	.	NONE
130	ALD26H	LL	.	.	.	.	5.67101
131	ALD27	EQ	.	.	.	.	.
132	ALD28	EQ	.	.	.	.	.
133	ALD29	EQ	.	.	.	.	.
134	ALD30	EQ	.	.	.	.	.
135	ALD31	EQ	.	.	.	.	.
136	ALD32	EQ	.	.	.	.	00535-
137	ALD33	EQ	.	.	.	.	.

MPSK/370 R1.6 OTIMIZACAO DO PRDC. SINT-AF-LD

SECTION 2 COLUMNS

NUMBER COLUMNS AT ACTIVITY: INPUT COST: LOWER LIMIT: UPPER LIMIT: REDUCED COST:

136	FIVAF	RS	3022.5059	2.45000-	NONE	
139	MFEST	RS	17160.3092	5.42000-	NONE	
140	KNSY	RS	332.60164		NONE	
141	CAPCAMT	RS	19747.03450		NONE	
142	CARVADST	RS	2.85.84970	12.45000-	NONE	
143	CALST	RS	187.41263	12.03000-	NONE	
144	CALCARST	RS	1267.46453	1.66000-	NONE	
145	SINTER	RS	21096.61871	2.42800-	NONE	
146	SISINT	RS	315.80700		NONE	
147	CACST	RS	1012.61770		NONE	
148	MNSINT	RS	149.75494		NONE	
149	FUSST	RS	32.0947		NONE	
150	ALURST	RS	226.74153		NONE	
151	PRKROST	RS	13410.09436		NONE	
152	FEOST	RS	2845.57730		NONE	
153	FFO3ST	RS	16342.2344		NONE	
154	FE3	RS	2895.6473		NONE	
155	ARE14	RS	310.69154	61000-	NONE	2.46042-
156	CALCAR	LL		1.93000-	NONE	
157	CARGU	RS	5712.24352	15.23000-	NONE	
158	CARFIN	RS	3803.16234	12.46000-	NONE	
159	FE3	RS	16057.16075		NONE	
160	PC5	RS	42.42714		NONE	
161	MAG	RS	150.15629		NONE	24.66956-
162	CAC03	LL			NONE	13.21215-
163	CAGAF	RS	1118.05430		NONE	
164	MCC03	LL			NONE	
165	MCCAF	RS	24.37224		NONE	
166	ALUMIN	RS	234.77245		NONE	
167	SILIES	RS	1126.51474		NONE	
168	UMIDADE	RS	1078.44363		NONE	
169	COVOL	RS	795.24303		NONE	
170	COVOL2	RS	717.26738		NONE	
171	CARVOL	RS	532.15400		NONE	
172	CLEN	LL		43.40000-	NONE	17.23150-
173	CARGOAF	RS	6025.55523		NONE	
174	VIAR	UL	1560000.0000	30092-	NONE	62032
175	VO2	RS	203646.15385	20335-	NONE	
176	VI02	RS	3542645.13383		NONE	
177	VI02	RS	12561000.0000		NONE	
178	VI02	RS	236.50000		NONE	
179	HI02VL	PS	226.25137		NONE	
180	HI0206	RS	255.74872		NONE	
181	FERED	RS	13151.01013		NONE	
182	PCSPED	RS	18.45066		NONE	
183	WRED	RS	76.67570		NONE	
184	STRED	RS	64.02748		NONE	
185	CARGUSA	RS	641.51103		NONE	
186	GUSA	RS	13953.22501	8.09110-	NONE	

MPSX/370 RL.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINI-AF-LD

NUMBER COLUMNS AT ACTIVITY... INPUT COST... LOWER LIMIT... UPPER LIMIT... REDUCED COST...

187	FEDES	RS	24.74403	.	.	NONE
188	SIESCOR	RS	1015.41300	.	.	NONE
189	ESCORAF	RS	2474.40306	.	.	NONE
190	CAPVAD	RS	9520.40526	.	.	NONE
191	POFIRA	RS	618.55432	.	.	NONE
192	HIRED	RS	102.25949	.	.	NONE
193	PH2	RS	153.44923	.	.	NONE
194	OXIGEN	RS	10921.15686	.	.	NONE
195	CARGAS	RS	5015.49024	.	.	NONE
196	CALVENI	RS	454811.02429	.	.	NONE
197	CALFURAF	RS	13847802.4829	.	.	NONE
198	CALGANG	RS	521106.54319	.	.	NONE
199	CAREG	RS	1333.53113	.	.	NONE
200	PCO	RS	9494.05541	.	.	NONE
201	PCO2	RS	9343.10276	.	.	NONE
202	CALGAS	RS	940515.47255	.	.	NONE
203	CALCONS	RS	12452540.1917	.	.	NONE
204	CALPERAF	RS	1395322.30138	.	.	NONE
205	SUCATA	RS	2304.98506	19.03000-	.	NONE
206	SUCA	RS	110.07152	7.13580-	.	NONE
207	SUCO	RS	110.07162	3.35980-	3.72864-	NONE
208	CO2SOL	LL	.	261.07332	.	NONE
209	WNEVF	RS	104.41216	.	.	NONE
210	FOSENF	RS	22.35984	.	.	NONE
211	SIFSC	RS	68.48497	.	.	NONE
212	CL	RS	887.42146	12.03000-	.	NONE
213	SIFES	RS	94.15596	.	.	NONE
214	SIFEF	RS	230.68203	.	.	NONE
215	REVEST	RS	34.38706	304.97000-	.	NONE
216	MGO	RS	39.53413	.	.	NONE
217	CAD	RS	576.56152	.	.	NONE
218	CARON	RS	545.27632	.	.	NONE
219	FESAC	RS	15871.65536	.	.	NONE
220	MADERO	RS	35.67764	.	.	NONE
221	FUPERO	RS	9.87970	.	.	NONE
222	SIPERO	RS	33.63203	.	.	NONE
223	FEPERD	RS	214.26740	.	.	NONE
224	FEACO	RS	15375.86252	.	.	NONE
225	LACO	RS	12.40226	.	.	NONE
226	VVACO	RS	31.00716	.	.	NONE
227	FOGACC	RS	2.75034	51.00000	.	NONE
228	ACU	RS	15903.59112	.	.	NONE
229	FESC	RS	277.52951	.	.	NONE
230	WRESC	RS	37.72734	.	.	NONE
231	SILICO	RS	192.52452	.	.	NONE
232	FOSES	RS	15.63950	.	.	NONE
233	ESCOR	RS	1317.90440	.	.	NONE
234	SIAUX	RS	56.02054	.	.	NONE
235	CO	RS	938.41440	.	.	NONE
236	CO2	RS	94.45875	.	.	NONE
237	SUCENF	RS	2615.06053	.	.	NONE

