

4 Desenvolvimento e Metodologia de Trabalho

4.1. Considerações sobre modelagem na engenharia

Uma vez que este desenvolvimento envolve a construção de modelos computacionais, representativos de importantes processos siderúrgicos, julgou-se interessante dedicar esta seção, para a definição de alguns conceitos importantes, dentro do campo de conhecimento voltado para modelagem de processos. Adicionalmente, dedica-se este espaço para um melhor entendimento sobre o que se tem de aplicação em processos siderúrgicos, em particular, em processos tradicionais e emergentes de redução direta de minérios de ferro.

4.1.1. Conceitos importantes

Os modelos são representações de um sistema e de seus comportamentos, construídos com o objetivo de facilitar o entendimento de sistemas complexos, inalteráveis facilmente, a partir de procedimentos experimentais. Em qualquer situação, que exija uma decisão, o passo fundamental para compreender a natureza do problema é a identificação de todos os fatores envolvidos, os quais forneçam elementos para a análise e conclusão. No processo de construção de um modelo, esses fatores são chamados variáveis do problema, já que, usualmente, podem assumir valores diversos, durante o desenvolvimento da solução. Com isto, um modelo é a representação de um sistema real, complexo (por exemplo, uma operação industrial), reduzindo-se às variáveis mais relevantes deste sistema ⁽¹¹¹⁾, conforme a figura 89.

Dependendo da forma e do tipo do processo, pode-se classificar os diversos tipos de modelos ⁽¹¹¹⁾, como se segue:

- i. **Modelos conceituais:** são os que se relacionam de forma seqüencial e lógica as informações e os processos de decisão;
- ii. **Modelos simbólicos ou matemáticos:** são baseados na pressuposição de que todas as informações e variáveis relevantes do problema podem ser quantificadas utilizando símbolos e funções matemáticas para descrever a relação entre as variáveis e o sistema;
- iii. **Modelos heurísticos:** são construídos quando a complexidade do problema é tal que a utilização de relações matemáticas se torna impraticável ou muito dispendiosa.

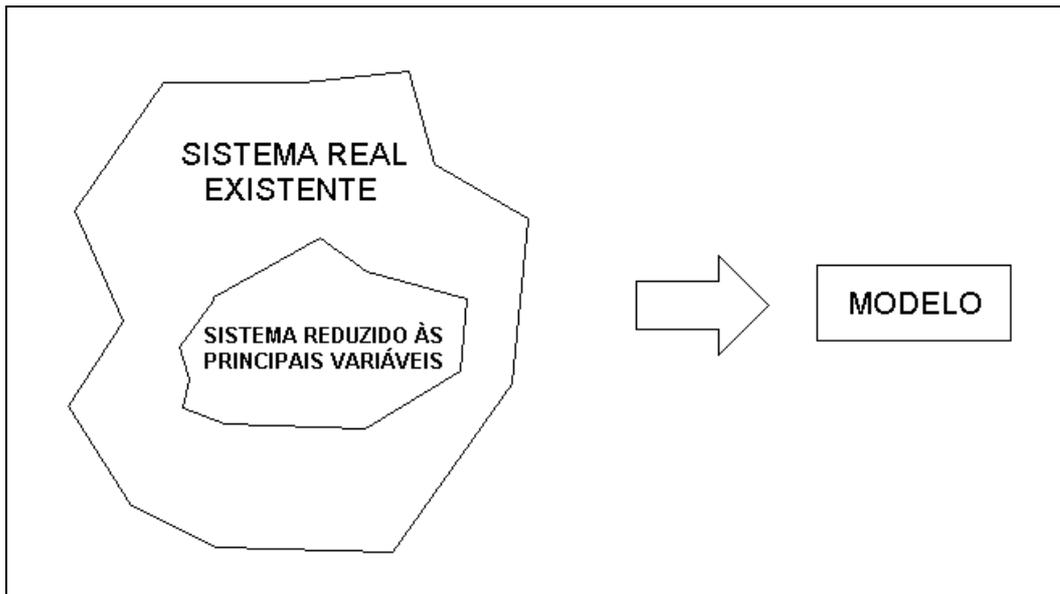


Figura 89 – Representação simplificada do processo de modelagem ⁽¹¹¹⁾.

Dentre os modelos citados, os mais utilizados na área de engenharia são os modelos matemáticos que podem ser subdivididos ⁽¹¹¹⁾ em dois tipos:

- I. **Modelos de simulação:** procuram oferecer uma representação do mundo real com o objetivo de permitir a geração e análise de alternativas, antes da implementação de qualquer uma delas cuja escolha da melhor alternativa, não é fixada na estrutura do modelo. A figura 90, ilustra este processo de modelagem.

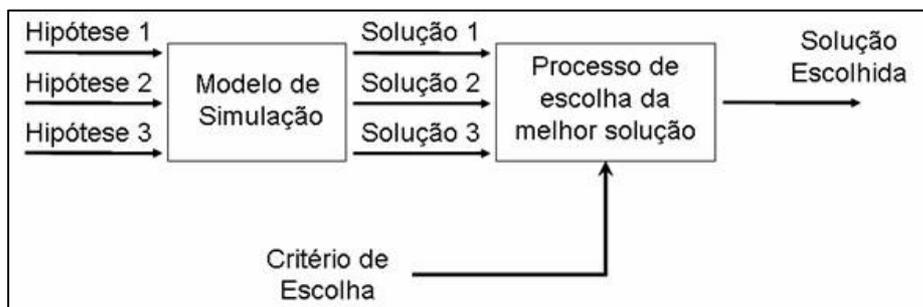


Figura 90 – Representação esquemática de um modelo matemático de simulação ⁽¹¹¹⁾.

- II. **Modelo de otimização:** esta classe não permite a escolha da alternativa, visto que é estruturada para selecionar uma única alternativa ótima segundo os critérios estabelecidos. O critério faz parte da estrutura do modelo que escolhe a melhor alternativa através de análise matemática, conforme figura 91.

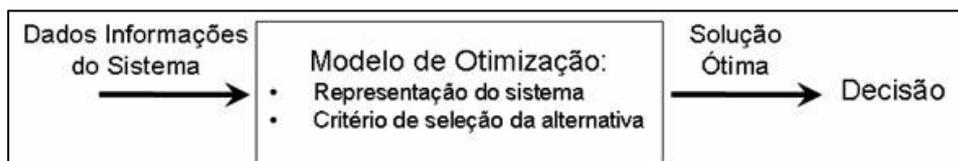


Figura 91 – Representação esquemática de um modelo matemático de otimização ⁽¹¹¹⁾.

Com a crescente melhoria da tecnologia dos microcomputadores atuais, aumentaram as facilidades para a utilização de modelos matemáticos, pelas indústrias, devido à maior velocidade de processamento e obtenção de repostas mais rápidas. O modelamento computacional pode simular uma operação de produção e as operações financeiras correspondentes, tanto em um estágio atual, quanto em sua possível evolução futura, correlacionando seu desenvolvimento com os diversos fatores a que a empresa esta submetida.

4.1.2. Modelagem de processos siderúrgicos

Atualmente, a modelagem de processos siderúrgicos — dando ênfase nesta seção para os processos de redução de minério de ferro — deixou de ser inovação ou assunto acadêmico, para tornar-se uma importante ferramenta de checagem operacional, análise de valor e competitividade, previsão de conseqüências decorrentes, de alterações nos parâmetros de processo, entre outros objetivos diversos de checagem e previsão da performance técnica, econômica e ambiental.

Um bom modelamento depende de vários parâmetros, entre os principais:

- objetivo claro;
- técnica adotada;
- entendimento da geometria (1-D, 2-D ou 3-D);
- metodologia de discretização;
- simplificações realizadas;
- entendimento do processo (termodinâmica, cinética, fenômenos de transporte de massa e de energia envolvidos);
- equilíbrio químico entre as espécies envolvidas e seus mecanismos de transferência;
- calores envolvidos (ΔH) e mecanismos de troca;
- taxa de reação e seus fatores influentes.

Com relação aos modelos termoquímicos, este, especificamente, pode ser global e/ou estagiado (discreto ou diferencial). No balanço global, não importa o que ocorre no interior do processo, enquanto no balanço estagiado é feita uma análise de todas as etapas que ocorrem em cada região do processo.

Os pré-requisitos para a construção de um bom modelo termoquímico são:

- conhecimento pleno do balanço de massa do processo;
- conhecimento dos estados físicos dos reagentes e produtos;
- conhecimento das temperaturas dos reagentes e produtos;
- reações globais envolvidas;

- escolha de uma temperatura de referência apropriada.

Normalmente, escolhe-se a temperatura de referência como sendo 298K, devido à facilidade de obtenção de dados tabulados. Para uma análise realística de cada termo do balanço estagiado, a temperatura de referência deve ser a mais próxima possível da real, em que o processo esteja ocorrendo.

4.1.3.

Modelagem de processos alternativos de redução de minérios de ferro

Os aspectos relacionados ao estado da arte da modelagem de reatores de redução de minério de ferro — em particular, de processos emergentes — podem ser encontrados na literatura ⁽¹¹²⁾, de forma atualizada.

Como a maioria dos processos emergentes de redução de minério de ferro não se encontra em estágio comercial, são poucas as referências de modelamento destes processos, na literatura. Os principais processos em fase de consolidação industrial são: Hismelt, de fusão-redutora; ITmk3, baseado em fornos de soleira rotativa, que utiliza aglomerados auto-redutores como carga; Finex, que utiliza uma combinação de reatores de leite fluidizado, para a redução do minério de ferro, e um forno de fusão/gaseificação; Tecnored, em fase final de implantação de sua unidade industrial. Para o processo Finex, não foram encontrados dados, na literatura, sobre sua modelagem.

Para os processos tradicionais de redução direta, segundo a tecnologia Midrex e HYL, foram encontrados, na literatura, algumas poucas referências de modelos desenvolvidos ^(113,114), os quais não estão disponíveis comercialmente.

4.2.

Modelos Desenvolvidos e Arquitetura Básica de Integração

Para que os propósitos deste trabalho pudessem ter sido alcançados, destacam-se como principais desenvolvimentos:

- desenvolvimento de um modelo termoquímico de redução direta, representativo do atual estado da arte de um processo industrial de obtenção de ferro-esponja, pela tecnologia Midrex;
- a aquisição dos direitos de uso de um segundo modelo termoquímico e seu subsequente aperfeiçoamento para uma situação mais próxima ao estado da arte do processo industrial de fabricação de aço líquido primário, em forno elétrico a arco;
- desenvolvimento de um modelo de otimização e de gestão dos modelos termoquímicos em questão.

Para simplificação, optou-se por se fazer referência aos modelos termoquímicos em questão, como “modelo DR” e “modelo EAF”, respectivamente. Já para o caso do modelo de otimização, mencionado acima, a opção foi por chamá-lo, simplesmente, de “modelo GESTOR”.

A arquitetura básica, concebida para a integração em um pacote único do modelo GESTOR com os dois modelos termoquímicos subjacentes, pode ser visualizada através da figura 93 e o presente capítulo discorrerá sobre toda a fundamentação, características, metodologias e técnicas utilizadas na construção de todo este ferramental.

Para viabilizar esta integração entre os três distintos modelos, empregou-se o código “Visual Basic for Applications” (VBA) como uma linguagem de programação única, que por sua vez é constante na plataforma Excel do ambiente Windows. Principalmente nas áreas de interface com o usuário, optou-se em cada modelo pelo emprego da língua inglesa, naturalmente levando-se em consideração o potencial público-alvo para utilização desta ferramenta. Em anexo, foram inseridos os respectivos códigos-fonte do modelo DR e do modelo GESTOR.

Foi preservada a característica de fácil transportabilidade deste programa de computador, tendo em vista que o mesmo pode ser instalado e operado, normalmente, em computadores portáteis comuns ou mesmo em “desktops” pelos usuários.

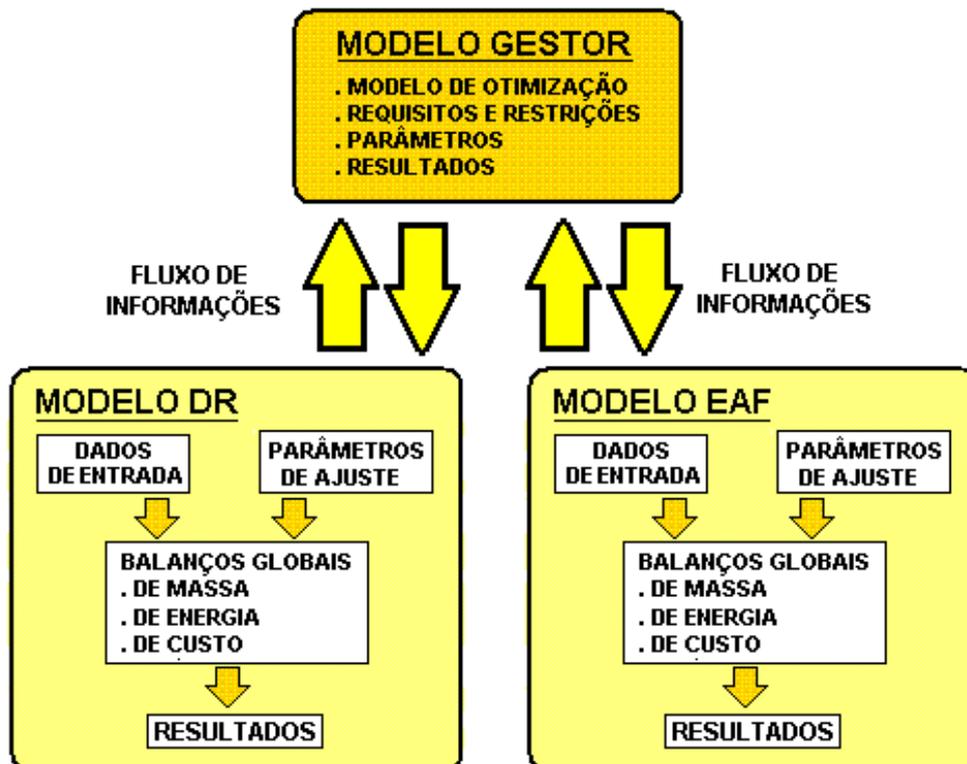


Figura 92 – Representação esquemática da arquitetura básica de integração, envolvendo o modelo GESTOR e os modelos DR e EAF.

4.3. Modelo DR

4.3.1. Concepção original

Desde os primórdios de sua idealização, imaginava-se ter em mãos uma ferramenta computacional, que proporcionasse para os usuários uma melhor fundamentação e maior capacidade de análise técnica e econômica dos fenômenos de metalização e carburização, para distintos minérios de ferro, quando em processamento no interior destes reatores.

Diante desta estratégia e dentro de um convênio de cooperação tecnológica entre a Samarco Mineração S/A e o Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio, desenvolveu-se⁽¹¹⁶⁾, entre os anos de 2003 e 2005, a construção de uma primeira versão para o modelo DR.

Este foi construído, a partir do marco zero, em função de não ter sido encontrado no mercado nenhum modelo similar, disponível comercialmente, o qual se alinhasse aos propósitos deste trabalho. Além do mais, não interessava ao grupo de desenvolvimento ter em mãos uma ferramenta, de cuja “caixa preta” não se pudesse ter acesso à memória de cálculo. Julgava-se, estrategicamente, pouco interessante ficar “engessado”, com prováveis avanços tecnológicos de redução direta, e ser menos ágil na proposição de futuras mudanças de concepção do modelo em linha.

Focou-se em operações de redução direta, as quais adotam a tecnologia Midrex, por ser a mais abrangente dentre tais operações, como já explorado na seção 3.4.

Optou-se, naquela época, pelo desenvolvimento de uma versão capaz de fechar o balanço de massa e de energia, em cada uma das três regiões existentes no forno de cuba: nas zonas de redução (ZR), de transição (ZT) e de resfriamento (ZA). Ao ser concebido, com este nível de análise, o modelo é capaz de criticar, de forma mais apurada quaisquer inconsistências geradas por violações de conservação de massa e energia e com relação à segunda lei da termodinâmica.

Criou-se, então, um modelo que pode ser assumido como híbrido, por não apenas levar em consideração aspectos termodinâmicos, relativos aos balanços estagiados de massa e de energia, mas por também fazer uso de alguns parâmetros cinéticos, os quais informam sobre a extensão em uma dada zona de determinados fenômenos, em particular, metalização e carburização.

Com a necessidade de integração com o GESTOR e em linha com a concepção do modelo EAF — que será detalhado na seção 4.5 — o modelo DR passou por algumas adequações, a fim de contemplar um nível de análise, que se restringe apenas ao fechamento do balanço global de massa e de energia do forno de Midrex. Opcionalmente, ainda existe a possibilidade de análise por zona — por consequência, com maior rigor e detalhamento — do processo de redução direta em questão, sempre que isto se fizer necessário.

A figura 93 mostra a principal tela de acesso do modelo em discussão e as seções de 4.4.2 a 4.4.4, subseqüentes, darão foco e esclarecimentos sobre a

sua concepção mais simplificada. Optou-se por acrescentar à seção 4.4.5 alguns detalhes do modelo DR, em sua versão mais completa, concebida a partir dos balanços estagiados de massa e de energia, englobando as três distintas zonas.

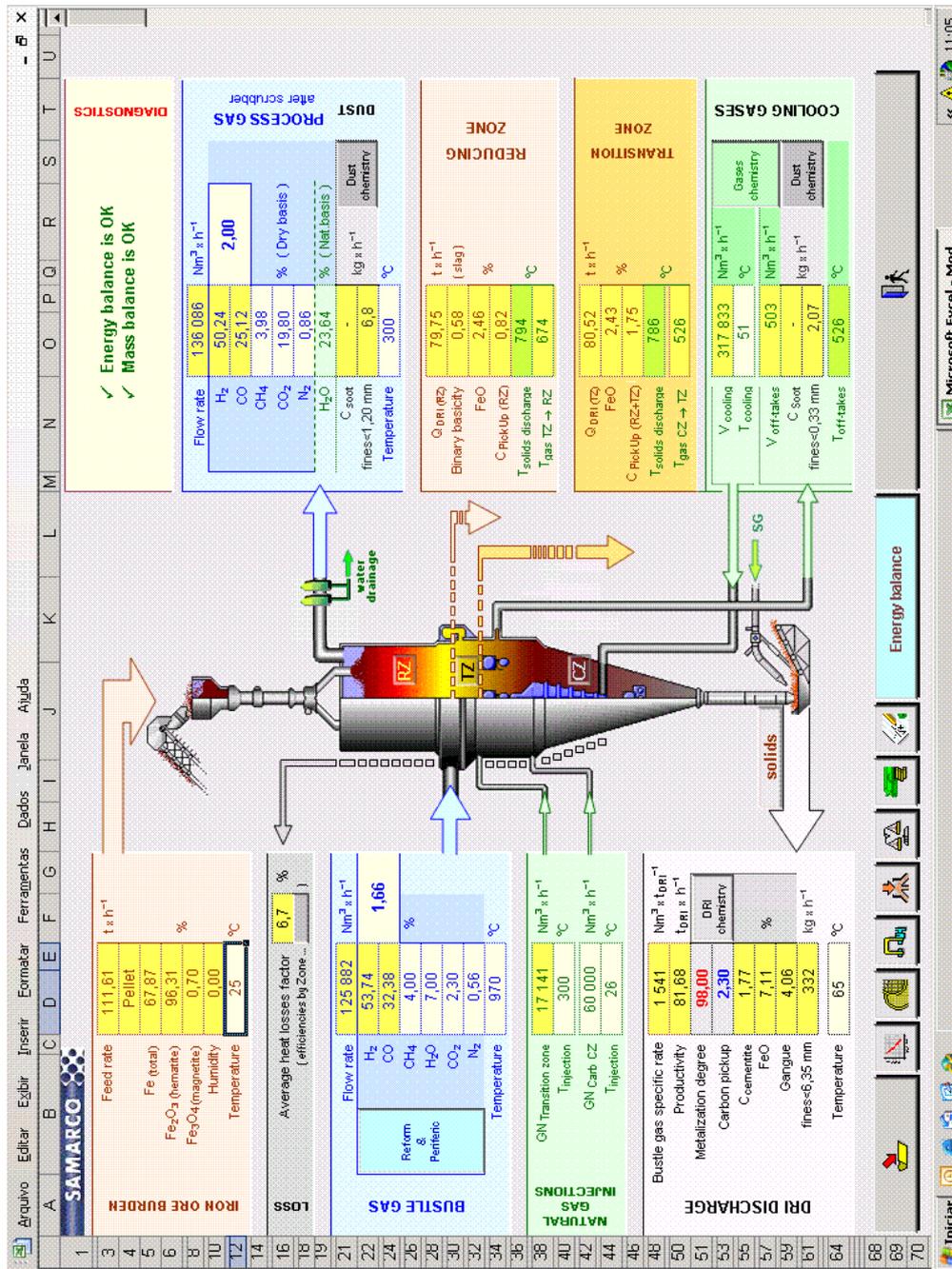


Figura 93 – Tela principal de acesso pelo usuário ao modelo DR.

4.3.2.

Concepção do balanço global de massa e de energia do forno de cuba

Para a elaboração do balanço global de massa e de energia deste processo, além dos aspectos fundamentais, foram levados em conta informações e dados de campo, obtidos a partir de inúmeras discussões técnicas, junto a quem realmente opera tais reatores industriais. A preocupação foi de tornar o modelo em questão mais fiel e próximo possível do referido processo industrial — no seu atual estado da arte — principalmente, no que diz respeito à redução e carburização, como já ressaltado na seção anterior.

Acrescenta-se ainda que, para elaborar o modelo termoquímico do processo de redução direta, foram também necessárias algumas etapas intermediárias e uma revisão dos aspectos termoquímicos e, até mesmo, cinéticos, envolvendo a redução direta. A realização destas etapas visou oferecer maior conhecimento da fenomenologia do processo e fornecer uma base sólida de conhecimentos, os quais acabaram servindo de alicerce para a modelagem do processo. Dentro desta linha, incluem-se estudos conduzidos em escala de laboratório, buscando entendimento da extensão dos fenômenos de metalização e de carburização de pelotas de minério de ferro, na zona de redução de tais fornos. Estas investigações resultaram em dois trabalhos de mestrado ^(30,52) realizados na PUC-Rio e patrocinados pela Samarco Mineração S/A, como já explorado nos itens 3.3.3 e 3.3.4.

Uma das preocupações básicas na modelagem de qualquer processo siderúrgico é que, uma vez realizados todos os cálculos, haja fechamento do seu balanço de massa e, da mesma forma, de energia, naturalmente, dentro de determinados níveis aceitáveis de desvios. Analisa-se o processo como se fosse uma “caixa preta”, não sendo necessário interpretar e precisar — para efeito deste tipo de avaliação — o que acontece em seu interior. Seguindo este raciocínio, tomou-se o forno de cuba, mostrado na figura 95, como sendo o volume de controle para o referido balanço. Esta figura também destaca as várias entradas e saídas do processo, em função das matérias-primas sólidas e gasosas utilizadas, do produto sólido descarregado e dos co-produtos sólidos e gasosos obtidos, bem como, das características de uma operação industrial e de “políticas” específicas, previamente estabelecidas.

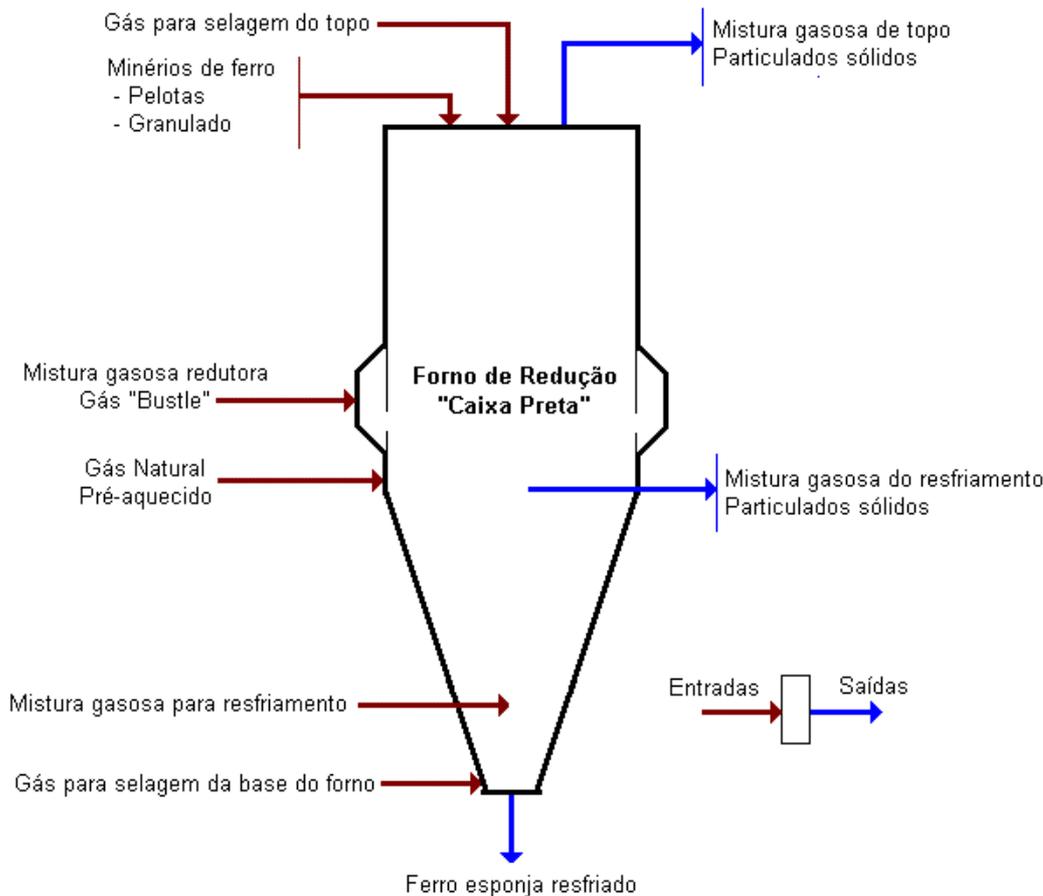


Figura 94 – Entradas e saídas consideradas para o balanço de massa global do processo de obtenção de ferro-esponja resfriado, através de um forno de redução direta do tipo cuba.

Conforme indicado na figura 94, as seguintes entradas e saídas são consideradas no balanço global do processo em discussão:

⇒ **Entradas (E):**

- minérios de ferro: carga sólida na forma de pelotas e/ou granulado natural, continuamente alimentada pelo topo do forno e com granulometria adequada. Predominantemente, é portadora das unidades de ferro sob a forma de hematita e/ou magnetita, que serão reduzidos durante o processamento. Adicionalmente, contém outros óxidos mais estáveis, tais como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), CaO e MgO, dentre outros componentes presentes em menor quantidade;
- mistura gasosa redutora: também conhecida como “bustle gas”, é, continuamente, introduzida na parte mais inferior da zona de redução do forno de cuba, a temperaturas que podem variar de 850 – 1000°C. É, tipicamente, portadora de constituintes gasosos redutores ($\text{H}_2 + \text{CO} \cong 85 - 90\%$ em volume; $\text{H}_2/\text{CO} \cong 1,5 - 1,8$ em volume) de algum metano para a reforma “in situ” (< 5% em volume), que, inevitavelmente, contém alguma presença de componentes gasosos oxidantes ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \cong 10\%$);
- gás natural pré-aquecido: refere-se ao fluxo gasoso, continuamente injetado na zona de transição do forno de cuba, a temperaturas da ordem de 300°C, com a principal finalidade de geração adicional dos

gases redutores H_2 e CO , no interior do forno, pela reforma “em situ”, catalisada pelo contato do CH_4 com a carga sólida já metalizada. Tipicamente, contém níveis bem acima de 95% de CH_4 ;

- mistura gasosa para resfriamento: diz respeito ao fluxo gasoso, continuamente introduzido e distribuído na zona de resfriamento do forno de cuba, a temperaturas, tipicamente, inferiores a $50^\circ C$. É, predominantemente, composto por CH_4 (> 75% em volume), H_2 (da ordem de 10%) e algum CO (abaixo de 2%). Isto promove uma condição de resfriamento, sem que haja oxidação do ferro-esponja, apesar desta mistura também computar alguma presença de água no estado de vapor e algum CO_2 .
- mistura gasosa responsável pela selagem superior e inferior do forno: constituído em sua maioria por N_2 , CO_2 e H_2O , tem como funções básicas: (1) evitar a perda de gases oriundos do interior do forno para a atmosfera, mantendo uma pressão interna do reator maior que a pressão atmosférica; (2) inibir a entrada de ar da atmosfera para o interior do forno, causando alguma oxidação indesejável do material já metalizado.

⇒ **Saídas (S):**

- ferro-esponja: constitui o principal produto sólido do processo de redução direta, que é continuamente descarregado pela parte mais inferior do reator. Quando, intencionalmente, resfriado, é descarregado a temperaturas da ordem de $40^\circ C$, com níveis de metalização, normalmente, iguais ou superiores a 93%. Contém certo percentual de carbono — na forma grafítica ou cementítica, também conhecido como “carbon pickup” — usualmente da ordem de 1,5 a 1,8%, em peso, quando descarregado a frio, como já explorado nas seções 3.3.4 e 3.9.2;
- mistura gasosa de topo: refere-se ao fluxo gasoso que emana, continuamente, da zona de redução, após ter realizado de todos os processos químicos, fluidodinâmicos e energéticos pertinentes. Tem um nível de temperatura da ordem de $300^\circ C$ e contém consideráveis quantidades de H_2 e CO ($H_2 + CO \cong 55 - 60\%$ em volume). Contém, ainda, CO_2 e H_2O ($CO_2 + H_2O \cong 40\%$) e metano ($\leq 4\%$ CH_4 em volume);
- particulados sólidos do topo: contempla a parcela de material fino, abaixo de uma determinada granulometria, arrastada pela corrente gasosa, que sai pelo topo e que, subseqüentemente, é separado pelo sistema de lavagem de gás de topo. Considera-se, no modelo, que estes particulados podem apresentar um determinado nível de redução, cuja maior ou menor quantidade está fortemente associada à resistência a abrasão dos materiais sólidos, carregados pelo topo, e à sua maior ou menor tendência à degradação, sob condições de redução;
- mistura gasosa do resfriamento: diz respeito ao fluxo gasoso, também comumente conhecido como “offtake gas”, emanado, continuamente, da zona de resfriamento, após realização de todos os processos químicos, fluidodinâmicos e energéticos, pertinentes nesta zona.

Possui na sua saída do forno, um nível de temperatura da ordem de 350 - 400°C. É devidamente lavado, resfriado, desumidificado e enriquecido com gás natural, para, novamente, ser introduzido na zona de resfriamento;

- particulados sólidos do resfriamento: contempla a parcela de material reduzido fino e abaixo de uma determinada granulometria, arrastada pela corrente gasosa, que sai da zona de resfriamento. É separado da corrente gasosa pelo sistema de lavagem, existente no circuito de resfriamento. Analogamente ao que foi mencionado, a origem dos particulados no gás de topo, sua maior ou menor presença na corrente gasosa está intimamente associada à maior ou menor tendência de degradação física do sólido, em processo de metalização, seja por forças abrasivas e/ou pelos fenômenos associados às reações de redução dos minérios de ferro;

Para efeito de simplificação, não foi incluído — nem como entrada, nem com saída — o desgaste do revestimento interno de refratário, e qualquer forma de acumulação de material, no interior do forno, respectivamente, ficando como sugestão para futuras implementações, caso se comprove haver necessidade.

Identificados quais são os fluxos de chegada e saída, relativos ao processo em análise, deve-se considerar as contribuições das espécies químicas presentes em cada fluxo. Obedecendo à conservação das massas, aplica-se a conhecida equação:

$$\sum E_i^j = \sum S_i^j \quad \text{eq. (47)}$$

onde:

$\sum E_i^j$: é o somatório do elemento “i” na fase “j” das entradas;

$\sum S_i^j$: é o somatório do elemento “i” na fase “j” das saídas.

4.3.3.

Principais fluxos gasosos periféricos ao forno de cuba, essenciais ao balanço de massa e de energia global do reator de redução

Uma vez que se buscou modelar algo que se aproximasse de um processo industrial, foi indispensável, neste trabalho considerar os fluxos gasosos e sólidos existentes em uma planta típica de redução direta, detalhados a seguir.

Para o entendimento de quais seriam os fluxos considerados, no balanço global do modelo em questão, sugere-se consultar a figura 95, na qual se destacam os principais fluxos gasosos para uma planta Midrex de redução direta, destinada à produção de pré-reduzido descarregado a frio, ou seja, que faz uso da parte mais inferior do reator para o resfriamento forçado do DRI, conforme já descrito na seção 3.4.1. Pela análise da referida figura, nota-se que estes fluxos podem ser subdivididos em dois circuitos básicos, a saber:

- ⇒ Circuito gasoso que atende à etapa de redução: engloba os seguintes fluxos interligados:

- *na chegada da zona de redução (ZR)*: tem-se o “bustle gas”, que, continuamente, ingressa à ZR, tendo como responsabilidades básicas: (i) introdução dos constituintes gasosos H_2 e CO , efetuando a redução da carga sólida ao longo da ZR; (ii) aporte térmico a esta zona; (iii) contribuição à manutenção, o controle e a homogeneização da temperatura no interior da ZR. É obtido a partir do gás reformado, o qual recebe uma primeira injeção de oxigênio, objetivando o aumento e controle da temperatura (“bustle gas temperature”) e uma segunda injeção de gás natural, enriquecendo-o com CH_4 , para a reforma “in situ” na ZR;
 - *na saída da zona de redução (ZR)*: tem-se o gás de topo, que ao passar pelo “scrubber”, é lavado com água, resfriando-se, por consequência. Um sistema de compressores faz a compressão do gás de topo lavado, recebendo a denominação de gás de processo, cuja capacidade de recirculação é determinante para a produtividade do reator, que, por sua vez, define-se pela capacidade de projeto destes compressores, cujo impacto dá-se pela permeabilidade do leito de minério em descendência ao longo da ZR. Seguindo o fluxo, tem-se o gás de processo sendo misturado com gás natural, quase que simultaneamente a sua temperatura, novamente elevada, através de equipamentos denominados de pré-aquecedores. Esta mistura pré-aquecida de gás de processo com gás natural é, continuamente, alimentada no reformador, para a produção de gás reformado.
- ⇒ Circuito gasoso que atende à etapa de resfriamento: abrange o fluxo gasoso que, ao deixar a zona de resfriamento (ZA), é lavado em um outro “scrubber”, resfriado e desumidificado. Antes de retornar à ZA em circuito fechado, o gás resfriado recebe um enriquecimento com gás natural.

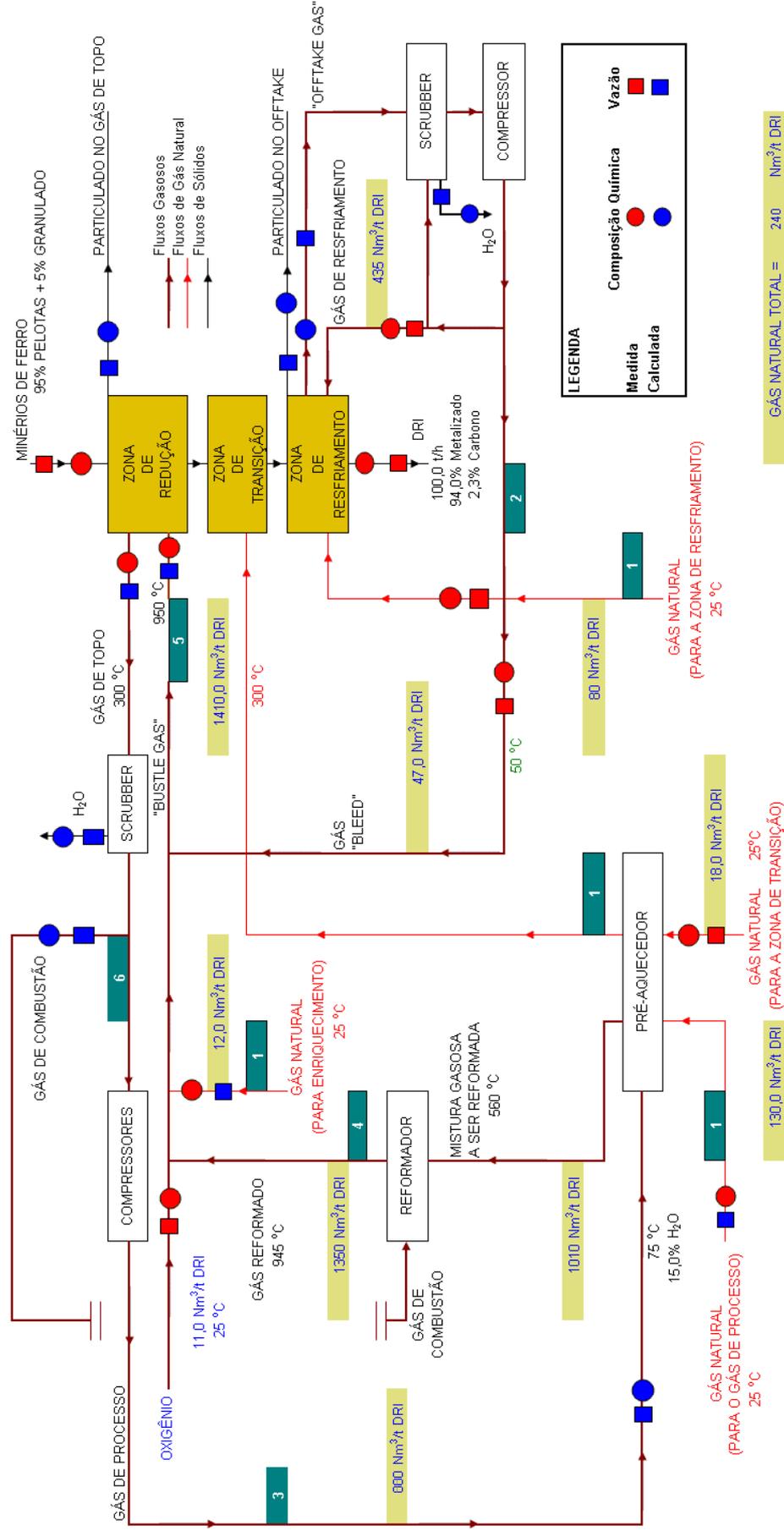


Figura 95 – Principais fluxos gasosos típicos em uma planta industrial típica segundo a tecnologia Midrex, para a condição de descarga de ferro-esponja, após resfriado.