MPSX/370 R1.6 OTIMIZACAO DC PROC. SINT-AF-LD

NUMBER	COLUMNS	AT	ACTIVITY	INPUT COST	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	REDUCED COST
238	CAPACX	BS	5230.12137	.	.	NONE	.
239	CALFOR	BS	708952.58104	.	.	NONE	.
240	CAGE3	BS	168.44375	.	.	NONE	.
241	ENTF3	BS	532381.95537	.	.	NONE	.
242	ENTGAS	BS	714104.40117	.	.	NONE	.
243	ENTFUM	BS	144303.11054	.	.	NONE	.
244	CALPIRD	BS	142694.71759	.	.	NONE	.
245	VAD2	BS	918694.72356	.00535	.	NONE	.

ANEXO 3

MPSX/370 RL-6 OTIMIZACAO DO PROCC. SINT-AF-LD

NUMBER	...RON...	AT	...ACTIVITY...	STACK ACTIVITY	LOWER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	PROCESS	LIMITING AT
25	AF2	EQ				755.58314 8747.73145	6.13953 6.12923			ALD21A AF35B	LL LL
26	AF3	EQ				52.97103 10.86439	2.08411 2.08411			ALD20A AF28A	LL LL
27	AF4	EQ				117.63100 5.49709	.50891 .50891			ALD20A ALD21A	LL LL
29	AF6	EQ				509.13525 196.31146	14.12400 14.12400			AF35B AF35A	LL LL
31	AF8	EQ				979.71289 24.37411	8.27278 8.27278			AF35B MGOAF	LL LL
32	AF9	EQ				979.71289 240.91293	8.27278 8.27278			AF35B ALUMIN	LL LL
33	AF10	EQ				273.57202 24439.55156	1.51011 1.51011			AF35A AF42	LL UL
34	AF11	EQ				13405.82227 1104.13770	14.79188 14.79188			CAPEG CMIDADE	LL LL
35	AF12	EQ				28694.81250 788.21283	12.12374 12.12374			CAPEG CCVOL	LL LL
36	AF13	EQ				27577.75345 715.62634	13.55242 13.55242			AF35B COVCL2	LL LL
37	AF14	EQ				2270.65625 541.55508	107.27051 107.27051			PCO CARVOL	LL LL
38	AF15	EQ				8201.58203 16297.56641	20.35325 20.35325			AF29A AF42	LL UL
39	AF16	EQ				3355955.00000 3542845.00000	.07463 .07463			AF42 VTC2	UL LL
40	AF17	EQ				60275152.00000 12561000.00000	.00605 .00605			AF42 VTN2	UL LL
41	AF18	EQ				2042.95522 735.69995	13.67822 13.67822			CAPEG UMIAR	LL LL
42	AF19	LL			NONE	2641624.00000 159000.00000	.05332 .05332			AF42 VDC	UL LL
43	AF21	EQ				1355.70160 230.76140	126.62539 126.62539			CAPEG MIDVCL	LL LL

MPSX/370 RI.6									
OPIMIZACAO DO PROG. SINT-AF-LO									
NUMBER ...ROW... AT ...ACTIVITY... SLACK ACTIVITY									
LIMITING AT									
PROCESS. AT									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									
COST..									

MPSX/370 R1.6 QYIMIZACAD DD PROC. SINI-AF-LD

PAGE 31 82/305

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	LOWER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	...UNIT COST...	...LOWER COST...	...UPPER COST...	LIMITING AT
92	ALD5	EQ				575.61377-	14.35679				CAL LL
						2088.71851	14.35679				CALPERD LL
93	ALD6	EQ				INFINITY-	5.72773				CALPERD LL
						81.88634	5.72773				ALD21A LL
94	ALD7	EQ				674.88481-	18.87158				ALD26C LL
						97.42798	18.87158				ALD21A LL
95	ALD8	EQ				35.73160-	34.75773				ALD21A LL
						2.01483	34.75773				ALD21A LL
96	ALD9	EQ				67475-	61.79153				FCPERD LL
						18.56013	61.79153				FCSEFS LL
97	ALD10	EQ				32.19405-	67.24253				SI2PERD LL
						13.21430	67.24253				AF308 LL
98	ALD11	EQ				211.34949-	20.21556				FCPERD LL
						96.11271	20.21556				ALD26C LL
99	ALD12	EQ				665.55664-	19.14490				ALD21A LL
						96.11271	19.14490				ALD26C LL
100	ALD12A	EQ				21.04244-	14.56345				WNACC LL
						2.00979	14.56345				ALD21A LL
101	ALD12B	EQ				2.79125-	37.77224				FCSEFS LL
						18.66349	37.77224				FCSEFS LL
102	ALD12C	EQ				12.40295-	24.88223				CACC LL
						80.43555	24.88223				CALPERD LL
103	ALD13	EQ				53.48224-	25.70942				ALD20A LL
						159.55054	25.70942				AF308 LL
104	ALD14	EQ				39.51604-	33.70735				ALD20A LL
						2.01483	33.70735				ALD21A LL
105	ALD15	EQ				22.26065-	56.81672				ALD20A LL
						18.66913	56.81672				FCSEFS LL
106	ALD16	EQ				29.23669-	67.24258				CALPERD LL
						33.71450	67.24258				AF308 LL
107	ALD16A	EQ				99.17428-					CAUTS LL
						70.02685					SI40X LL
108	ALD17	EQ				665.55664-	19.14449				ALD21A LL
						96.11267	19.14449				ALD26C LL

MP5X/370 R1.6 OTIMIZACAO DO PRDC. SINT-AF-LD

NUMBER	---ROW---	ACTIVITY	SLACK	ACTIVITY	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	PROCESS	LIMIT
109	ALD18A	LL			NONE		315.0387-	76.11330	31.57971-			CALPERD	LL
									31.57971-			ALD21A	LL
112	ALD19B	LL			NONE		37.57057-		14.45362-			ALD20A	LL
							113.56424		14.45362-			AF308	LL
117	ALD22A	LL			NONE		34.06803-		310.47314			REVEST	LL
							35.57715		310.47314-			ALD22B	LL
120	ALD23B	LL			NONE		51.02207-		12.55186-			ALD20A	LL
							84.55165		12.55186-			ALD23A	LL
121	ALD24	EQ					3607.57871-		7.75569-			CO	LL
							203.14362		7.75569			CALPLER3	LL
122	ALD25	EQ					INFINITY-		5.72773-			NONE	LL
							81.62634		5.72773			CALPERD	LL
123	ALD26A	EQ					93.06601-					ALD26C	LL
							2615.06152					SUCENF	LL
124	ALD26B	EQ					196.13202-					ALD26D	LL
							5239.12109					CAPACK	LL
127	ALD26E	LL			NONE		456.79053-		12.40831-			ALD26C	LL
							124.39632		12.40831-			ALD21A	LL
128	ALD26F	LL			NONE		103.59179-		32.00775-			ALD26C	LL
							2065.11157		32.00775-			SUCATA	LL
130	ALD26H	LL			NONE		310.42794-		5.62101-			SUCA	LL
							106.20093		5.62101-			ALD26D	LL
131	ALD27	EQ					INFINITY-					NONE	LL
							150994.62500					CALPERD	LL
132	ALD28	EQ					371.79519-					CALPERD	LL
							169.44374					CACFS	LL
133	ALD29	EQ					142694.64750-					CALPERD	LL
							592381.75000					ENTES	LL
134	ALD30	EQ					142694.64750-					CALPERD	LL
							716104.00000					ENTGAS	LL
135	ALD31	EQ					142694.64750-					CALPERD	LL
							144568.12500					ENTFUM	LL
136	ALD32	EQ					INFINITY-					NONE	LL
							142694.64750					CALPERD	LL

MPSX/370 R1.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LD

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	LIMITING AT	PROCESS AT
137	ALD33	ED					INFINITY		.00535			MCNE	LL
							918699.50000		.00535			VAD2	

MPX/370 RI.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LD

SECTION 2 - COLUMNS AT LIMIT LEVEL

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	INPUT COST	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	LIMITING PROCESS	AT
156	CALCAR	LL		1.93000	NONE				2.46042	INFINITY	AF5	AF5	LL
									2.46042				UL
162	CACU3	LL			NONE				24.66936	INFINITY	AF5	AF5	LL
									24.66936				UL
164	W6C03	LL			NONE				13.21214	INFINITY	AF7	AF7	LL
									13.21214				UL
172	OLE0	LL		63.89779	NONE		2741.90420		17.23159	INFINITY	DM?	DM?	LL
							6020.53510		17.23159				UL
174	VIAR	UL	1590000.0000	.00002	1600000.0000	28584004.0000			.02032	INFINITY	AF42	AF42	LL
									.02032				UL
208	GUS9L	LL		21.87700	NONE		106.27040		3.72554	INFINITY	AL0260	AL0260	LL
							2510.22700		3.72554				UL

MPSX/370 RL.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AS-LD

SECTION 3 - ROWS AT INTERMEDIATE LEVEL

NUMBER ... AT ... ACTIVITY ... SLACK ACTIVITY ... LOWER LIMIT ... UPPER LIMIT ... UNIT COST ... LOWER COST ... UPPER COST ... LIMITING AT PROCESS.