Os circuitos que atendem à ZR e à ZA podem ser interligados com um fluxo contínuo, denominado como gás “bleed”, cuja função básica seria de equalização das pressões entre tais regiões, minimizando a indesejável transferência de parte do gás da ZA para a ZR através da zona de transição (ZT) e vice-versa. Por exemplo, nos casos específicos em que o chamado “upflow” ocorre (fluxo gasoso em ascendência da ZA para a ZR via ZT), uma queda na temperatura do leito na ZR poderá ser observada, em função da menor temperatura dos gases de resfriamento e pela característica altamente endotérmica dos mesmos, justificada pela alta presença de CH_4 , que, primordialmente, tenderá a decompor-se em CO e H_2 , pela reforma “in situ” para as condições reinantes na ZR.

A figura 95 também detalha, em cada fluxo, o que é susceptível de medição (círculo e quadrados em vermelho) e o que, normalmente, necessita de cálculo (círculos e quadrados em cor azul), seja em termos de vazão ou de composição química, como se pode verificar por meio da legenda desta figura.

Ao se levar em consideração a figura 95, nota-se que algumas entradas e saídas, mostradas na figura 94, necessitam ser calculadas, a partir do fechamento do balanço de massa dos circuitos gasosos adjacentes ao módulo de redução, propriamente dito. Nestes cálculos, está também embutido o balanço de massa do reformador.

Uma possível evolução do atual modelo DR seria o equacionamento do balanço térmico do reformador e do sistema de pré-aquecimento. Adicionalmente, sugere-se implementar o cálculo da temperatura de chegada do “bustle gas”, a partir das injeções do oxigênio e gás natural, no fluxo gasoso proveniente do reformador.

4.3.4.

Considerações sobre os fluxos de sólidos para fechamento do balanço de massa e de energia global no forno de redução

No que diz respeito ao fluxo de sólidos, destaca-se a consideração da seleção de distintos tipos de minérios de ferro, pelo modelo DR, seja na forma de pelotas ou de minérios granulados. Conforme mostradas na figura 96, as características químicas e granulométricas de cada minério são dados de entrada para o sistema. A tendência à degradação sob redução é também considerada. A escala granulométrica utilizada pode ser com até 15 peneiras, cuja transformação (por interpolação) é feita pelo sistema, no padrão de cálculo.

		material # 1	material # 2	material # 3	material # 4	material # 5	Ore burden average		
Composition (wet base)	Gangue ...	% in burden	25	25	25	25			
		%FeTotal	68,39	68,04	67,69	67,34	67,87		
		%Fe ⁺⁺ as FeO	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17		
		Humidity	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
		SiO ₂	0,70	1,20	1,60	2,00	1,38		
		Al ₂ O ₃	0,30	0,30	0,40	0,50	0,38		
		CaO	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80		
		MgO	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15		
		Mn as MnO ₂	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05		
		P as P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04		
		Other	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20		
				Edit					
		Physical properties	Granulometric analysis	ρ _{aparent} (kg x m ⁻³)	2 100	2 100	2 100	2 100	2 100
porosity (%)	34,00			34,00	34,00	34,00	34,00		
average diameter (mm)	13,77			13,77	13,77	13,77	13,77		
+37,59 mm	0,14			0,14	0,14	0,14	0,14		
-37,59 → +31,62	0,12			0,12	0,12	0,12	0,12		
-31,62 → +26,59	0,10			0,10	0,10	0,10	0,10		
-26,59 → +22,36	0,08			0,08	0,08	0,08	0,08		
-22,36 → +18,22	27,91			27,91	27,91	27,91	27,91		
-18,22 → +11,18	40,41			40,41	40,41	40,41	40,41		
-11,18 → +7,91	27,84			27,84	27,84	27,84	27,84		
-7,91 → +6,68	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02				
Bottom	2,40	2,40	2,40	2,40	2,29				
		Edit							
		φ shape factor	1,00	1,00	1,00	1,00			
		fine generation test	LTSI	LTSI	LTSI	LTSI			
		Edit							

Figura 96 – Tela do modelo DR disponível ao usuário para ingresso das características de cada componente da carga ferrífera. Os nomes e valores que aparecem em cada minério são apenas ilustrativos.

Conforme ocorrência normal em indústrias, foram contempladas etapas de peneiramento, tanto anterior quanto posteriormente, ao forno de redução.

Neste sentido, após a operação de retomada do pátio de matérias-primas e, anteriormente, ao seu carregamento pelo topo do reator, conforme ilustra a figura 97, definiu-se no modelo, que os distintos minérios de ferro selecionados passariam por uma etapa de peneiramento com eficiência conhecida (ϵ_{PEN}).

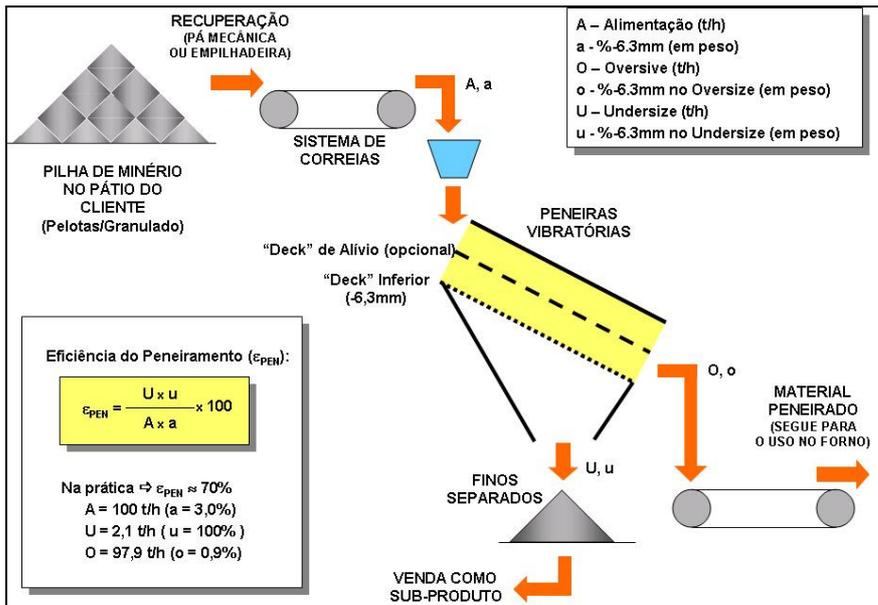


Figura 97 – Esquema ilustrativo da etapa de peneiramento dos minérios previamente enforados no módulo de redução direta, conforme considerado pelo balanço de massa global do modelo termoquímico de redução direta.

Com esta operação, elimina-se a fração mais fina, naturalmente, contida nos minérios, prejudicial à permeabilidade do leito ao longo de todo o forno, sempre que excessivamente presente. Esta fração, normalmente, é definida como sendo abaixo de 6,3mm, mas o modelo permite assumir outros tamanhos de corte. Da granulometria alimentada no peneiramento e da eficiência do referido sistema, consegue-se estimar a distribuição granulométrica dos minérios, que efetivamente ingressam no forno. Uma boa prática de amostragem, antes e após a estação de peneiramento em questão, é recomendável como forma de se obter um bom conhecimento dos parâmetros de classificação, por tamanho, para os distintos minérios.

Uma vez sabido que o forno recebe certo percentual de finos, via minérios enforados pelo topo, o modelo também foi concebido para estimar as quantidades de particulados que, respectivamente, emanam pelo gás de topo, pelo “off-take gas” e descarregados junto com o DRI. Para tanto, foi desenvolvido um conjunto de cálculos objetivando o balanço de particulados de granulometria mais fina, ao longo do forno de cuba (figura 98), tornando-se indispensável à predição, de forma mais precisa possível, da distribuição granulométrica dos minérios que efetivamente ingressam o forno pelo topo. Contribui ainda, como dado de entrada para a determinação da partição destes dois fluxos de particulados, o grau de metalização tipicamente encontrado para o material particulado no gás de topo.

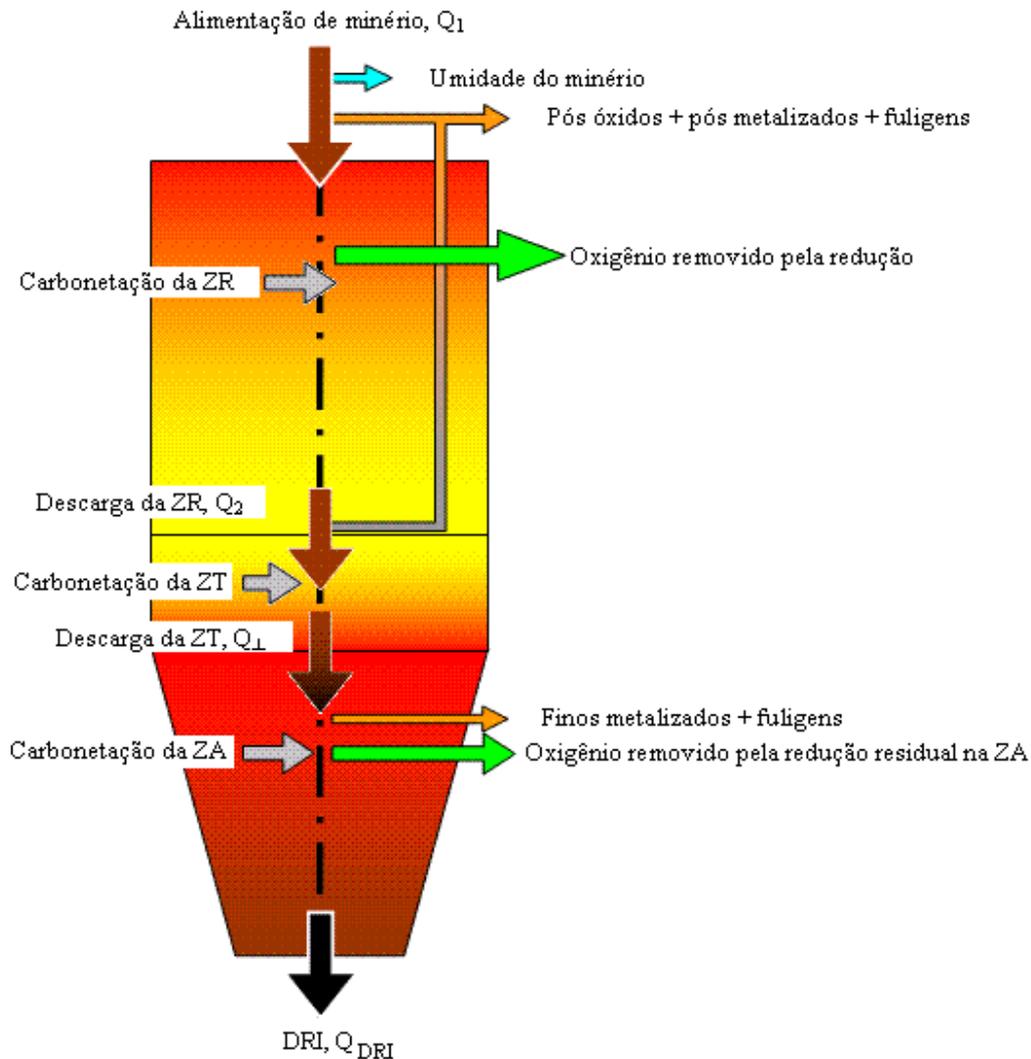


Figura 98 – Esquema dos fluxos de sólidos através do forno de cuba assomada no modelo DR. As variáveis que aparecem nesta figura, tais como Q_1 , Q_2 , Q_{DRI} e Q_L , são vazões mássicas e estão em t/h.

A tendência de degradação de cada minério e, portanto, à geração de finos sob aquecimento e condições de redução dentro do reator — determinada a partir de ensaios laboratoriais específicos — também é computada — como já dito — e é utilizada pelo modelo para fechamento do balanço de particulados. Recomenda-se, neste caso, a adoção e o desenvolvimento de ensaios laboratoriais que representem da melhor forma possível o fenômeno de crepitação e de degradação sob redução, para as condições industriais dentro do forno industrial. É desnecessário dizer que, quanto maior for a representatividade entre os dados obtidos em laboratório e o que ocorre industrialmente, o modelo, mais próximo da realidade, terá condições de prever seus resultados. Este trabalho não abordou este tipo de desenvolvimento e fica como sugestão para futuros desenvolvimentos.

Ainda para efeito de consideração, por parte do balanço de finos em discussão, adiciona-se, como informação relevante, a necessidade de determinar, separadamente, os tamanhos máximos de partícula provenientes do pó de topo e do material particulado, contido no “offtake gas”, respectivamente. Naturalmente, estes dois parâmetros são dados empíricos, os quais variam, de operação para operação. A partir deste conjunto de informações, o modelo consegue esti-

mar qual seria a quantidade total de particulados (em kg/t_{DRI}), sendo arrastado pelo gás de topo e pelo “offtake gas”.

Para operações de redução direta, contemplando a etapa de resfriamento do material metalizado dentro do reator, foi possível, adicionalmente, contemplar, no modelo em pauta, a submissão do ferro-esponja a uma segunda fase de classificação por tamanho (peneiramento), após ser descarregado do reator, objetivando a eliminação da fração metalizada fina, sempre existente em maior ou menor quantidade. Pode-se fazer a opção, pela segregação da fração abaixo, de 3,15mm, como ocorre usualmente para o caso do DRI, conforme esquematizado na figura 99.

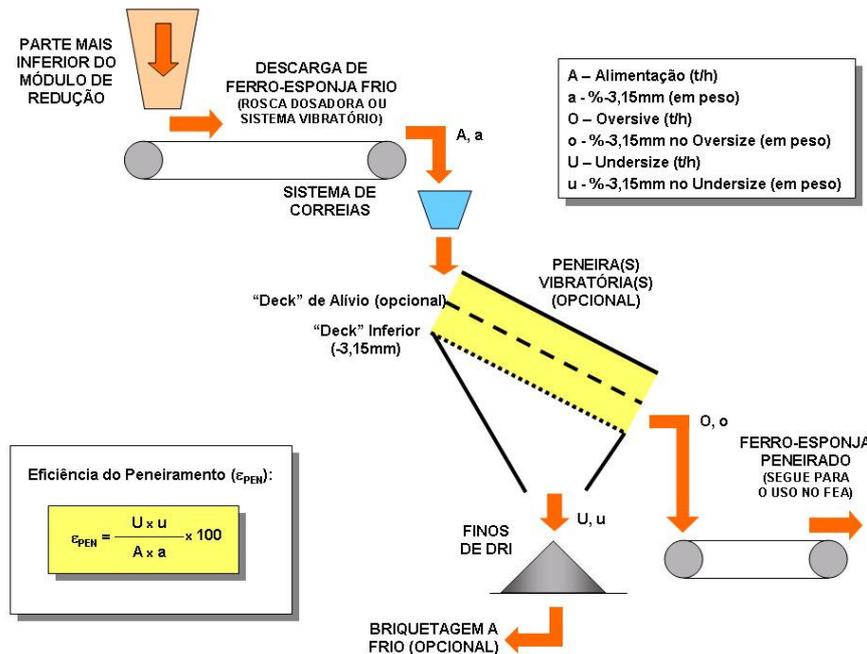


Figura 99 – Esquema ilustrativo da etapa de peneiramento do DRI desenformados no módulo de redução direta, conforme considerado pelo balanço de massa global do modelo termoquímico de redução direta.

4.3.5.

Alguns detalhes importantes sobre o modelo DR original construído a partir dos balanços estagiados de massa e de energia através do forno de cuba

Em complemento ao que foi introduzido na seção 4.4.1, a concepção original do modelo DR contemplava — e esta opção ainda existe — a análise detalhada dos fluxos de sólidos e de gases, bem como o balanço térmico, em cada uma das três zonas, ao longo do reator de redução direta. Uma vez que, nas seções de 4.4.2 a 4.4.4, optou-se por apenas detalhar o modelo DR, em sua versão mais simplificada (balanços globais de massa e de energia), será dada ênfase, nesta seção, a um maior esclarecimento sobre a formulação estagiada.

Através da figura 100, é possível visualizar quais os principais parâmetros são considerados para o fechamento dos referidos balanços na zona de redução. Já nas figuras 101 e 102, esquematicamente, informam sobre os parâmetros primordiais para os cálculos nas zonas de transição e de resfriamento, respectivamente.

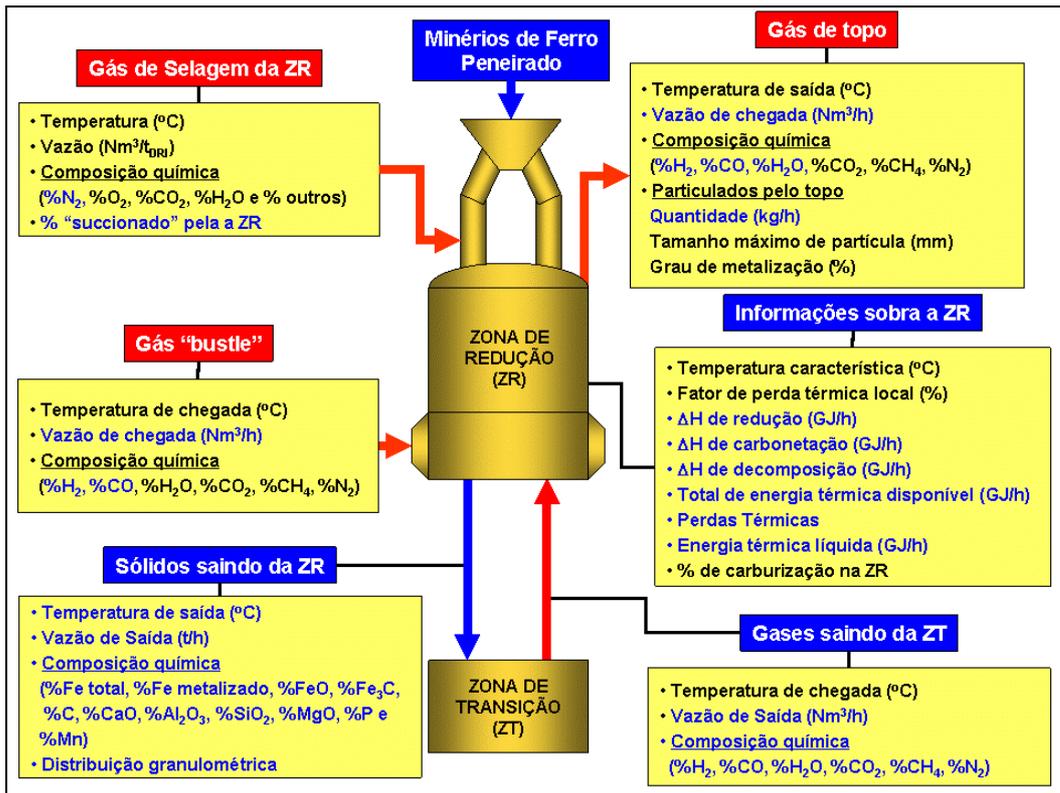


Figura 100 – Detalhamento de informações no fechamento do balanço de massa e de energia na zona de redução. Os parâmetros de cor preta representam os dados de entradas a serem inseridos no modelo e os parâmetros de cor azul representam os dados calculados pelo modelo.