7	SINT6A	BS	77.42635	77.42635	NONE	76.82762	77.83207	1272.74756	2804.13477	ALD198	SINT11A	LL	AF43
8	SINT6B	BS	133.53953	133.53953	NONE	132.73169	134.40417	2036.36930	424.34263	ALD198	SINT11A	LL	AF43
11	SINT93	BS	34.38647	34.38647	NONE	305.04675	34.82965	29.28494	2389.34814	SINT18A	AF43	LL	AF43
15	SINT11B	BS	29.52825	29.52826	NONE	38.94715	29.06017	25.80043	6826.70365	SINT11A	AF43	LL	AF43
17	SINT13	BS	24.97540	24.87540	NONE	24.72495	25.03825	10932.10742	4778.87152	ALD198	SINT11A	LL	AF43
19	SINT15	BS	258.43036	258.43051	NONE	246.95567	259.55394	1052.27631	616.18112	ALD198	SINT11A	LL	AF43
21	SINT17	BS	752.12500	752.12500	NONE	717.27049	756.07494	21.06292	268.03559	SINT11A	AF43	LL	AF43
28	AF5	BS				872.12136		24.67916	2.66625	CACD3	CALCAR	LL	AF43
30	AF7	BS				1839.71582		13.21214	1244.94959	WCCD3	CALCAR	LL	AF43
50	AF28A	BS	4.73744	4.73744	NONE	0.7497	5.57352	21931.27800	1258.46575	CLFC	AF43	LL	AF43
51	AF28B	BS	330.13959	330.13987	NONE	314.72520	330.99469	316.16211	1291.37789	ALD198	SINT11A	LL	AF43
52	AF29A	BS	34.31503	34.31503	NONE	24.59581	49.74612	7473.16602	51.03938	ALD198	SINT11A	LL	AF43
53	AF29B	BS	481.45119	481.45319	NONE	466.48594	483.84460	50.91266	442.76894	SINT11A	AF43	LL	AF43
54	AF30A	BS	37.12103	37.12102	NONE	35.20428	55.53481	471.37791	89.37607	ALD198	SINT11A	LL	AF43
55	AF30B	BS	18.6185	18.59135	NONE	5.55580	20.30459	88.04645	472.50189	ALD198	SINT11A	LL	AF43
56	AF30C	BS	83.64009	83.64009	NONE	77.08930	84.82730	274.07275	913.08229	ALD198	SINT11A	LL	AF43

MPSX/370 RI-6 OTIMIZACAO DO PROC. SINI-AF-LO

NUMBER	...ROW...	AT	...ACTIVITY...	SLACK	ACTIVITY	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	...UNIT COST...	...UNIT COST...	...LIMITING AT PROCESS...
57	AF300	BS	27.93567	27.93567	NONE	NONE	NONE	26.99043	33.38433	806.17114	302.04663	SINT11A ALD19B
58	AF300	BS	27.93567	27.93567	NONE	NONE	NONE	470.65820	8.27830	8.27830	8.27830	AF34R
59	AF34A	BS	304.92389	304.92389	NONE	NONE	NONE	327.94845	88.64044	88.64044	88.64044	SINT12A
60	AF35A	BS	381.41959	381.41959	NONE	NONE	NONE	117.38893	393.51025	393.51025	393.51025	OLEC
61	AF35A	BS	381.41959	381.41959	NONE	NONE	NONE	771.56725	6.45970	6.45970	6.45970	AF34B
62	AF35B	BS	1013.90234	1013.90234	NONE	NONE	NONE	515.28177	6.32628	6.32628	6.32628	AF34B
63	AF35B	BS	1013.90234	1013.90234	NONE	NONE	NONE	1363.19806	297.45219	297.45219	297.45219	OLEC
64	AF35B	BS	30927.71875	29572.28125	NONE	NONE	NONE	29642.30559	9.51050	9.51050	9.51050	AF19
65	AF42	BS	1904.08105	1904.08105	NONE	NONE	NONE	30927.71875	2.78152	2.78152	2.78152	CALCAR
66	AF44	BS	1904.08105	1904.08105	NONE	NONE	NONE	1851.05537	55612	55612	55612	AF43
67	AF44	BS	1904.08105	1904.08105	NONE	NONE	NONE	1938.56038	2090.12402	2090.12402	2090.12402	GUSCL
68	AF55B	BS	4135950.00000	4135950.00000	NONE	NONE	NONE	5883810.00300	0.01478	0.01478	0.01478	AF55A
69	AF55B	BS	4135950.00000	4135950.00000	NONE	NONE	NONE	4206720.46094	0.05100	0.05100	0.05100	AF55A
70	ALD18B	BS	77.51793	77.51793	NONE	NONE	NONE	1.26953	31.92300	31.92300	31.92300	ALD19A
71	ALD18B	BS	77.51793	77.51793	NONE	NONE	NONE	77.90241	2753.86672	2753.86672	2753.86672	AF43
72	ALD19A	BS	154.84192	154.84192	NONE	NONE	NONE	43.20626	14.36836	14.36836	14.36836	ALD19B
73	ALD19A	BS	154.84192	154.84192	NONE	NONE	NONE	163.51516	260.63517	260.63517	260.63517	ALD19A
74	ALD20A	BS	12.12250	12.12250	NONE	NONE	NONE	9.10361	252.16748	252.16748	252.16748	SINT11A
75	ALD20A	BS	12.12250	12.12250	NONE	NONE	NONE	47.04910	47.12077	47.12077	47.12077	ALD19B
76	ALD20B	BS	41.72046	41.72046	NONE	NONE	NONE	56.27450	46.43249	46.43249	46.43249	ALD19B
77	ALD21A	BS	2.01485	2.01485	NONE	NONE	NONE	94.73488	252.79260	252.79260	252.79260	SINT11A
78	ALD21A	BS	2.01485	2.01485	NONE	NONE	NONE	2.49073	755.11133	755.11133	755.11133	ALD20B
79	ALD21B	BS	55.10028	55.10028	NONE	NONE	NONE	11.88734	77.14385	77.14385	77.14385	SINT11A
80	ALD21B	BS	55.10028	55.10028	NONE	NONE	NONE	46.22362	461.83982	461.83982	461.83982	ALD20B
81	ALD22B	BS	35.54072	35.54072	NONE	NONE	NONE	61.37045	310.44726	310.44726	310.44726	ALD18A
82	ALD22B	BS	35.54072	35.54072	NONE	NONE	NONE	130.79359	1221.28748	1221.28748	1221.28748	ALD22A
83	ALD23B	BS	77.01196	77.01196	NONE	NONE	NONE	37.57376	13.87305	13.87305	13.87305	ALD19B
84	ALD23B	BS	77.01196	77.01196	NONE	NONE	NONE	47.27294	120.51726	120.51726	120.51726	ALD23B
85	ALD26A	BS	98.06501	98.06501	NONE	NONE	NONE	40.62304	6.05778	6.05778	6.05778	ALD19B
86	ALD26A	BS	98.06501	98.06501	NONE	NONE	NONE	2415.12861	4.04041	4.04041	4.04041	ALD26A
87	ALD26B	BS	196.13202	196.13202	NONE	NONE	NONE	2319.30456	3.06364	3.06364	3.06364	ALD26B
88	ALD26B	BS	196.13202	196.13202	NONE	NONE	NONE	2319.30456	4.40754	4.40754	4.40754	GUSCL

OTIMIZACAO DE PROC. SINT-AF-LD

MPSX/370 R1.6

NUMBER ...RON... AT

129 ALD26G

BS

3643.34155

3643.34155

NONE

1045-10840
3661-41345

25-45252-
58-56372-

ALD26F
AF43

LIMITING AT
PROCESS. AT

..LOWER COST..
..UPPER COST..

..UNIT COST..
..UNIT COST..

LOWER ACTIVITY
UPPER ACTIVITY

..LOWER LIMIT..
..UPPER LIMIT..

SLACK ACTIVITY

..ACTIVITY...

..ACTIVITY...

..ACTIVITY...

NPSX/370 81.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LD

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	LIMITING PROCESS
154	FED	85	2495.64575			2490.54242	2503.75213	109.96608	109.96608	80.79221	AF43
155	AFR1A	85	310.69141	61000		310.69141	733.54058	72.31555	72.31555	5.35661	AF43
157	CARGO	85	5712.24219	15.23000		5712.24219	7512.75467	18.48194	18.48194	33.72194	AF43
158	CARFIN	85	3808.16211	12.46000		3817.12176	1045.08201	54856	54856	13.03965	AF43
159	FED3	85	16057.16016			15981.55420	16135.34734	17.21479	17.21479	13.50846	AF43
160	PCS	85	42.82919			40.78170	44.91510	5897.22813	5897.22813	6897.32813	AF19
161	MNO	85	150.35029			149.21121	179.26130	1981.27061	1981.27061	26.05934	AF43
163	CADAF	85	1118.35371			1111.75482	1202.46973	261.27575	261.27575	24.25544	AF43
165	MODAF	85	24.37224			24.37224	39364	4334.04682	4334.04682	33.12312	AF43
166	ALUMIN	85	239.77283			235.92001	243.42149	1254.99829	1254.99829	731.58105	AF19
167	SIL1ES	85	1155.51553			1101.04940	1527.24305	259.26724	259.26724	6.78402	AF43
168	UMICAGE	85	1078.84277			954.18370	1078.84277	8.45294	8.45294	53.13213	AF43
169	COVCL	85	785.24304			12.87573	792.97454	134.51941	134.51941	136.95817	AF43
170	COVCL2	85	717.26733			11.76123	724.23254	147.26782	147.26782	152.02613	AF43
171	CARVOL	85	532.15392			9.72981	532.15393	194.45303	194.45303	139.10354	AF43
173	CARBOAF	85	6025.65527			5719.75067	6036.90439	46.06034	46.06034	74.31291	AF19
175	VO2	85	20394.512500	00535		3258798.87500	20364.12500	04928	04928	INFINITY	AF19

MPSX/370 R1.6 OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AP-LO

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	LOWER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER CEST	PROCESS	AT
176	VT02	95	3542846.00000	NONE	338999.87500	INFINITY	0.6928-	INFINITY	AF19	NONE
177	VTN2	95	12561000.0000	NONE	12561000.0000	INFINITY	0.2512-	INFINITY	VTAR	NONE
178	UMIAR	95	238.45598	NONE	238.45998	INFINITY	1354.4688-	INFINITY	VTAR	NONE
179	HIOVCL	95	229.29130	NONE	231.59380	INFINITY	460.78263-	460.78263-	OLEC	LL
180	HIDROG	95	255.74872	NONE	244.09129	INFINITY	494.26664-	494.26664-	AF43	LL
181	FIRED	95	13151.00781	NONE	814.09589	INFINITY	1211.42886-	1211.42886-	AF19	LL
182	FOSRED	95	18.65068	NONE	15072.50441	INFINITY	186.08211-	186.08211-	OLEC	LL
183	WRRED	95	76.87588	NONE	13215.97056	INFINITY	20.56407-	20.56407-	AF43	LL
184	SIREO	95	65.02748	NONE	17.79713	INFINITY	16.32513-	16.32513-	AF19	LL
185	CASGUSA	95	641.21895	NONE	19.60095	INFINITY	12809.05489-	12809.05489-	AF43	LL
186	GUSA	95	13953.22268	NONE	91.60273	INFINITY	1163.26899-	1163.26899-	AF43	LL
187	FEDES	95	24.74403	NONE	76.24259	INFINITY	3239.28943-	3239.28943-	AF19	LL
188	SIESCOR	95	1016.41248	NONE	63.60372	INFINITY	51.04968-	51.04968-	AF19	LL
189	ESCORAF	95	2474.60283	NONE	83.80223	INFINITY	470.78384-	470.78384-	AF19	LL
190	CARVAU	95	9520.35544	NONE	63.60372	INFINITY	91.05917-	91.05917-	AF19	LL
191	PUEIRA	95	619.55432	NONE	63.60372	INFINITY	187.32615-	187.32615-	AF19	LL
192	HIREO	95	102.29646	NONE	244.09129	INFINITY	357.10303-	357.10303-	AF19	LL
193	HIREO	95	102.29646	NONE	1300.59419	INFINITY	29.70024-	29.70024-	AF19	LL
194	HIREO	95	102.29646	NONE	14022.43420	INFINITY	15.26937-	15.26937-	AF19	LL
195	HIREO	95	102.29646	NONE	23.57355	INFINITY	12090.14395-	12090.14395-	AF19	LL
196	HIREO	95	102.29646	NONE	73.52591	INFINITY	666.80615-	666.80615-	AF19	LL
197	HIREO	95	102.29646	NONE	1010.66670	INFINITY	287.40391-	287.40391-	AF19	LL
198	HIREO	95	102.29646	NONE	1389.13300	INFINITY	6.76539-	6.76539-	AF19	LL
199	HIREO	95	102.29646	NONE	2857.59503	INFINITY	130.90173-	130.90173-	AF19	LL
200	HIREO	95	102.29646	NONE	2852.59125	INFINITY	5.66804-	5.66804-	AF19	LL
201	HIREO	95	102.29646	NONE	9399.77525	INFINITY	8.19143-	8.19143-	AF19	LL
202	HIREO	95	102.29646	NONE	9842.79506	INFINITY	418.02470-	418.02470-	AF19	LL
203	HIREO	95	102.29646	NONE	508.45608	INFINITY	475.52533-	475.52533-	AF19	LL
204	HIREO	95	102.29646	NONE	618.55432	INFINITY	138.08124-	138.08124-	AF19	LL
205	HIREO	95	102.29646	NONE	47.63651	INFINITY	3028.59766-	3028.59766-	AF19	LL
206	HIREO	95	102.29646	NONE	325.63337	INFINITY	465.20326-	465.20326-	AF19	LL