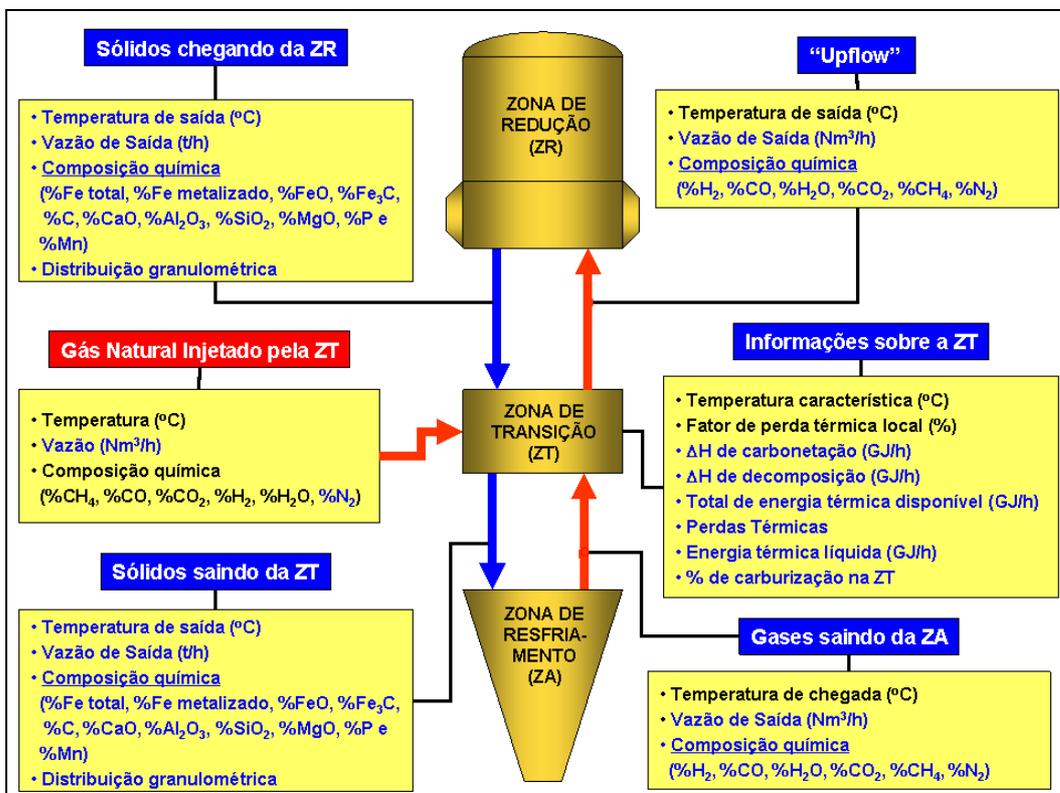


Figura 101 – Detalhamento de informações no fechamento do balanço de massa e de energia na zona de transição. Os parâmetros de cor preta representam os dados de entradas a serem inseridos no modelo e os parâmetros de cor azul representam os dados calculados pelo modelo.

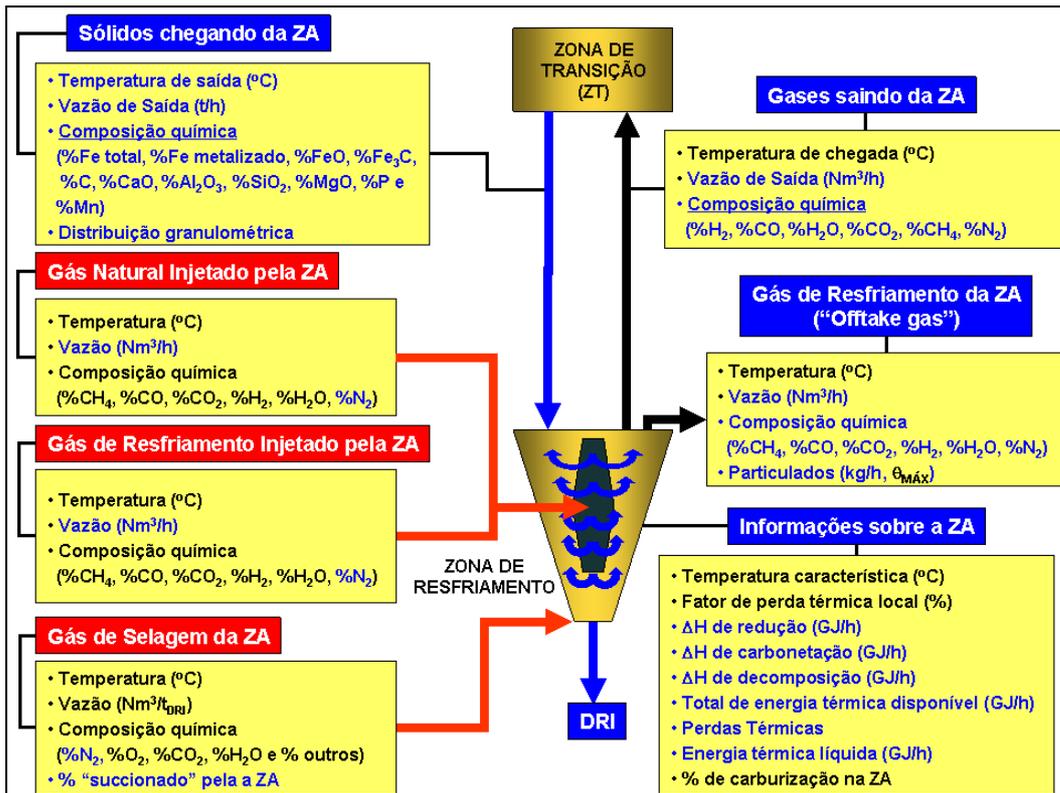


Figura 102 – Detalhamento de informações no fechamento do balanço de massa e de energia na zona de transição. Os parâmetros de cor preta representam os dados de entradas a serem inseridos no modelo e os parâmetros de cor azul representam os dados calculados pelo modelo.

Em complemento ao que foi discutido acerca das figuras 96 e 97, tem-se a figura 103 e 104, com mais detalhes sobre as informações e etapas que precedem o carregamento de minério de ferro pelo topo. Evidencia-se que a correção da granulometria, pela etapa de peneiramento, deve ser considerada para o material carregado.

Sobre estes fins resultantes do peneiramento — usualmente vendido, impactando, por conseqüência, o balanço econômico da planta de redução direta — cabe comentar que sua quantidade é, diretamente, dependente:

- da qualidade do(s) minério(s) recuperado(s), a partir do pátio do cliente, sendo que minérios mais friáveis geram mais finos;
- da eficiência conseguida na operação do sistema de peneiramento, a partir de uma dada abertura para as malhas de classificação, como mostrado na figura 104, em adição à 97.

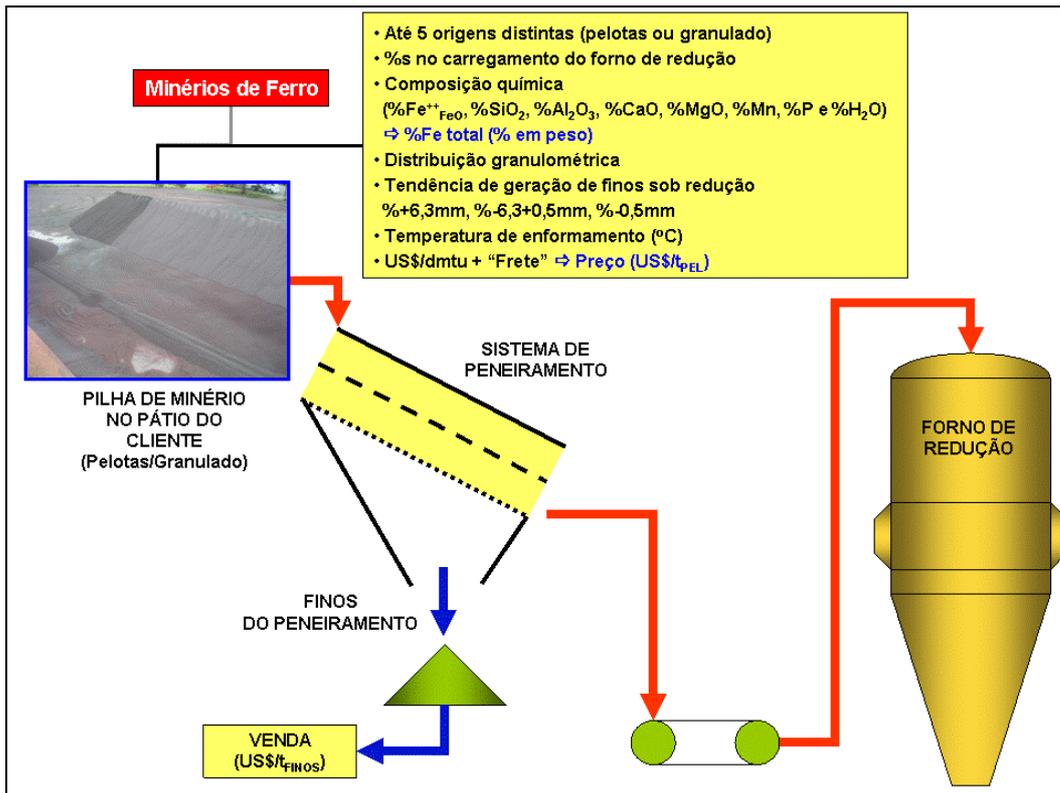


Figura 103 – Detalhamento de informações consideradas pelo modelo DR sobre os minérios a serem enfiados pelo topo do reator de redução.

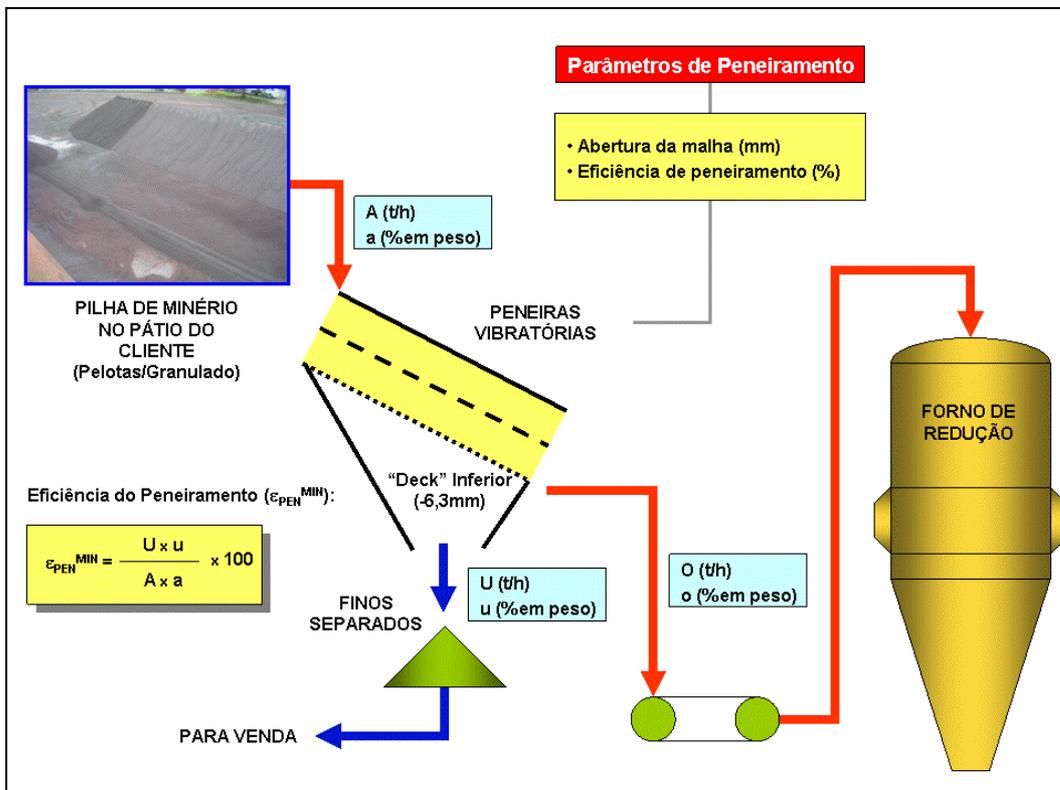


Figura 104 – Detalhamento de informações consideradas pelo modelo DR sobre o sistema de peneiramento de minérios.

Para o fechamento dos cálculos da zona de resfriamento (ZA), além das informações explicitadas na figura 103, é necessário que se considere as informações relativas ao ferro-esponja obtido, como apresentado pela figura 105.

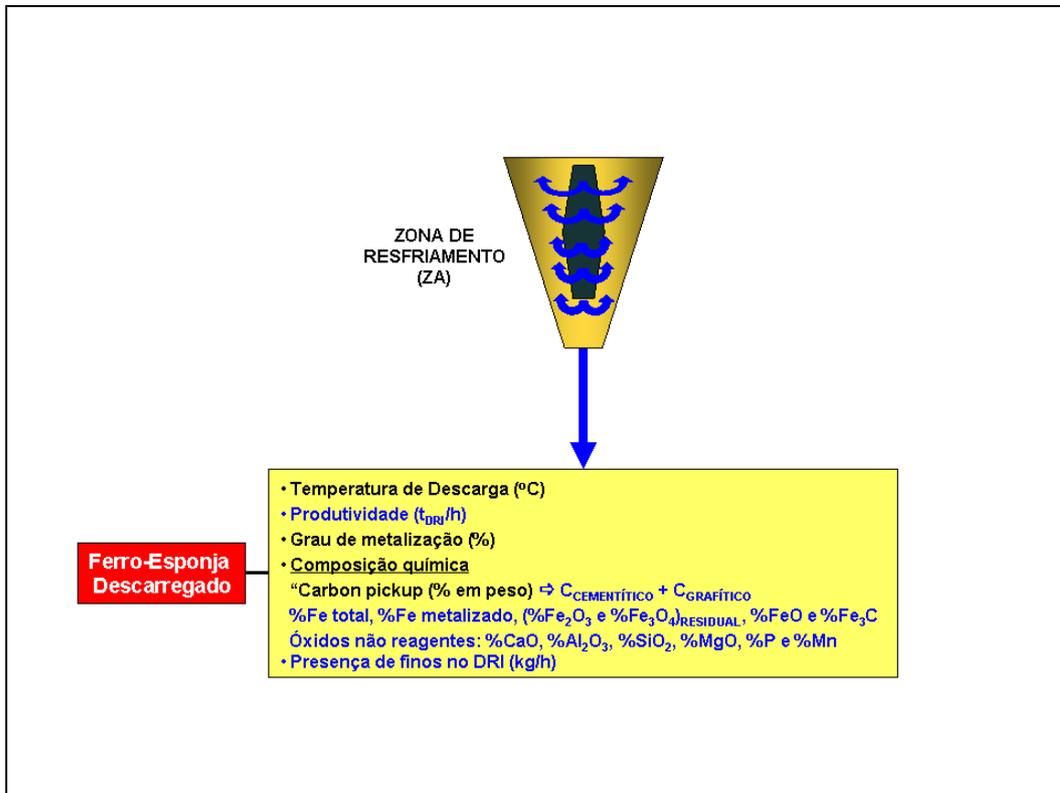


Figura 105 – Informações consideradas pelo modelo DR sobre as características do ferro-esponja a ser descarregado. Os parâmetros de cor preta representam os dados de entradas a serem inseridos no modelo e os parâmetros de cor azul representam os dados calculados pelo modelo.

Com mais detalhes que a figura 99, tem-se a 106, abrangendo as considerações sobre o fluxo de sólidos, tipicamente possíveis para uma operação de descarga a frio de ferro-esponja, evidenciando as operações de peneiramento do DRI descarregado e a possibilidade de briquetagem dos finos separados, bem como o custo específico associado a esta operação. Deve ser destacado que o modelo deixa à escolha do usuário o tamanho de classificação a ser empregado, sendo que, usualmente, adota-se 3,15mm. Uma vez conhecida qual é a eficiência de operação deste segundo estágio de peneiramento, a mesma poderá ser informada ao modelo.

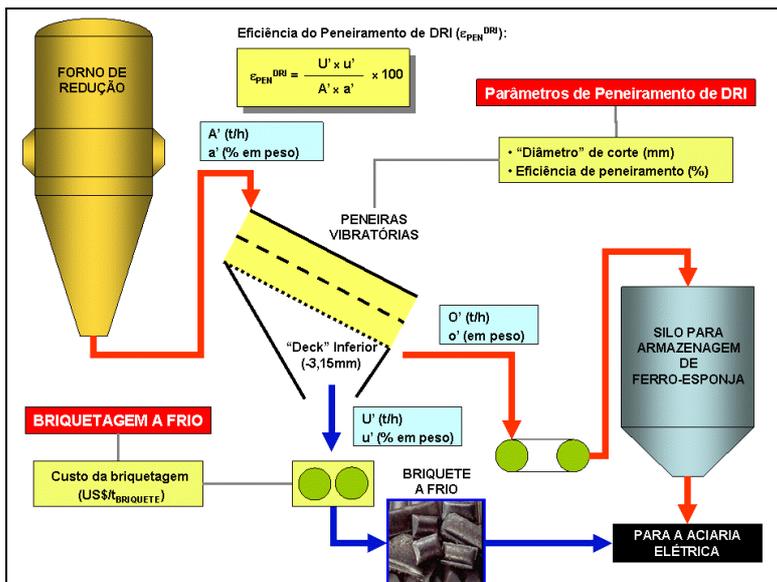


Figura 106 – Informações consideradas pelo modelo DR sobre as possíveis etapas de processamento do ferro-espunja após descarregado a frio e antes do envio para a aciaria elétrica.

Conclui-se, aqui, que o modelo termoquímico, especialmente desenvolvido para o processo de redução direta envolveu aspectos inéditos no ataque do problema clássico do equacionamento mássico e energético de um sistema metalúrgico, já que a modelagem construída não se limitou a uma abordagem, exclusivamente, termodinâmica.

4.4. Modelo EAF

4.4.1. Considerações gerais

Originalmente, o modelo termoquímico do processo de fabricação de aço líquido ⁽¹¹⁵⁾, em fornos elétricos a arco, foi desenvolvido pela empresa RSConsultants e teve os seus direitos de utilização adquiridos pela Samarco, a partir de 2002. Este segundo programa computacional necessitou, ao longo deste trabalho, de algumas modificações, conduzidas pela própria RSConsultants, a fim de o tornar ainda mais atualizado e próximo da realidade industrial, tecnologicamente vigente, de produção de aço líquido via FEA. As modificações conduzidas contemplaram a possibilidade de injeção de gás natural (figura 107), através de queimadores “oxi-fuel” — cuja finalidade já foi descrita na seção 3.8.6 — dada à viabilidade desta prática em empresas que adotam a rota DR – EAF.

Mod_EAF

EAF STATIC THERMOCHEMICAL MODEL AND OPTIMUM METALLIC CHARGE MIX CALCULATION

POST COMBUSTION, % 30

ELEMENTS DISTRIBUTION Resultant steel

OFF GAS TEMPERATURE 1150

EAF DATA Electrode/Refra/Pipes

CHARGE MIX DEFINITION BOLINA
FLUOSPAR

DUSTS LIME

TOUCH FOR RESULTS CHARGE MIX WEIGHT

ENTHALPY BALANCE SLAG VOLUME (kg/t)

BURNERS INPUT AIR Infiltrated

LIQUID STEEL TEMPERATURE, °C 1600

SLAG TEMPERATURE, °C 1660

ELECTRICITY, (kWh/t): 324.8

OXYGEN for Carbon 47.7

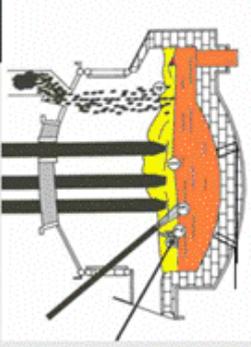
CARBON IN (kg/t) 6.60

MY = 89.78

SLAG VOLUME (kg/t) 184.8

TAP-TO-TAP TIME (min) 47.72

THERMAL YIELD 60.32%



HTC % = 70

Full PROGRAM OPTIONS

BURNERS	NG, Nm ³ /t	VO ₂ , Nm ³ /t	kWh/t
Burner-GN1	0.6	1.1	4.5
Burner-GN2	0.6	1.1	4.5
Burner-GN3	0.6	1.1	4.5
Burner-GN4	0.6	1.1	4.5
Burner-GN5	0.6	1.1	4.5
Burner-GN6	0.6	1.1	4.5
Burner-GNtotal	3.5	6.3	27.0
kWh/Nm ³ GN	-	4.3	

O₂ Efficiency, % = 98

POWER-ON, min 39.7

POWER-OFF, min 8.0

PRODUCTIVITY, t/h 138.30

AUTHORS



OFF GAS, Nm ³ /t	146.1
OffGas from Burners Nm ³ /t	9.9
Total off gas Nm ³ /t	62.7
	255.5

Nm³/min

operatGestor GLOBAL Macro1 Resultados Custo1 Custo2 Entalpia ToColist

Figura 107 – Tela principal de acesso ao modelo EAF (115)

Assume-se ⁽¹¹⁵⁾ o modelo EAF como ferramenta para as seguintes principais aplicações:

- para conhecimento do processo de fusão de metais em FEA;
- para simulação de cenários e práticas operacionais com FEA;
- para controle estatístico da fusão de sucatas, ferros primários (incluindo pré-reduzidos), gusa sólido e gusa líquido;
- para avaliações do valor de uso de unidades de ferro para aciarias elétricas.

Da mesma forma que o modelo DR foi preparado para uso neste trabalho, o modelo EAF resolve um balanço de massa e de energia global, para o processo de produção de aço líquido. Adicionalmente, possui um modelo de otimização simplex que, dentro todas as cargas metálicas, minimiza o custo de aço produzido, maximizando o lucro da referida operação. É possível também obter curvas, demonstram alguns dados de produção, em função de variáveis da carga metálica, como a metalização do pré-reduzido ou o teor de carbono do gusa, bem como, curvas comparando várias cargas metálicas, quanto à energia elétrica requerida, escória formada e volume de oxigênio gasto.

Para que se pudesse concluir este trabalho dentro do prazo máximo estipulado pelo programa de pós-graduação, foi também fundamental ter se mostrado viável a aplicação do modelo termoquímico de forno elétrico a arco, desenvolvido pela RS Consultants.

Sob estímulo e patrocínio deste projeto, o aprimoramento do modelo, acima mencionado, de forno elétrico a arco, a partir do consumo e queima de gás natural, via queimadores do tipo “oxi-fuel”, também viabilizará a aplicação desta ferramenta junto a um número maior de clientes de redução direta, cuja prática é bastante adotada, geralmente associada à maior disponibilidade deste insumo energético.

4.4.2.

Variáveis de entrada e de saída do modelo EAF

As figuras 108 e 109 ilustram como o modelo EAF considera as distintas fontes de material metálico. Adicionalmente, tem-se a figura 110, trazendo informações sobre quais os fundentes possíveis de adição no modelo, em linha com o que já foi discutido na seção 3.8.7, 3.8.9 e 3.9.3. A adição de carbono está também prevista, como mostra a figura 111. Os principais resultados calculados, pelo modelo, encontram-se listados na figura 112. Estes resultados, por sua vez, para serem calculados, exigem a definição de uma série de parâmetros enumerados e categorizados, como na figura 113.

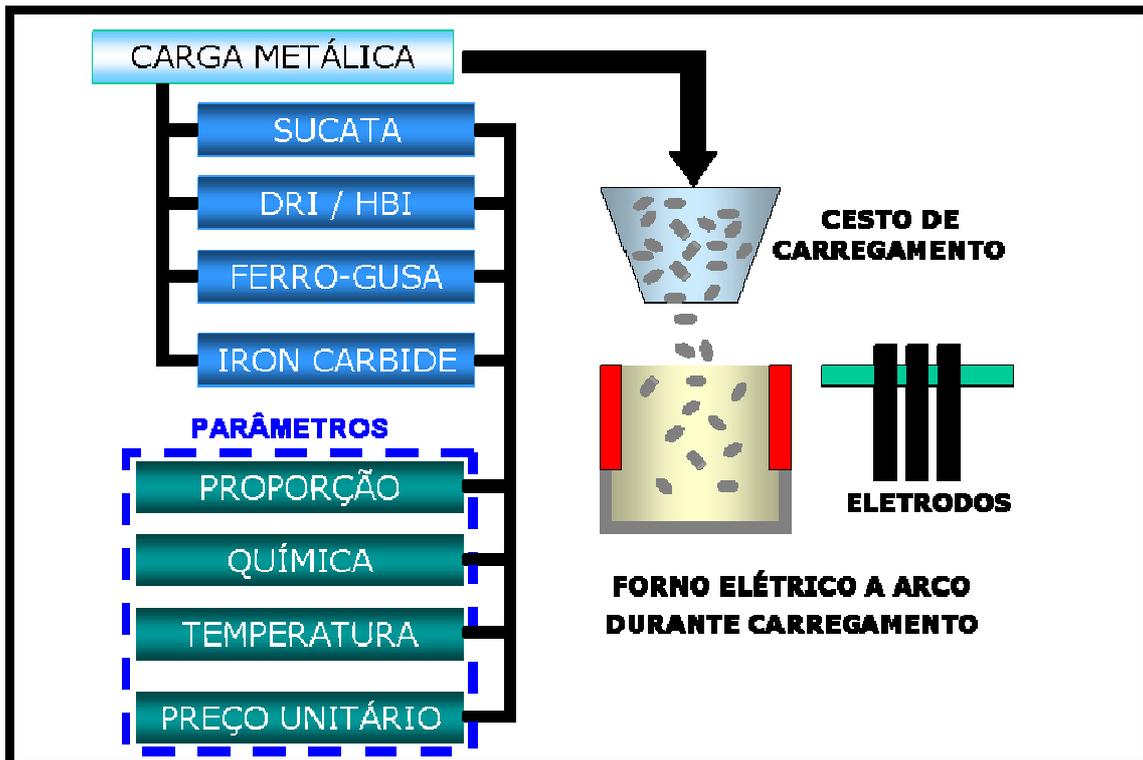


Figura 108 – Materiais metálicos que podem ser considerados no modelo EAF ⁽¹¹⁵⁾.

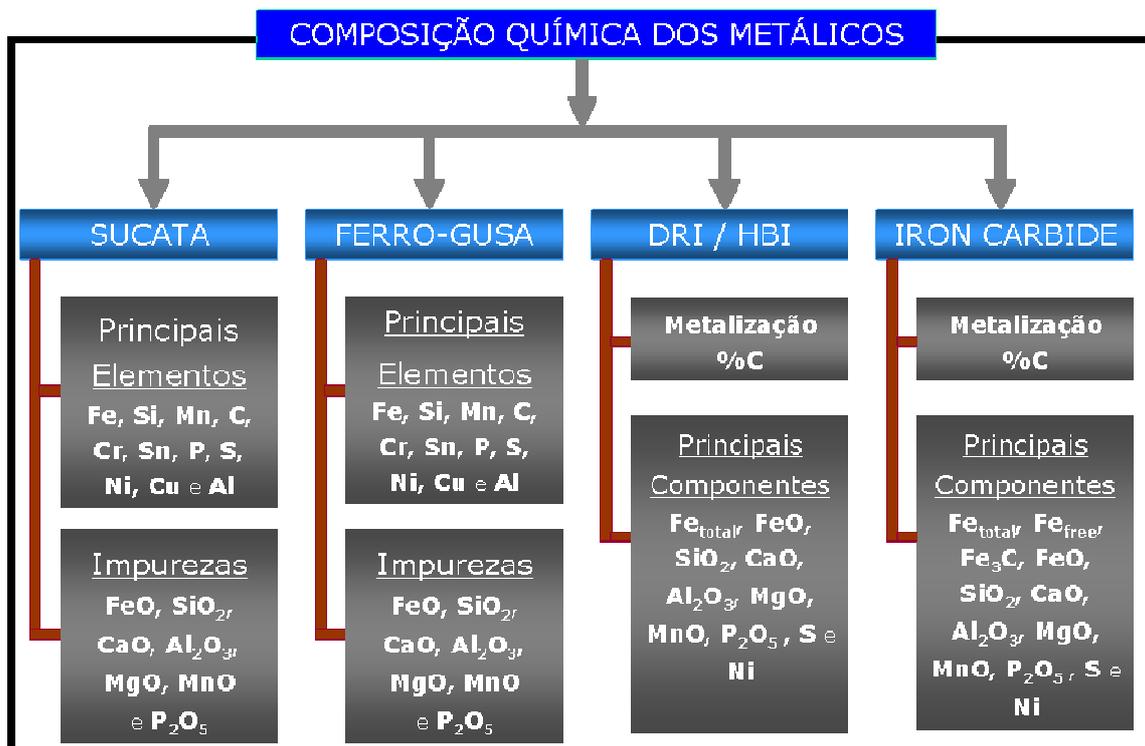


Figura 109 – Composição química dos materiais metálicos considerados no modelo EAF ⁽¹¹⁵⁾.

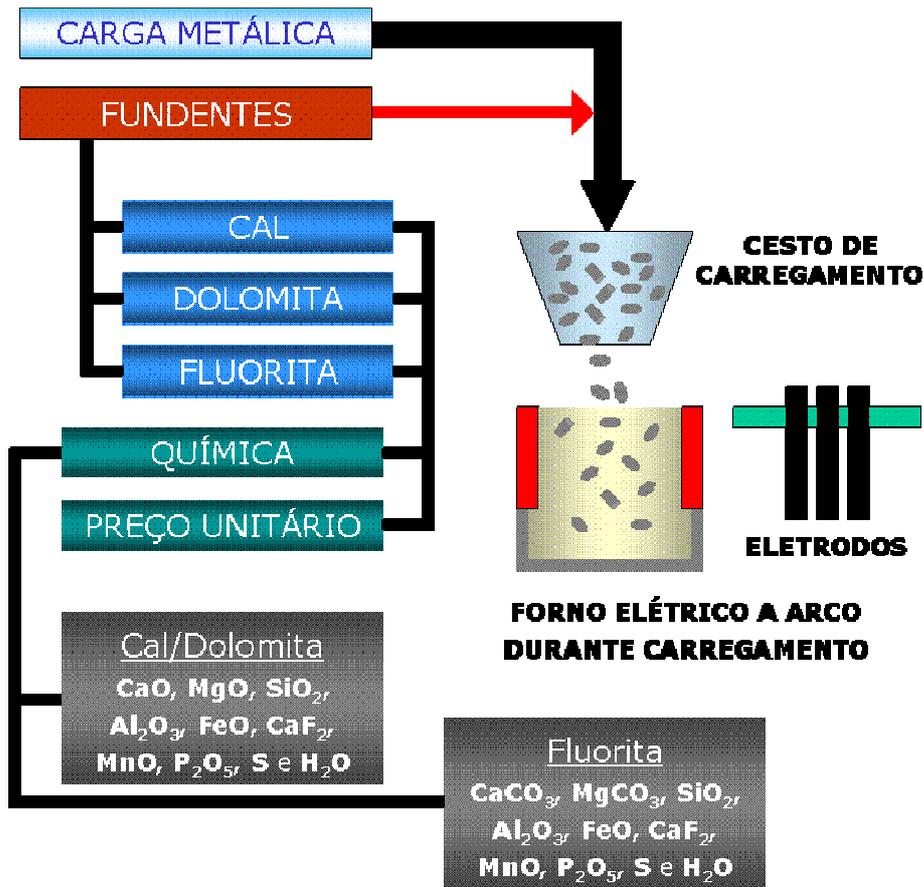


Figura 110 – Fundentes considerados no modelo EAF ⁽¹¹⁵⁾.

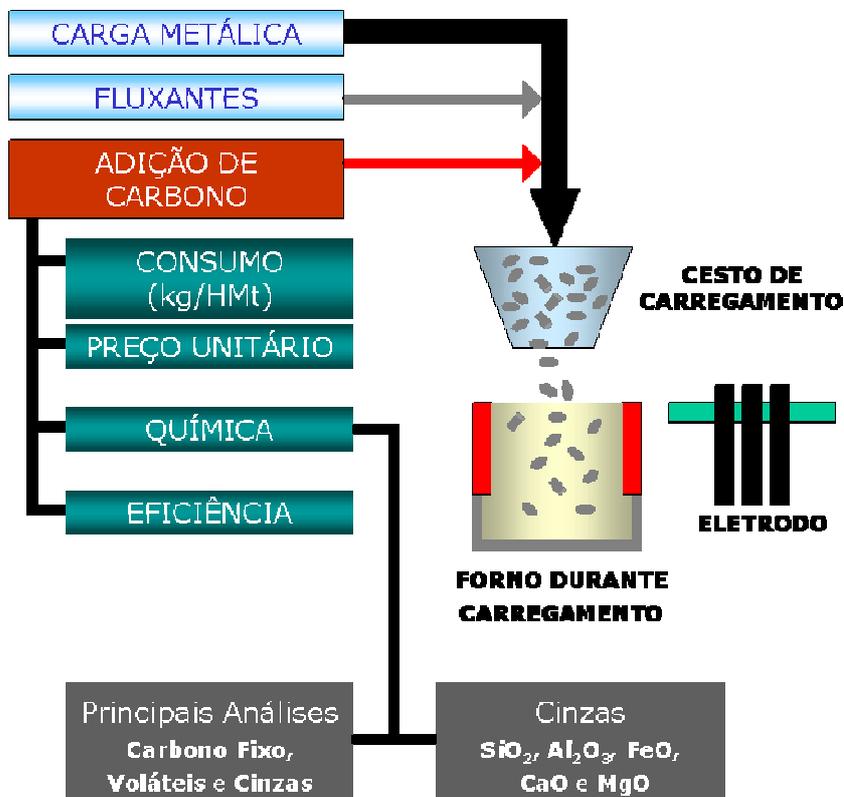


Figura 111 – Adição de carbono considerado no modelo EAF ⁽¹¹⁵⁾.

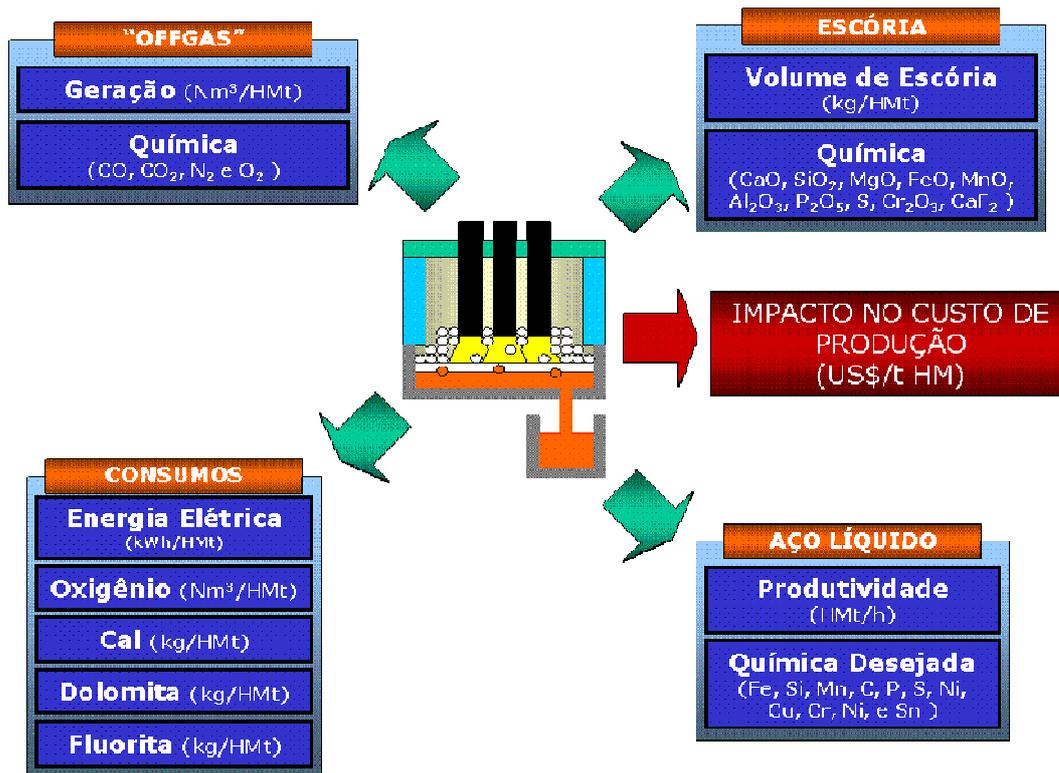


Figura 112 – Principais resultados que são capazes de ser calculados pelo modelo EAF⁽¹¹⁵⁾.

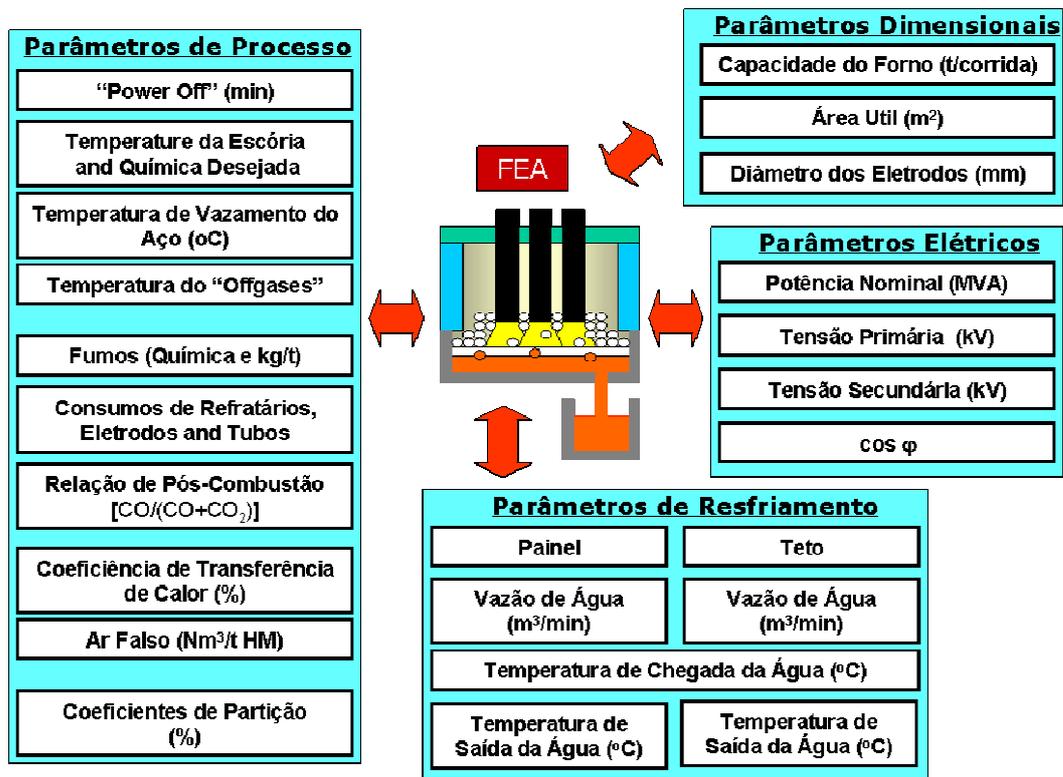


Figura 113 – Parâmetros considerados pelo modelo EAF⁽¹¹⁵⁾.