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	INPUT COST	LOWER LIMIT	UPPER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	LIMITING AT
193	PH2	BS	153.44922			NONE	146.45476	489.45758	2019.06543	2019.06543	4F19	LL
									310.13672	310.13672	CLEC	LL
194	OXYGEN	BS	10721.15430			NONE	10360.94763	10991.60445	25.20903	25.20903	AF19	LL
									34.77008	34.77008	AF43	LL
195	CARGAS	BS	5915.98023			NONE	5812.52628	5932.48724	46.53687	46.53687	AF19	LL
									64.16698	64.16698	AF43	LL
196	CALVENT	BS	4548312.00000			NONE	5.00000	4548312.00000	.07102	.07102	VTAR	UL
									INFINITY	INFINITY	NONE	
197	CALFORAF	BS	13847302.0000			NONE	13889591.3906		.02333	.02333	VTAR	UL
									.04043	.04043	AF348	LL
198	CALGANG	BS	521106.50000			NONE	418915.50000	622420.81250	.09162	.09162	GUSOL	LL
									.01624	.01624	ALD198	LL
199	CAREO	BS	1338.53271			NONE	1317.81550	1348.77342	79.43381	79.43381	ALC198	LL
									103.43076	103.43076	AF43	LL
200	PCO	BS	8494.04297			NONE	8058.23154	9517.72493	32.41196	32.41196	AF19	LL
									44.71304	44.71304	AF43	LL
201	PCO2	BS	8343.10156			NONE	7915.14233	8368.37003	32.99908	32.99908	AF19	LL
									45.50004	45.50004	AF43	LL
202	CALDAS	BS	940515.37500			NONE	936714.73975	1016603.01562	.27861	.27861	AF43	LL
									1.38369	1.38369	CLEC	LL
203	CALCONS	BS	12452540.0000			NONE	9237800.00000	12502442.2148	.02576	.02576	AF55A	LL
									.05053	.05053	AF348	LL
204	CALPERAF	BS	1395322.00000			NONE	1390089.51953	4413816.00000	.21849	.21849	AF19	LL
									.02743	.02743	AF55A	LL
205	SUCAYA	BS	2304.98501	10.00000		NONE	311.34009	2384.46862	4.06178	4.06178	GUSOL	LL
									16.33797	16.33797	ALD26E	LL
206	SUCA	BS	310.07193	7.10160		NONE	185.26106	415.97984	12.38763	12.38763	ALD26E	LL
									5.03653	5.03653	ALD26H	LL
207	SUCS	BS	310.07193	3.65080		NONE	203.57921	311.60597	9.00007	9.00007	ALD26H	LL
									684.92083	684.92083	AF43	LL
209	NNENF	BS	104.41214			NONE	101.21803	118.40177	487.98194	487.98194	ALD26E	LL
									50.83654	50.83654	SINT11A	LL
210	FOSENF	BS	22.35894			NONE	21.76036	23.28744	2605.34933	2605.34933	ALD26E	LL
									1140.31348	1140.31348	AF43	LL

OTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LO

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	INPUT COST	LOWER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	PROCESS	AT
211	SIESC	BS	88.48495		NONE	65.88745	477.01035	477.01035	477.01035	SINT11A	LL
						86.58737	90.91226	90.91226	90.91226	ALD198	LL
212	CAL	BS	887.62725	12.08020	NONE	853.54718	31.57592	31.57592	43.56592	ALD238	LL
						1055.32916	9.80185	9.80185	2.22814	ALD198	LL
213	SIOES	BS	84.45832		NONE	75.53209	78.78557	78.78557	78.78557	ALD26H	LL
						85.55305	785.51062	785.51062	735.51062	ALD198	LL
214	SIEMP	BS	230.56199		NONE	227.32150	209.30737	209.30737	209.30737	SINT11A	LL
						271.78226	40.31699	40.31699	40.31699	ALD198	LL
215	REVEST	BS	34.34702	324.82983	NONE	33.21623	1435.86992	1435.86992	1732.49376	ALD198	LL
						70.27832	307.75517	307.75517	17.07466	ALD22A	LL
216	MCO	BS	39.53613		NONE	37.68588	7640.86216	7640.86216	7640.86216	AF19	LL
						75.10733	310.50757	310.50757	310.50757	ALD22A	LL
217	CAO	BS	976.56152		NONE	554.84454	43.33013	43.33013	48.53918	ALD238	LL
						685.84740	15.08674	15.08674	15.08674	ALD198	LL
218	CARBON	BS	645.27637		NONE	635.31879	133.72773	133.72773	133.72773	ALD198	LL
						746.09659	92.36274	92.36274	92.36274	CUSEL	LL
219	FERRO	BS	15871.55919		NONE	15677.16291	3.46158	3.46158	3.46158	ALD198	LL
						15950.36569	13.45210	13.45210	13.45210	AF43	LL
220	WAPERD	BS	39.67761		NONE	34.58550	1413.41747	1413.41747	1413.41747	ALD265	LL
						40.79997	148.77365	148.77365	148.77365	SINT11A	LL
221	FOAPERD	BS	97970		NONE	65542	66233.64844	66233.64844	66233.64844	ALD265	LL
						91520	29015.60939	29015.60939	29015.60939	AF43	LL
222	SIPROD	BS	33.63202		NONE	37.82927	1257.85581	1257.85581	1257.85581	SINT11A	LL
						45.22457	242.26955	242.26955	242.26955	ALD198	LL
223	FEPERO	BS	214.28733		NONE	211.64183	528.72394	528.72394	626.78394	ALD198	LL
						215.33015	945.30430	945.30430	955.30430	AF43	LL
224	FEACO	BS	15379.86133		NONE	14580.84009	19.60986	19.60986	19.60986	AF19	LL
						16458.14935	13.88020	13.88020	13.88020	AF43	LL
225	CACO	BS	12.40785		NONE	11.82307	24355.27344	24355.27344	24355.27344	AF19	LL
						12.46439	17211.78306	17211.78306	17211.78306	AF43	LL
226	WVACO	BS	31.00714		NONE	29.85753	9742.10939	9742.10939	9742.10939	AF19	LL
						31.16098	6584.71630	6584.71630	6584.71630	AF43	LL
227	FOCACO	BS	2.79064		NONE	2.06016	108245.67187	108245.67187	108245.67187	AF19	LL
						2.89449	76496.45375	76496.45375	76496.45375	AF43	LL

NUMBER	COLUMN	AF	ACTIVITY	..INPUT COST..	..LOWER LIMIT..	..UPPER LIMIT..	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	..UNIT COST..	..LOWER COST..	..UPPER COST..	LIMITING AT
												PROCESS.
228	ACD	BS	15503-58008	50.00000		NONE	14738-77478 15580-48176	19-48422- 13-76944-	30.51978 63.76944	AF19	AF43	LL
229	FE3C	BS	277-52956			NONE	182-20263 293-07329	14-28032- 156-57526-	14-28022- 156-57526	ALD198	ALD18A	LL
230	MNESC	BS	37-72735			NONE	35-68478 47-59725	7-8-38565- 77-20665-	7-8-38565- 77-20665	ALD26E	SINT11A	LL
231	SILICO	BS	192-52991			NONE	189-49503 226-55769	251-08950- 48-26491-	251-08950- 48-26491	SINT11A	ALD198	LL
232	F0SES	BS	18-86548			NONE	18-12402 19-56775	2729-76883- 1205-68546-	2729-76883- 1205-68546	ALD26E	AF43	LL
233	ESCOR	BS	1317-80420			NONE	1256-19577 1391-62071	229-22517- 32-57473-	229-22517- 32-57473	AF19	ALD18A	LL
234	SIAX	BS	46-02653			NONE	38-48458 46-40937	79-14767- 1992-27155-	79-14767- 1992-27155	ALD26H	SINT11A	LL
235	CO	BS	538-41455			NONE	530-84649 624-13306	217-4017- 109-28202-	217-4017- 109-28202	ALD198	GUSCL	LL
236	CO2	BS	94-48874			NONE	93-13101 109-48708	1235-58246- 622-56543-	1235-58246- 622-56543	ALD198	GUSCL	LL
237	SUCENT	BS	2615-06053			NONE	311-63086 2710-56656	4-06452- 6-25642-	4-06452- 6-25642	GUSCL	ALD26H	LL
238	CAPACX	BS	5230-12109			NONE	3144-18552 5-21-13193	4-46591- 3-12521-	4-46591- 3-12521	GUSCL	ALD26H	LL
239	CAL FOR	BS	7089452-50000			NONE	6757905-75000 7156270-90325	-03260- -01599-	-03260- -01599	AF19	ALD230	LL
240	CAGES	BS	166-44174			NONE	107-45767 212-29310	18-27140- 35-89381-	18-27140- 35-89381	ALD239	ALD198	LL
241	ENTES	BS	552381-50000			NONE	549659-79383 583419-02734	-46220- -07342-	-46220- -07342	ALD198	ALD18A	LL
242	ENTCAS	BS	714104-00000			NONE	704066-41992 827793-25300	-16396- -06235-	-16396- -06235	ALD198	GUSCL	LL
243	ENTFUM	BS	144358-12500			NONE	139094-38386 146507-69543	2-08501- -46477-	2-08501- -46477	AF19	SINT11A	LL
244	CALPCRO	BS	142694-68750			NONE	138518-31641 223653-00000	2-08435- -01316-	2-08435- -01316	AF19	ALD239	LL