4.5. Modelo GESTOR

4.5.1. Considerações gerais

Como foi introduzido na seção 4.2, o modelo GESTOR foi concebido para trabalhar de forma integrada com os modelos DR e EAF. Objetiva, fundamentalmente, otimizar o custo de produção de aço líquido pela rota RD - FEA. O GESTOR é ainda capaz de determinar o valor de uso de um minério de ferro de interesse, a partir de uma condição ótima desta operação.

Mais precisamente, o programa computacional considera a porção da rota RD-FEA, que abrange as seguintes fases:

- seleção dos minérios de ferro;
- subsequente aplicação destes minérios de ferro na etapa de redução direta para obtenção de ferro-esponja;
- subsequente utilização do ferro-esponja obtido na fabricação de um especificado aço líquido via forno elétrico a arco até a sua obtenção e vazamento.

Desta forma, cabe esclarecer que, não foi incorporada ao escopo deste trabalho a modelagem de qualquer processo clássico de refino secundário e outras etapas típicas, que possam estar após o vazamento do aço, a partir do FEA, ficando como sugestão para futuras implementações. Futuramente, será possível a incorporação de outros modelos, representativos de outras tecnologias (tradicionais ou emergentes) de fabricação de ferro primário ou de aço líquido. Enfatiza-se que esta é uma característica muito importante, marcante e inovadora do modelo GESTOR, em termos de filosofia, a qual buscou-se preservar desde o início da sua criação. Neste contexto, as futuras versões do modelo GESTOR poderão contemplar, por exemplo:

- que o suprimento de gusa líquido – ou mesmo sólido - para a aciaria elétrica poderá ser feito a partir de um alto-forno a coque ou a carvão vegetal;
- que tecnologias emergentes de produção de ferro-gusa também possam ser consideradas, de forma paralela e/ou opcional ao alto forno;
- que o suprimento de pré-reduzido para a aciaria possa também considerar outras tecnologias existentes ou em desenvolvimento;
- que o aço líquido possa também ser elaborado, a partir de tecnologias a oxigênio.

4.5.2. Aspectos matemáticos e computacionais

Operacionalmente, o sistema atua coordenando os cálculos dos modelos subjacentes (modelos DR e EAF), representativos das operações unitárias envolvidas na transformação das cargas de minério de ferro no produto final: um

ação líquido com especificação composicional definida no vazamento, a partir do FEA.

Os modelos termoquímicos operados pelo GESTOR foram codificados em uma só plataforma computacional (em VBA) e, à escolha da sua lógica algorítmica, levou-se em consideração a concepção heterogênea da lógica que cada um dos modelos gerenciados, uma vez que todos eles foram concebidos independentemente.

Dada esta contingência, a robustez e estabilidade do método matemático de otimização são de primordial importância. Além do mais, adições de novos modelos detalhando melhor a cadeia siderúrgica, em questão, ficam viáveis do ponto de vista estrutural. Entende-se como robustez, a capacidade do processo de otimização de tratar uma situação genérica, na busca de uma solução. E como estabilidade, a importante capacidade do mesmo de sempre convergir a uma solução.

Matematicamente, algumas das opções encontram-se disponíveis para o processo de otimização^(117, 118):

- método dos gradientes em direções conjugadas, a exemplo, o método de Powell;
- método de minimização por tentativas, com destaque para o método "Simplex".

Apesar da rapidez e potencial de economia de processamento representados pelos métodos que se baseiam em gradientes, o processo de cálculo é, definitivamente, longe de robusto e estável. Tendo em vista estes aspectos e, para segurança na obtenção dos resultados, decidiu-se, na construção do gestor, pela adoção do método de minimização por tentativas (simplex ortogonal), genericamente ilustrado na figura 114.

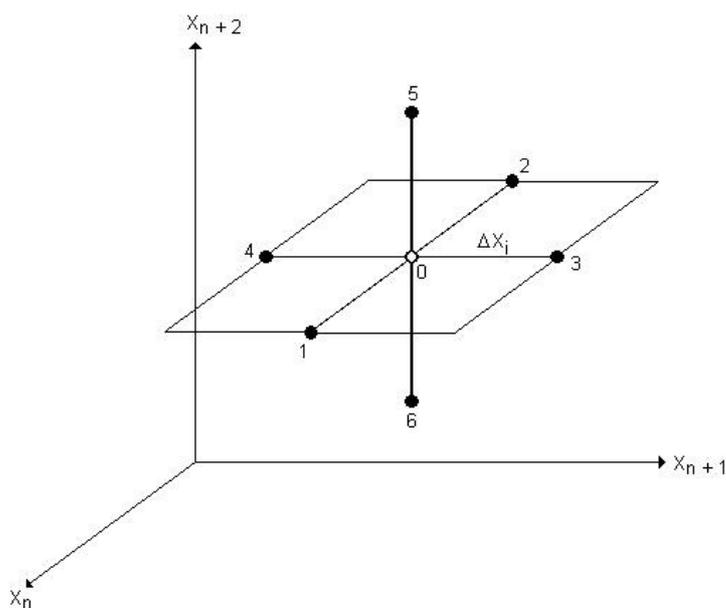


Figura 114 – Diagrama do processo de otimização pela técnica de minimização por tentativas segundo o método simplex ortogonal. Legenda: "0": estado atual do modelo; "1"..."6": tentativas do ciclo de convergência em torno do estado atual^(117, 118).

4.5.3. Nomenclatura das entidades do GESTOR

Para cada modelo subjacente, o GESTOR lida com um número de variáveis, as quais foram denominadas de parâmetros. Estes, por definição, alteram, com significância, outras variáveis-respostas, que por sua vez, foram designadas como resultados, os quais são o foco da otimização. Extensivamente para o modelo FEA e, como mostrado pela figura 115, listam-se como parâmetros:

- grau de metalização do DRI (%);
- “carbon pickup” do DRI (% em peso);
- percentual (em peso) de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ do DRI;
- teor de CaO no DRI (% em peso);
- percentual (em peso) de sucata na carga metálica;
- percentual (em peso) ferro-gusa na carga metálica;
- percentual (em peso) de gusa líquido na carga metálica.

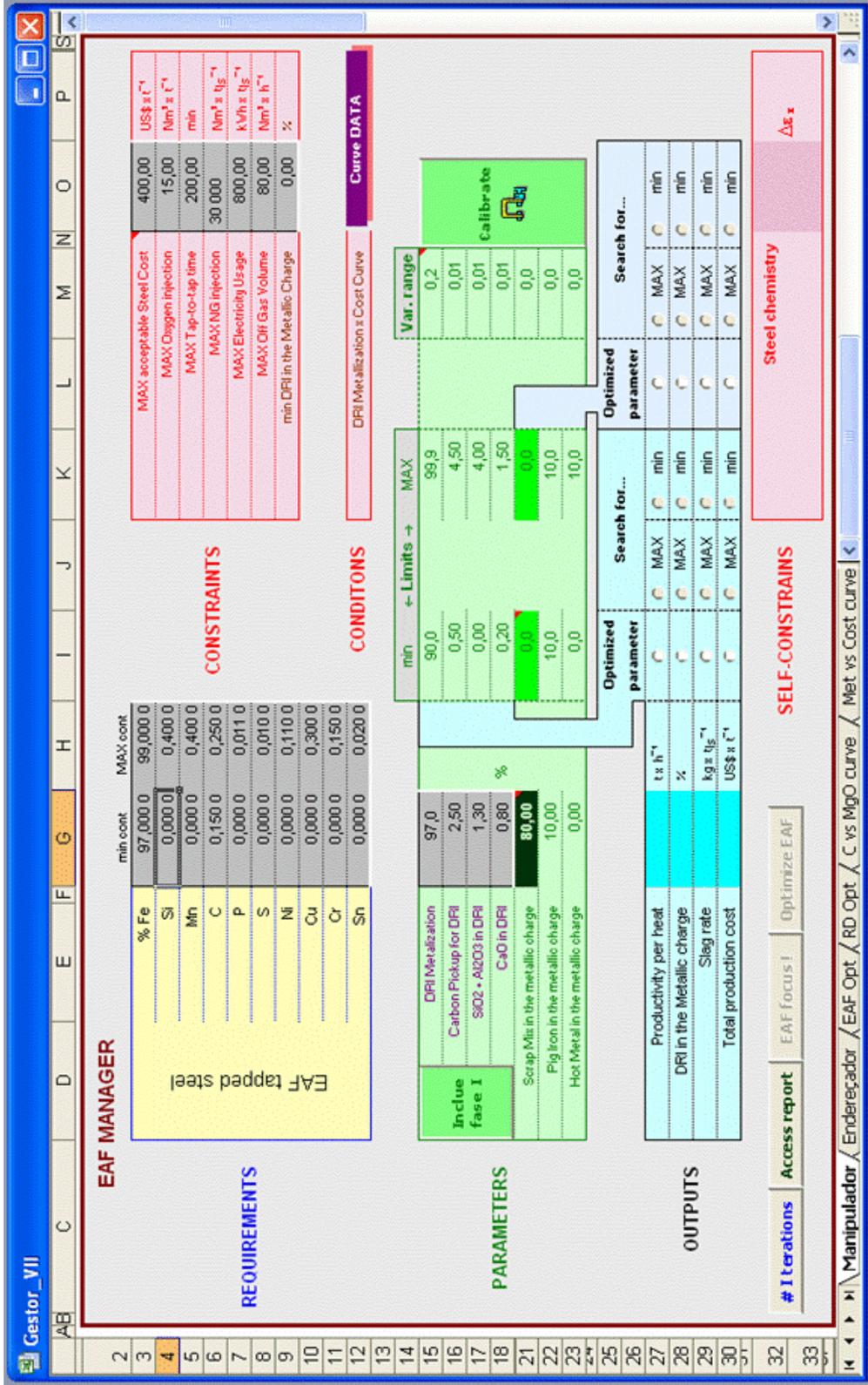


Figura 115 – Entidades do modelo GESTOR relacionadas ao gerenciamento do modelo EAF.

Já para o modelo RD (figura 116), tem-se:

- percentuais (em peso) dos minérios “A”, “B” e “C” da carga ferrífera, sendo que “A”, “B” e “C” podem receber quaisquer denominações;
- relação H_2/CO no gás “bustle” (% em volume/% em volume);
- temperatura do gás “bustle” (em °C);
- injeção de gás natural (em Nm^3/h) na zona de resfriamento (ZA).

Adicionalmente, enumera-se para o modelo FEA, como resultados — ou “outputs”, de acordo com o que está indicado na figura 117 — as seguintes variáveis:

- produtividade horária do FEA (em t de aço líquido/h);
- percentual (em peso) de DRI na carga metálica;
- “volume” de escória produzido na corrida (em kg/t de aço líquido);
- custo total de produção (em US\$/t de aço líquido).

Já no caso do modelo RD, tem-se como “outputs” (figura 116):

- produtividade horária do reator (em t_{DRI}/h);
- custo de produção da planta DR, por tonelada de DRI produzido ($US\$/t_{DRI}$);
- consumo específico de gás “bustle” (Nm^3/t_{DRI});
- percentual (em peso) de participação do minério “A”, assumido como referência.

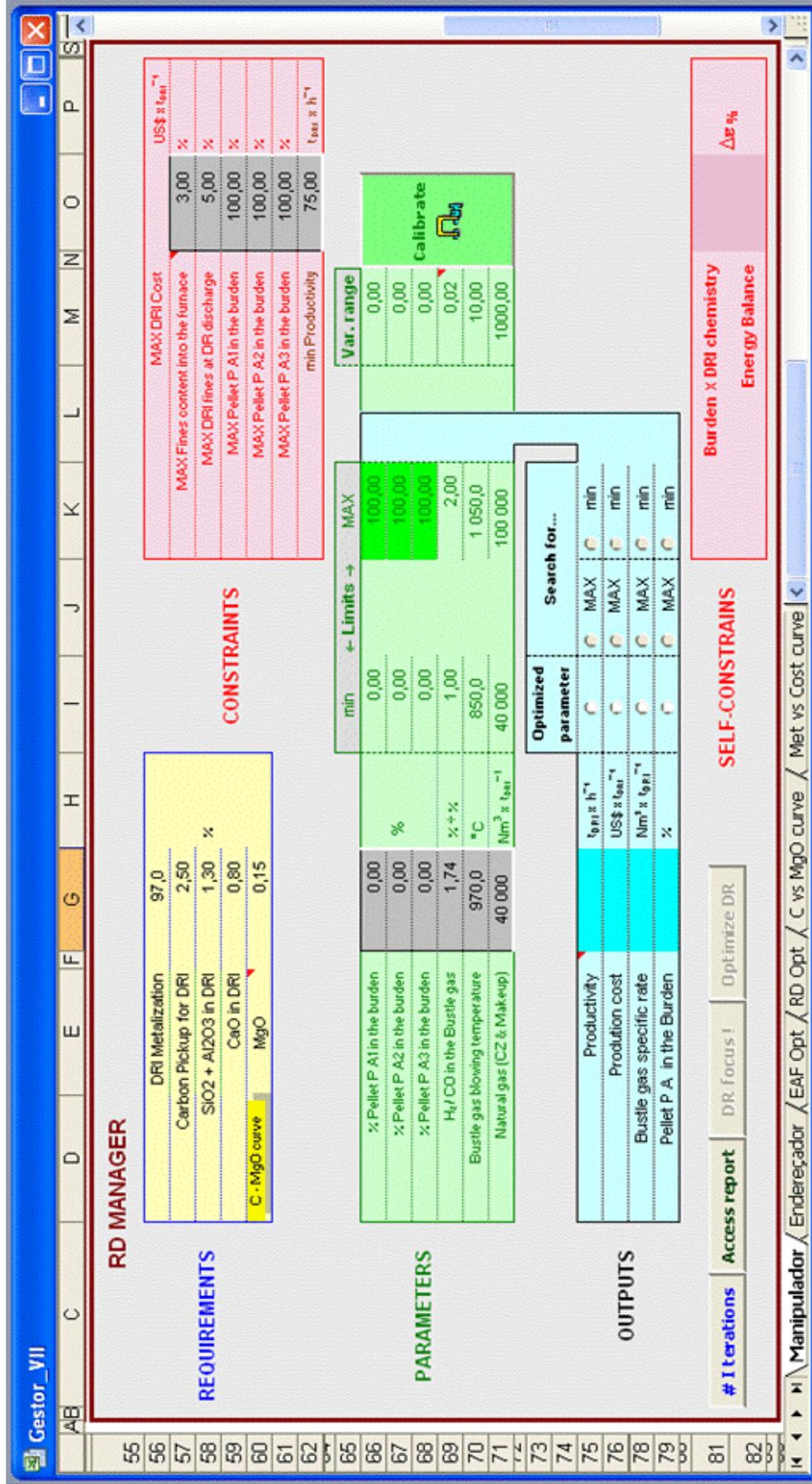


Figura 116 – Entidades do modelo GESTOR, relacionadas ao gerenciamento do modelo DR.

Adicione-se que, do conjunto de resultados e a cada processamento do gestor, somente um é o norte do processo, visto que a otimização conjunta de vários resultados será contemplada numa etapa subsequente do desenvolvimento de gestores de cadeias siderúrgicas.

Além dos grupos de parâmetros e resultados, o referido GESTOR inclui duas outras categorias de dados, chamados requisitos e restrições, ou, se preferir, “requirements” e “constraints”, respectivamente, como explicitado em ambas as figuras 115 e 116.

Os requisitos são valores constantes, os quais têm que ser exatamente alcançados nos cálculos dos modelos, e as restrições, limiares, que não podem ser violadas.

No modelo FEA, tem-se, como requisito apenas, a composição do aço vazado (percentuais de Fe, Si, Mn, C, P, S, Ni, Cu, Cr, Sn). Para o modelo DR, citam-se:

- grau de metalização do DRI (%);
- “carbon pickup” no DRI (% em peso);
- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ no DRI (% em peso);
- percentuais (% em peso) de CaO e MgO.

As restrições no modelo EAF são:

- custo máximo aceitável do aço (em US\$/t aço líquido);
- máxima injeção de O_2 (Nm^3 / t aço líquido);
- máximo tempo “tap-to-tap” (em minutos);
- máxima injeção de gás natural no FEA (em Nm^3 /t aço líquido);
- máximo consumo de energia elétrica no FEA (em kWh/t aço líquido);
- máximo volume de “offgas” a ser gerado pela FEA (Nm^3 /h);
- mínimo percentual de participação do DRI no carregamento do FEA (% em peso).

No caso do modelo RD, enumeram-se as seguintes restrições:

- máximo percentual (em peso) de “finos”, alimentado ao forno (após pe-
neiramento);
- máximo percentual (em peso) de “finos”, presentes no DRI descarrega-
do do forno;
- máximo percentual (em peso) dos minérios “B”, “C” e “D”, na carga ferrí-
fera;

- mínima produtividade horária aceitável para a planta de RD (em t de DRI/h);

De forma suplementar a estes conjuntos numéricos, existem ainda, no GESTOR, as chamadas auto-restrições, que são resultados calculados, internamente, pelos modelos, também invioláveis. Dentro desta categoria, tem-se para o modelo EAF, a própria composição do aço, e para o DR, o balanço energético e as composições em SiO_2 , Al_2O_3 , CaO e MgO do DRI.

A relação entre os grupos é expressa pela lógica, na cadeia siderúrgica, de certos resultados de operações unitárias constituírem-se em requisitos de outras. Esclarecendo este ponto, vale exemplificar que a metalização do DRI, é requisito do RD e parâmetro do FEA.

4.5.4.

Procedimento de otimização a partir da utilização do GESTOR

O fluxograma contido na figura 117 dá uma idéia geral da seqüência de operações ou passos necessários para o correto funcionamento do GESTOR, de forma integrada com os modelos DR e EAF. Alguns destes passos são efetuados ainda de forma manual, ou seja, ainda dependentes da intervenção e de algum nível de interpretação humana. Justifica-se esta atual característica do GESTOR, pelo fato deste ser considerado, apenas, como uma primeira versão de algo, recentemente, inventado e, portanto, inédito em sua concepção. Neste sentido, deve-se entender que um maior nível de automatização é uma evolução natural de qualquer desenvolvimento, a partir do seu marco zero. Uma das sugestões, apresentada para futuros trabalhos, será a automatização de um número maior de passos. Obviamente, deve-se perguntar o porquê de não assumir como desafio futuro a total automatização destas etapas.

O GESTOR opera a otimização da cadeia siderúrgica, tipicamente através de dois procedimentos distintos, chamados fases. A primeira fase é a chamada inicialização, quando os modelos calculam a satisfação dos requisitos, restrições e auto-restrições, utilizando os valores iniciais dos parâmetros sem alterá-los. Nesta fase não se produz nenhuma otimização dos resultados. O sentido desta etapa advém da necessidade dos modelos, anteriormente à fase de otimização, gozar de uma posição definida pelos parâmetros, que atendam a todos os requisitos, restrições e auto-restrições.