MPSX/370 R1.6 DTIMIZACAO DO PROC. SINT-AF-LD

NUMBER	COLUMN	AT	ACTIVITY	INPUT COST	LOWER LIMIT	LOWER ACTIVITY	UNIT COST	LOWER COST	UPPER COST	PROCESS	AT
245	VAC2	BS	918699-50000	50000	NONE	89446.62891	0.0548	0.0083	0.0765	ALD198	LL
						103149.78125	0.0300			CUSCL	LL

SECTION 1 - ROWS AT LIMIT LEVEL

NUMBER	...ROW... AT ...ACTIVITY...	SLACK ACTIVITY	...LIMIT...	LOWER ACTIVITY	UPPER ACTIVITY	...UNIT COST...	...LOWER COST...	...UPPER COST...	LIMITING AT PROCESS...
2	SINT1	EQ	.	.	1152.87598- 709.44507	4.57671- 4.57671	SINT17 ALD21A	LL LL	LL
3	SINT2	EQ	.	.	2196.94336- 1244.39901	12.72426- 12.72426	SINT08 SINT0A	LL LL	LL
4	SINT3	EQ	.	.	2911.10156- 13558.36719	2.42314- 2.42314	FINAF SINT08	LL LL	LL
5	SINT4	EQ	.	.	1165.92990- 798.11719	4.18324- 4.18324	SINT17 ALD21A	LL LL	LL
6	SINT5	EQ	.	.	132.62115- 77.39902	1.47991- 1.47991	SINT08 SINT0A	LL LL	LL
9	SINT7	EQ	.	.	702.24402- 1018.48195	10.18381- 10.18381	ALD21A SINT17	LL LL	LL
10	SINT8A	LL	.	NONE	189.34260- 54.53302	24.22180- 24.22180	AF35A SINT08	LL LL	LL
12	SINT9	EQ	.	.	213.15329- 608.25317	7.78291- 7.78291	CALST CALCARST	LL LL	LL
13	SINT10	EQ	.	.	111.36780- 653.03306	26.24941- 26.24941	WNST SINT17	LL LL	LL
14	SINT11A	LL	.	NONE	6.03712- 29.55085	29.76067- 29.76067	ALD21A SINT11A	LL LL	LL
16	SINT12	EQ	.	.	74.89246- 11.08611	2.06242- 2.06242	SINT13 AF28A	LL LL	LL
18	SINT14	EQ	.	.	257.12061- 227.81000	8.10733- 8.10733	SINT15 ALD21A	LL LL	LL
20	SINT16	EQ	.	.	547.49364- 794.78076	9.86430- 9.86430	ALD21A SINT17	LL LL	LL
22	SINT18	EQ	.	.	2045.20923- 707.27490	13.23178- 13.23178	FEOST ALD21A	LL LL	LL
23	SINT19	EQ	.	.	8426.25391- 792.22461	6.01874- 6.01874	AF35A ALD21A	LL LL	LL
24	AF1	EQ	.	.	693.12939- 2303.88501	13.60385- 13.60385	ALD21A FEO	LL LL	LL

BIBLIOGRAFIAS

1. Lamas, Vicente P.B., "Exemplo de cálculo de carregamento para Sinterização nas condições atuais da Belgo Mineira", Publicação Interna CSBM, J.Monlevade (1979).
2. Marques, Luis S., "Exemplo de cálculo de consumo de calcário na Sinterização", Publicação Interna CSBM, J.Monlevade (1980).
3. Czovek, B., "Effect of Pig Iron Quality on the Economics of LD Converter Steelmaking", Muthik vol.12, (1975), pg 455-457.
4. ———, "Linear Programming - Blast Furnace Burdening and Production Planning", IBM (1965).
5. Geiger Jr., Lewis J., "A Linear Program Model of the Iron Blast Furnace", thesis for degree of M.Sc., The Pennsylvania State University, (1959).
6. Szczeniowski, J., "Bilans thermiques des Hautes Fourneaux et Leurs Applications", CESSID, França (1964).
7. ———, "Curso sobre Redução de Minério de Ferro em Alto-Forno", ABM (1974), Cap. II, III e IV.
8. Szczeniowski, J.et Senna, D., "Étude du Haut Fourneau", Vol.2, CESSID, França (1964).
9. Elliont, John F. and Gleiser, Molly, "Thermochemistry for Steelmaking", The American Iron and Steel Institute (1964).
10. ———, "Contribution of the Data on Theoretical Metallurgy" Bulletin 584, Bureau of Mines, USA (1960).
11. Waldenström, T. et Meysson, M., "Données thermodynamiques, IRSID, França (1966).

12. Penna, José A., "Modelo para cálculo de balanço de material e térmico em alto forno a carvão vegetal", Publicação Interna CSBM (1974), J.Monlevade.
13. Araújo, Luis A., "Siderurgia", Vol.1 , Editora Lema (1967).
14. ———, "Curso de elaboração de aço", AEM (1976).
15. Cherém, P., "Balanço de massa e térmico de uma corrida LD", Publicação Interna CSBM, J.Monlevade (1980).
16. Georges, S., "Variações metalúrgicas do processo LD em Monlevade", Publicação Interna CSBM, J.Monlevade (1976).
17. Boccuni, M., "Ottimizzazione della Produttività del Complesso AltoForno-Acciaeria. Esame Dell'influenza della Percentuale Di Silico", Metallurgia Italiana (1), (1971), pag 33-36.
18. Luenberger, David G., "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison - Wesley, (1973), pag 11-63.
19. Garvin, Walter W., "Introduction to Linear Programming, McGraw-Hill, (1960), pag 49-61 .