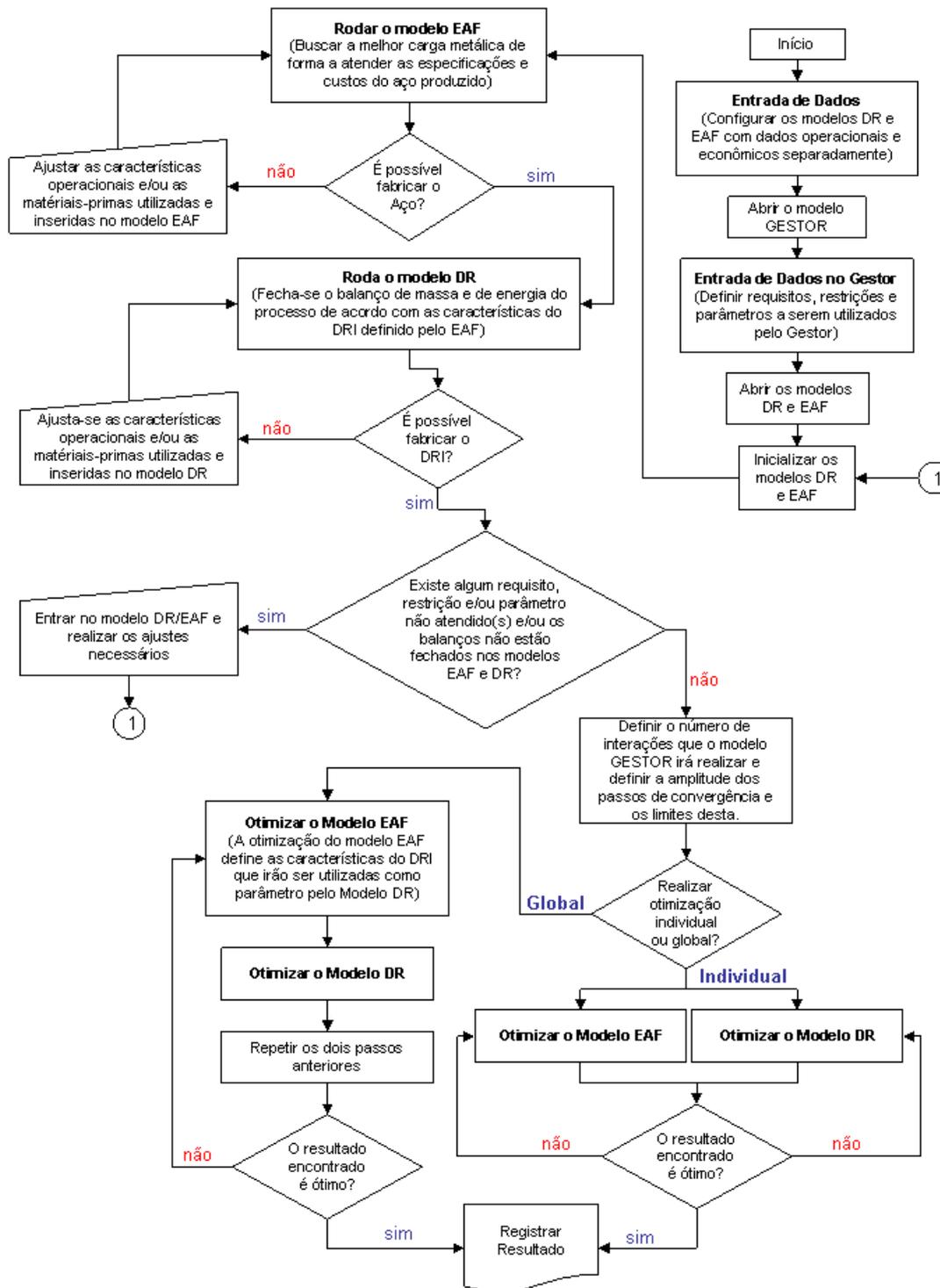


Figura 117 – Seqüência de operação do modelo GESTOR.

Caso a inicialização não esteja cumprida, o GESTOR inibe os comandos de otimização, no entanto disponibiliza o foco no modelo, ou modelos, que não tenha atingido o sucesso na fase. Este foco permite ao usuário a manipulação individual do modelo, com o objetivo de atendimento dos requisitos, restrições e auto-restrições. Não obstante, os modelos, invocados sob o controle do GESTOR, podem ter algumas de suas funções indisponíveis, por motivos de construção lógica. A disponibilização destas funções ocorre, quando o gestor estiver desligado/desassociado ao modelo termoquímico em questão.

A fase de otimização que se segue à inicialização pode ser desencadeada individualmente, para cada modelo ou, globalmente no sentido do aço até a matéria-prima. Quando individualizada — ou globalizada — a otimização, simplesmente procura atender à demanda “minimax” de algum dos resultados de todos e cada um dos modelos.

O número de interações que o algoritmo do GESTOR perfaz está a critério do usuário e é regulado sua expectativa de tempo de execução, pelo julgamento da distância entre a posição atual e ótimo em vista.

4.5.5. Metodologia de otimização

O método de minimização — ou maximização — por tentativas é o mais intuitivo dos processos de procura de ótimo. A sua práxis envolve a procura de um ponto melhor, isto é, dado o ponto atual, definido pelos parâmetros e o resultado atual, que alteração nos parâmetros produz uma melhora no resultado. Simbolicamente:

$$Y^a = F(\{x_i\}^a) \Rightarrow Y^f = F(\{x_i\}^f) \\ | (\exists i : x_i^f = x_i^a + \Delta x_i) \& [Y^f_{\text{ótimo}}(Y^a)] \quad \text{eq. (48)}$$

Isto significa que, dado um dos resultados no ponto atual de qualquer um dos modelos, Y^a , função do conjunto de parâmetros atual, $\{x_i\}^a$, procura-se uma direção i , ($\exists i : x_i^a \neq x_i$), na qual o valor Y^f é o ótimo local $[Y^f_{\text{ótimo}}(Y^a)]$, quando o parâmetro i satisfaz a $x_i^f = x_i^a + \Delta x_i$.

Para a determinação da direção i , o gestor faz todas as tentativas possíveis, determinando todos os valores do conjunto descrito a seguir:

$$\left\{ \begin{array}{l} Y^1 = F(\{x_i\}^1) \\ Y^2 = F(\{x_i\}^2) \\ \vdots \\ Y^n = F(\{x_i\}^n) \end{array} \right. \quad \text{eq. (49)}$$

O ótimo local é o melhor valor entre $Y^1 \dots Y^n$ e indicado por Y^f , melhor significando que Y^f atende a condição “minimax”, pedida pelo usuário. O valor “n” expressa a cardinalidade — número de direções de pesquisa do ótimo — do conjunto de parâmetros de algum dos modelos. Quanto maior for o número de parâmetros maior a cardinalidade e mais extenso será o procedimento de cálculo. Neste contexto, a existência de somente um parâmetro significa um procedimento de cálculo unidimensional. De dois, o

procedimento de cálculo será bidimensional e assim por diante, necessariamente.

4.5.6. Fechamento da otimização

O algoritmo implantado no GESTOR, ao contrário do que, usualmente encontra-se programado para sistemas do tipo, não possui controle de convergência. Entende-se, por controle de convergência, a variação do tamanho do passo Δx_i (na direção “i”, portanto) de maneira a garantir que em uma dada interação, o valor atual seja exatamente, o ótimo local dentro de uma tolerância estabelecida pelo usuário.

Isto se deve a dois importantes fatos:

- existe uma imprevisibilidade fundamentada na heterogeneidade dos modelos subjacentes ao gestor. Em outras palavras, para cada modelo em uso pelo GESTOR, o nível de tolerância de erro associado aos dados e cálculos, é, em geral, diferente, causando diferentes níveis de precisão nos resultados, bem como diferentes sensibilidades nos parâmetros;
- quer-se deixar a amplitude dos passos de convergência — Δx_i na equação (47) — diretamente à escolha do usuário que possui o bom julgamento de seus valores.

Uma vez descrito o que foi desenvolvido, computacionalmente, em termos de modelos, julgou-se importante complementar este capítulo conceituações adicionais, cuja aplicação será conduzida neste trabalho, juntamente com o uso dos modelos DR, EAF e GESTOR. Neste contexto, as seções de 4.6 a 4.9 estão focadas, essencialmente, em uma visão de desenvolvimento de produtos capaz de enxergar e entender melhor o que realmente necessita ser trabalhado no produto para torná-lo mais rentável, não somente para quem o utiliza, mas também para quem o produz.

4.6.

Impacto do atual modelo de definição de preços de pelotas de minério no desenvolvimento de novas especificações

Foi visto na seção 3.5.1, a existência de um mecanismo bem consolidado para definição do preço de minério de ferro e, nesta linha, especificamente para o mercado de redução direta, verifica-se que o atual modelo adotado tende a privilegiar a comercialização de minérios de ferro com os mais altos teores de ferro total possíveis, incentivando as mineradoras a conduzirem rígidos controles das especificações de sílica e de alumina. Além destas medidas, o mercado também exige o suprimento de minérios com baixos níveis de umidade, para que desta forma, não se tenha um incremento indesejável no custo de frete, em virtude do transporte de água, contida na carga nos porões. Este frete é, usualmente, contratado pelo cliente. Também é estabelecida, em bases comerciais, a contratação de limites bem mais rigorosos para os teores de fósforo (seção 3.5.3) e para a presença de finos, seja no material carregado ou no porto de descarga (seção 3.5.5).

Dentro do contexto acima, observa-se que, do ponto de vista comercial, valoriza-se fortemente o conteúdo de ferro, uma vez que se paga, mais ou menos por uma dada tonelagem métrica seca de minério, dependendo se esta contiver uma maior ou menor concentração em ferro, respectivamente. É também razoável assumir como, comercialmente vantajoso, que este maior teor em ferro, presente no carregamento, resultará em um menor volume transacionado de pelotas, ao longo de um dado período de tempo, uma determinada produção anual de ferro-esponja e um dado usuário, diluindo-se, assim, os custos com frete, por exemplo.

No caso específico de pelotas, é possível que este raciocínio de forte valorização comercial do teor de ferro possa inviabilizar e, de certa forma, torne menos flexível, os esforços voltados ao desenvolvimento e aplicação de determinadas especificações pouco comuns, em particular, daquelas que causem diminuição no teor de ferro e/ou que reduzam a margem específica de lucro, podendo também afetar a produtividade das plantas de pelotização. Notadamente, estas situações são desfavoráveis aos produtores no curto prazo, mas podem ser adotadas, a partir de uma visão mais estratégica e de uma política de relacionamento comercial de mais longo prazo, naturalmente, em condições especiais e particulares. No curto-prazo, novamente, e, a partir de um olhar para dentro da pelotização, devem os envolvidos na tomada de decisão estar cientes de que a perda de faturamento será crescente e inevitável, sempre que o teor de ferro no produto final for, gradativamente, diminuído.

4.7.

Aplicação do conceito de diferenciação para pelotas de minério de ferro

Diante do impasse citado na seção 4.6, seria também razoável e oportuno se pensar e se discutir algum tipo de reconhecimento, prêmio ou diferenciação de preço, durante a rodada de negociações (seção 3.5.1), para um maior estímulo ao fornecimento de determinadas especificações de pelotas, que, por ventura, possam resultar em um superior desempenho no cliente, com ganhos reais, em termos de produtividade e/ou de redução de custo. O que se observa em várias situações é que seria, justamente através desta diferenciação, que se viabilizaria

o desenvolvimento de novas especificações e, até mesmo, de novos produtos com importantes ganhos, tanto para os usuários quanto para os produtores.

Observa-se adicionalmente que a diferenciação de preço não é fortemente praticada na comercialização de minérios de ferro, em parte, pela existência de uma visão relativamente restrita de que o minério de ferro em geral, incluindo pelotas, deve ser considerado puramente como “commodity”. Naturalmente, uma mudança neste conceito exigiria um maior grau de amadurecimento das relações comerciais entre clientes e fornecedores e seria também recomendável que haja uma cooperação técnica ainda mais intensa entre usuários e provedores de minério de ferro, na busca de um maior entendimento dos processos existentes em cada um e das suas respectivas limitações. A partir deste posicionamento, tanto fornecedores quanto usuário poderiam estar mais atentos às oportunidades de integração mais eficaz da cadeia de valor.

Salienta-se ainda neste tópico que uma das forças motrizes deste trabalho é a crença de que é possível sim ampliar o atual conceito generalista de “commodity” associado ao minério de ferro. Dentro deste contexto, acredita-se, por exemplo, que as transações comerciais envolvendo distintas pelotas em um dado cliente possam levar em consideração uma maior ou menor valorização destas matérias-primas, pautadas principalmente na sua superior ou inferior performance em uma dada condição de aplicação. Neste sentido, defende-se que seria mais justa a adoção de alguma modalidade de diferenciação, inclusive em linha com o que é fortemente defendido na literatura ⁽¹¹⁹⁾ de que todo e qualquer produto ou mercadoria e até mesmo serviços são diferenciáveis, sempre. E tomando-se isto como verdade, não existiria esta tal coisa chamada “commodity”, pelo menos sob o ponto de vista de competitividade.

A diferenciação é algo extremamente importante no mundo dos negócios e ocorre inevitavelmente e intencionalmente a todo o instante, até mesmo para aqueles produtos e serviços com menor grau de diferenciação. A importância de diferenciá-los está ancorada na necessidade destes de terem que fazer a diferença em conseguir novos clientes ao serem ofertados e uma vez entregues terem a capacidade de mantê-los.

Por outro lado, se não é feita uma abordagem de marketing apropriada em termos de diferenciação de um dado produto ou serviço, é muito provável que a busca por novos clientes e até mesmo pela sua manutenção acabe refletindo numa disputa mais acirrada envolvendo fundamentalmente preços e descontos, dependendo do quão competitivo estiver o mercado em questão.

4.8.

Revisão do conceito de produto

Uma vez verificada a importância da diferenciação de produtos, deve-se examinar o que exatamente é produto e seus atributos, chegando ao entendimento de que produto seria o pacote de benefícios que o cliente recebe quando alguém o compra. São quase sempre combinações de tangíveis e intangíveis. Para melhor compreensão dos atributos aqui colocados, toma-se como exemplo um dado automóvel. Este produto não pode ser entendido simplesmente como uma máquina capaz de se movimentar, visivelmente e mensuravelmente diferenciada pelo “design”, tamanho, cor, potência, autonomia em quilômetros por litro e opcionais, dentre outros. É também um símbolo complexo que denota “status”, realização, aspiração e até mesmo esperteza. Adicionalmente, a indústria automobilística vem constantemente investindo esforços na redução dos prazos

para entrega de pedidos, bem como na seleção, treinamento, supervisão e motivação de suas revendedoras/concessionárias. Estes esforços devem ser entendidos como partes integrantes do produto.

Ainda sob a ótica da diferenciação, um produto pode ainda receber as seguintes designações ⁽¹¹⁹⁾:

- i. produto genérico: abrange o conceito de produto no seu sentido mais fundamental e verdadeiro, mesmo que rudimentar, sendo possuidor de características capazes de serem definidas tecnicamente e medidas com relativa facilidade. Produtos genéricos podem diferir ligeiramente uns dos outros em função de pequenas variações advindas do seu processo de fabricação;
- ii. produto esperado: vai mais além da conceituação de produto genérico, abrangendo também as condições mínimas e absolutamente essenciais para sua aquisição pelo cliente, tais condições de entrega e demais condições comerciais (preços, quantidades e prazos de pagamento, etc.). Dependendo do caso, um cliente pode também esperar do seu fornecedor algum tipo de suporte ou aconselhamento para a correta utilização do produto. Pode ser uma expectativa normal por parte de um dado cliente receber de seus fornecedores novas idéias e sugestões para a adoção de alternativas de aplicação dos respectivos produtos de modo mais efetivo e de menor custo. Uma falha em satisfazer certas expectativas por mais sutis que sejam pode refletir desfavoravelmente em um produto genérico. Em alguns casos o cliente pode desejar menos do que o produto possui.
- iii. produto ampliado: baseia-se no princípio de que a diferenciação não está limitada no que os clientes esperam e desta forma um produto vai além do que foi requerido pelo comprador e do que é esperado pelo cliente. Assim sendo, aquilo que eles esperam pode ser ampliado por coisas que eles nunca pensaram a respeito. Nestes casos, diz-se que o fornecedor excedeu as expectativas normais do cliente, que, via de regra, tende a minimizar a guerra de preços. Entretanto, nem todos os clientes podem se sentir atraídos por atributos que vão além da suas expectativas e alguns não tem interesse ou até mesmo condições de utilizar os serviços extras oferecidos. Estes clientes costumam normalmente optar por preços mais baixos. Adicionalmente é interessante colocar como regra, que quanto mais um fornecedor expande o mercado ensinando e ajudando seus clientes a utilizar os seus produtos, mais vulnerável este fornecedor se tornará em perder tais clientes, pois um cliente que não mais necessita deste tipo de ajuda normalmente ganha flexibilidade em comprar coisas que eventualmente possa valoriza mais, tais como produtos de preço mais baixo.
- iv. produto potencial: tudo que puder ser feito para atrair e reter clientes é o que pode ser chamado de produto potencial. A prospecção das oportunidades em questão deve considerar não somente os limites da imaginação, mas também os limites orçamentários, abrangendo e enfocando o que é preciso ser feito para se tornar competitivo em todas as dimensões de um produto potencial.

Desta forma, uma boa gestão de produtos passa pelo desafio de enxergar as oportunidades de como ganhar clientes da concorrência e de como mantê-los

a partir de determinados atributos dos produtos e entender que os clientes compram bem mais que estes atributos.

4.9.

Conceito de valor de uso aplicado ao desenvolvimento de pelotas de minérios de ferro, adotadas na rota de fabricação de aço líquido, via redução direta e forno elétrico a arco

4.9.1.

Introdução

Em conformidade com as discussões das seções 4.7, 4.8 e 4.9, seria muito útil o desenvolvimento, a validação e a utilização mútuas entre cliente e fornecedor de ferramentas, que suportem a inovação e o desenvolvimento de pelotas, para o mercado de redução direta. Neste caso, é comum a adoção de algumas metodologias, com destaque para o QFD (“Quality Function Deployment”), oriunda da filosofia de gestão da qualidade total⁽¹²⁰⁻¹²³⁾. Em linhas gerais, espera-se que a boa aplicação na pelotização destas metodologias seja capaz de:

- interpretar com eficácia a percepção de um dado cliente ou de um conjunto de clientes para uma determinada matéria-prima fornecida, em relação à concorrência;
- consolidar, com o maior grau de precisão possível, a visão sobre as tendências de mercado e tecnológicas, particularmente, do segmento de produção de aço, via redução direta e aciaria elétrica;
- direcionar esforços e priorizar ações voltadas para a reformulação dos produtos existentes e, até mesmo, para a criação e implementação de novos produtos para o mercado.

Alternativamente, ou até mesmo, de forma complementar, uma empresa pode fazer uso da metodologia de pensamento sistêmico^(124, 125), o qual se baseie em uma nova concepção de liderança e de gerenciamento empresarial, apoiados em técnicas de aprendizagem organizacional, na análise dos padrões de comportamento das variáveis-chave e do entendimento dos modelos mentais de participante, não só para uma melhor compreensão das tendências mercadológicas e definição de seus planos de expansão da capacidade, mas para traçar suas diretrizes de inovação e de desenvolvimento de produtos.

Não se pretende com este trabalho, detalhar e fazer uma comparação entre as metodologias citadas, mas assumir a complementação delas com ferramentas de maior capacidade de quantificação e diferenciação de produtos. A partir deste raciocínio, valeria a pena considerar, por exemplo, a utilização de ferramentas computacionais capazes de avaliar como distintas pelotas poderiam impactar, positiva ou desfavoravelmente, uma dada seqüência de processos de um cliente específico. Acredita-se, com este trabalho, que seria muito valiosa a adoção de ferramentas, ancoradas no conceito de valor de uso ou valor em uso (VEU).

4.9.2. Conceitos importantes

Para ganhar competitividade frente ao mercado, os produtores de aço necessitam focar-se em seu “core business”, e neste sentido, desenvolver vários esforços e iniciativas, relacionadas aos produtos finais e suas aplicações. Para tanto, necessitam estabelecer um relacionamento próximo com seus clientes, contribuindo com a cadeia de valor deles e para melhor entendimento sobre como desenvolver os produtos, soluções tecnológicas e serviços.

Este mesmo raciocínio deve ser perseguido pelos produtores de minério de ferro, afim de que sejam capazes de oferecer soluções em termos de cargas ferríferas mais atraentes para a fabricação do ferro primário. Dentro deste contexto, especificamente para o caso da pelletização, busca-se, a todo o momento, entender de forma clara, confiável, coerente e justa, como uma determinada qualidade de pelotas pode performar um dado cliente, trazendo, preferencialmente, benefícios para ambas as partes, mediante sua aplicação nas etapas de obtenção de ferro-esponja e de fabricação do aço, via forno elétrico, sob específicas condições operacionais.

A partir deste ponto e dentro do contexto de diferenciação de produtos, surge então a necessidade de um maior entendimento sobre o conceito de valor de uso, tradicionalmente associado ⁽¹²⁶⁾ a rendimento, produtividade, consumo, dentre outros. Deve-se, no entanto, ter em primeiro lugar uma compreensão do significado mais exato possível do que seria o valor de um produto, verificando como o cliente percebe-o.

Do ponto de vista de marketing, o valor de um produto é a expectativa do consumidor quanto aos seus benefícios, em relação à quantia real paga pelo produto ⁽¹²⁷⁾. Matematicamente, pode ser expressa por uma das seguintes equações:

$$\text{Valor} = \text{Benefícios} / \text{Preço} \quad \text{eq. (50)}$$

$$\text{Valor} = \text{Benefícios Recebidos} / \text{Expectativas} \quad \text{eq. (51)}$$

Adicionalmente, costuma-se dizer que os clientes atribuem valor a um dado produto, à medida que este ajude na resolução de seus problemas ou atenda as suas necessidades ⁽¹¹⁹⁾.

Durante um processo de compra, subentende-se que o consumidor percebe o valor do produto, fundamentalmente, avaliando as seguintes dimensões:

- os benefícios oferecidos pelo fornecedor na forma de produtos (sejam bens e serviços);
- o custo da transação, abrangendo não só o montante de dinheiro envolvido, mas os esforços e tempo necessários para a concretização do negócio, tanto para prazo de pagamento quanto para a entrega do produto.

Considerar que os clientes entendam, de fato, os reais problemas, não obstante, é defendido na literatura ⁽¹¹²⁸⁾ como errôneo. Em outras palavras, deve-se trabalhar com a percepção de que não basta, apenas, pe-dir-lhes uma expli-

cação, mas, a partir do que foi ouvido, apresentar-lhes uma solução. Neste contexto, é uma importante missão da área de marketing e de vendas, detectar o quão capaz cada cliente é de autodiagnosticar-se. Cria-se, desta forma, a chamada “lacuna de valor”, a qual pode ocorrer tanto antes como depois de uma venda, definida como a dissonância de alto custo entre o valor prometido aos clientes e o valor, efetivamente, entregue:

- i. antes da venda, nota-se que os vendedores pensam estar oferecendo valor aos clientes, mas não reconhecem a falta de entendimento deles. Nesta fase, os vendedores, freqüentemente, comunicam o valor de suas soluções em termos do que estas são capazes de fazer, ao invés de se concentrarem no que, efetivamente, está faltando para o cliente;
- ii. na entrega, observa-se que os clientes esperam receber o valor, conforme prometido, embora não pensem que receberam o equivalente pelo que pagaram.

Nas sutilezas do conceito anterior, pode-se introduzir o conceito de valor de uso de um produto, como se segue. Dentre outras definições encontradas na literatura ⁽¹²⁹⁻¹³⁴⁾, será objetivamente assumido, neste trabalho, um conceito que deriva do ponto de vista econômico, cujo valor de uso de um material é o máximo que se pode pagar por um substituto, sem que isto piore o resultado econômico ^(85,1135). Adicionalmente, pode-se ainda definir o valor de uso de um produto, como sendo o prêmio ou desconto, que o mesmo poderia merecer, comparativamente ao preço de um material, predominantemente assumido como referência ⁽¹⁹⁾.

Especificamente para minérios de ferro empregados em redução direta, cabe, aqui, comentar sobre um aspecto muito interessante e que está associado ao seu valor de uso, com base nas discussões da seção 3.6, em particular, acerca da figura 51. Foi visto, naquele momento, que o mercado de minério de ferro pode estar em alta ou em baixa e que isto, obviamente, afetaria a abordagem do cliente, no que diz respeito a sua preferência por matérias-primas mais nobres ou mais baratas, relacionando o valor de uso à situação mercadológica considerada.

Para abordar esta questão com maior profundidade, deve-se conduzir a análise das expressões que vêm logo a seguir, envolvendo o cálculo da lucratividade na unidade de tempo de uma dada operação industrial. Assim sendo, tem-se:

$$LU \text{ (US\$/}\theta\text{)} = \text{REC (US\$/}\theta\text{)} - \text{CTS (US\$/}\theta\text{)} \quad \text{eq. (52)}$$

com:

$$\text{REC (US\$/}\theta\text{)} = \text{VDS (t/}\theta\text{)} \times P_{\text{VENDA}} \text{ (US\$/t)} \quad \text{eq. (53)}$$

$$\text{CTS (US\$/}\theta\text{)} = C_{\text{VAR}} \text{ (US\$/}\theta\text{)} + C_{\text{FIX}} \text{ (US\$/}\theta\text{)} \quad \text{eq. (54)}$$

$$C_{\text{VAR}} \text{ (US\$/}\theta\text{)} = \text{PRD (t/}\theta\text{)} \times \text{CVU (US\$/t)} \quad \text{eq. (55)}$$

onde:

- LU - lucro obtido de uma determinada unidade de processamento industrial na unidade de tempo (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- REC - receita gerada a partir das vendas na unidade de tempo (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- CTS - custos praticados por uma determinada unidade de processamento industrial na unidade de tempo (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- VDS - volume de vendas na unidade de tempo (em t/ θ , com t = toneladas vendidas e $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- P_{VENDA} - preço de venda de um produto gerado por uma dada unidade de processamento industrial (em US\$/t, onde t é tonelada).
- C_{VAR} - custo de produção variável de uma dada unidade de processamento industrial (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- C_{FIX} - custo fixo uma dada unidade de processamento industrial na unidade de tempo (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- PRD - produtividade de uma dada unidade de processamento industrial na unidade de tempo (em t/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- CVU - custo variável unitário de uma dada operação industrial (em US\$/t, onde t é tonelada).

Adicionalmente, tem-se que:

$$\text{CTU (US\$/t)} = \text{CTS (US\$/\theta)} / \text{PRD (t/\theta)} \quad \text{eq. (56)}$$

onde:

- CTU - custo total unitário de uma dada operação industrial (em US\$/t, onde t é tonelada).

Pode-se reescrever a equação (52), combinando-a com as equações (53), (54) e (55) e se chegar à equação (57). Para tanto, deve-se considerar que não há acúmulo de estoque, ou seja, que, no mesmo intervalo de tempo θ , o volume de produção é numericamente igual ao volume de vendas ($\text{VDS} = \text{PRD}$).

$$\text{LU (US\$/\theta)} = \text{CTR (US\$/\theta)} - C_{\text{FIX}} \text{ (US\$/\theta)} \quad \text{eq. (57)}$$

com:

$$\text{CTR (US\$/\theta)} = \text{PRD (t/\theta)} \times \text{MCU (US\$/t)} \quad \text{eq. (58)}$$

e

$$\text{MCU (US\$/t)} = P_{\text{VENDA}} \text{ (US\$/t)} - \text{CVU (US\$/t)} \quad \text{eq. (59)}$$

onde:

- CTR - contribuição de uma dada unidade de processamento industrial na unidade de tempo (em US\$/ θ , com $\theta = h$, dia, mês, ano, etc.);
- MCU - margem de contribuição unitária de uma dada unidade de processamento industrial por quantidade de material produzido (em US\$/t, onde t é tonelada);

Cabe ainda comentar que aparece, nas equações (57) e (58) uma importante grandeza: a contribuição, e será identificada por CTR, cuja definição é a diferença entre a receita com vendas (REC) e o custo de produção variável (C_{VAR}). Desta forma, a equação (58) pode ser reescrita como abaixo.

$$CTR (US\$/\theta) = REC (US\$/\theta) - C_{VAR} (US\$/\theta) \quad \text{eq. (60)}$$

Refletindo-se sobre todas estas equações, nota-se que existem dependendo da situação mercadológica algumas formas para maximização do lucro em uma dada operação no cliente, com destaque para:

- aumento da produtividade de suas operações (aumento da variável PRD), normalmente possível em mercados aquecidos;
- redução dos custos variáveis unitários (diminuição do CVU) que reflitam para ampliação da margem de contribuição unitária (aumento da variável MCU), principalmente em períodos de mercado recessivo.

Quando a palavra de ordem é aumentar da produtividade, a melhoria da eficiência operacional se dá, por exemplo, através de investimentos, da adoção de melhores práticas operacionais e de manutenção, ou a partir da utilização de matérias-primas de qualidade superior.

A estratégia de redução de custos é sempre encarada como mandatária. Entretanto, quando for uma questão de sobrevivência, normalmente intensificam-se os esforços dos clientes para aquisição e uso de matérias-primas mais baratas. Via de regra, sempre que a produtividade não precisar ser maximizada — por restrições mercadológicas, por exemplo, é comumente viável o emprego de matérias-primas menos nobres. Medidas mais agressivas para redução do custo fixo também podem ser adotadas, quando for conveniente.

A seção a seguir é um estudo de caso encontrado na literatura envolvendo as equações introduzidas até então.

4.9.3.

Estudo de caso 1: valor de uso de um determinado granulado em uma planta de redução direta

Em termos práticos, a relativa dependência do valor de uso de um material, em função do cenário mercadológico, pode ser confirmada pela análise da figura 118. Este gráfico é resultado de um estudo de valor de uso, bastante interessante, encontrado na literatura ^(85,135), no qual se explora a utilização de um dado minério granulado, quando carregado em um módulo de redução direta conjuntamente com pelotas. O percentual de granulado, presente na carga, é investigado em termos de impacto sobre a variável contribuição de uma determinada operação de redução direta.

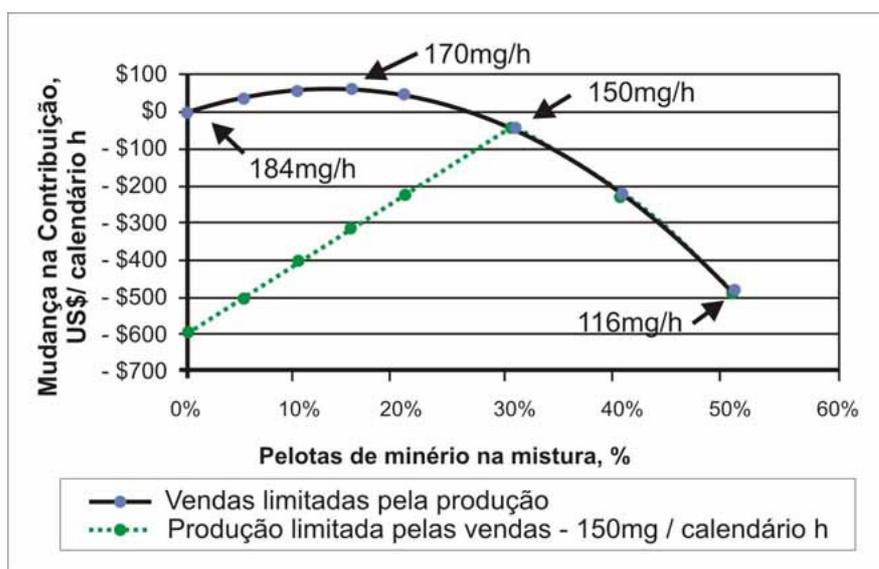


Figura 118 – Efeito da utilização de um minério granulado na contribuição e na taxa de produção de uma planta de redução direta ^(85,135).

Nota-se que, para a referida operação, e para uma situação de mercado demandado (vendas limitadas pela produção), consegue-se a máxima contribuição e, conseqüentemente, a máxima lucratividade, a partir de um percentual de granulado entre 10 e 15%. No caso de se considerar um cenário mercadológico em baixa (produção limitada pelas vendas), este ponto de máximo lucro se desloca para 30%. Adotou-se, como referência neste estudo, a condição de 100% de pelotas (0% de granulado) e de vendas limitadas pela produção, conforme o gráfico da figura 118.

4.9.4.

Estudo de caso 2: valor de uso de pelotas de alta sílica na redução direta e seu impacto na aciaria elétrica

Em um outro estudo envolvendo a mesma operação ⁽¹³⁵⁾, utilizou-se um modelo de valor em uso, combinando as etapas de produção de DRI e de fabricação de aço em FEA. Nesta avaliação, 20% das pelotas carregadas, no reator de redução direta, foram substituídas por mais baratas em US\$15 / t, mas contendo 2% a mais de sílica. Neste cenário, a aciaria elétrica fica obrigada a consumir mais cal e energia elétrica, assunto já discutido anteriormente. A contribuição e o valor em uso destas pelotas foram avaliados, conforme a tabela 17.

Tabela 17 – Mudança na contribuição e no valor de uso de pelotas contendo alta sílica ⁽¹³⁵⁾.

Δ Contribuição (Δ CTR)		PLV (FEA)	VLP (FEA)	Δ VEU do DRI para o FEA		PLV (FEA)	VLP (FEA)
US\$/ano	x 1000	(\$339)	(\$369)	US\$/t		-\$3,77	-\$4,10
PLV (DR)	\$404	= \$65	= \$35	Δ VEU das pelotas de alta SiO ₂	PLV (DR)	\$2,28	\$1,18
VLP (DR)	\$391	= \$52	= \$22		VLP (DR)	\$1,80	\$0,70

Legenda:

- ① PLV (DR) = Cenário de Produção Limitada pelas Vendas na planta DR
- ② VLP (DR) = Cenário de Vendas Limitadas pela Produção na planta DR
- ③ PLV (FEA) = Cenário de Produção Limitada pelas Vendas na aciaria elétrica
- ④ VLP (FEA) = Cenário de Vendas Limitadas pela Produção na aciaria elétrica

Analisando a metade mais à esquerda da tabela 17, observa-se que a substituição das pelotas em 20% por pelotas mais baratas e de alta sílica, gerou:

- um aumento significativo da contribuição relativa à planta de redução direta e uma diminuição substancial da contribuição associada à aciaria elétrica, para ambos os cenários de PLV ou VLP;
- o aumento da contribuição na planta RD está fundamentalmente associado ao menor custo com matérias-primas;
- a diminuição da contribuição na aciaria elétrica está associada aos maiores consumos de cal e de energia elétrica demandados pelo processamento de um DRI de maior sílica;
- o melhor resultado econômico para a empresa (maior ganho de contribuição na planta DR e menor queda na contribuição no FEA) foi conseguido para o cenário onde o fator limitante é o mercado em baixa (PLV);
- o pior resultado econômico para a empresa (menor ganho de contribuição na planta DR e maior queda na contribuição no FEA) foi conseguido para o cenário onde o fator limitante é o mercado em alta (VLP);
- no geral, a contribuição combinada desta operação aumenta de US\$22000 a US\$65000 por ano.

A metade mais à direita da tabela 17 refere-se aos resultados calculados para valor de uso da pelota substituta (contendo alta sílica). Adicionalmente, e de

forma análoga, calculou-se o VEU do DRI, subseqüentemente, empregado no FEA.

Para a determinação do VEU das pelotas de alta sílica — cuja produção está limitada pelas vendas (PLV), ou seja, para o caso da operação experimentar um mercado recessivo — partiu-se da seguinte expressão, adaptada da literatura ^(85, 135):

$$VEU_{(PLV)} \text{ (US\$/t}_{DRI}) = CMR \text{ (US\$/t}_{DRI}) - \Delta OCV \text{ (US\$/t}_{DRI}) \quad \text{eq. (61)}$$

onde:

- $VEU_{(PLV)}$ - valor em uso das pelotas de alta sílica (matéria-prima substituta), para a condição de operação da planta de RD, cuja produção está limitada pelas vendas. Pode ser calculada em US\$/t_{DRI} ou US\$/t_{PELOTAS};
- CMR - custo com as pelotas que estão sendo substituídas (pelotas assumidas como situação de referência). É calculado em US\$/t_{DRI};
- ΔOCV - mudança nos outros custos variáveis unitários da planta de RD, quando se faz a substituição das pelotas, normalmente utilizadas (situação referência) com pelotas de alta sílica (em US\$/t, com t = tonelada).

O prêmio ou desconto merecido para o material substituto, nesta condição de produção limitada pelas vendas, poderá ser calculado, a partir da seguinte expressão:

$$\Delta VEU_{(PLV)} = VEU_{(PLV)} - CMS \quad \text{eq. (62)}$$

onde:

- $\Delta VEU_{(PLV)}$ - prêmio ou desconto merecido pela pelota de alta sílica (matéria-prima substituta) para uma condição de produção da planta de RD, limitada pelas vendas. Pode ser determinado em US\$/t_{DRI} ou US\$/t_{PELOTAS}. As pelotas de alta sílica serão merecedoras de um prêmio adicional se $\Delta VEU > 0$. Um desconto será justo, no caso de $\Delta VEU < 0$);
- CMS - parcela de custo da planta de RD com a pelota de alta sílica (matéria-prima substituta), calculado em US\$/t_{DRI};

Para um cenário de mercado aquecido, ou seja, de volume de vendas limitado pela capacidade de produção (VLP), a equação (61) sofre uma alteração e passa a ser válida a seguinte expressão:

$$VEU_{(VLP)} = CMR - \Delta OCV + \Delta PRD \times P_{VENDA} \quad \text{eq. (63)}$$

onde:

- $VEU_{(VLP)}$ - valor em uso das pelotas de alta sílica (matéria-prima substituta), para a condição de operação da planta de RD, limitada pela produção. Pode ser calculada em US\$/t_{DRI} ou US\$/t_{PELOTAS};

- ΔPRD - impacto da matéria-prima substituta na produtividade (em %);
- P_{VENDA} - preço de venda do produto gerado (em US\$/t_{DRI}, onde t é tonelada). No caso do DRI ser diretamente aplicado na aciaria da mesma empresa, substitui-se o termo P_{VENDA} por CTU da equação (56).

Por analogia à equação (62), tem-se que:

$$\Delta VEU_{(VLP)} = VEU_{(VLP)} - CMS \quad \text{eq. (64)}$$

onde:

- $\Delta VEU_{(VLP)}$ - prêmio ou desconto merecido pela pelota de alta sílica (matéria-prima substituta), para uma condição de operação da planta de RD, limitada pela sua capacidade produtiva. Pode ser determinado em US\$/t_{DRI} ou US\$/t_{PELOTAS}. Novamente, as pelotas de alta sílica serão merecedoras de um prêmio adicional se $\Delta VEU > 0$. Um desconto será justo, no caso de $\Delta VEU < 0$;

Na expressão (61), observa-se que, pelo fato das vendas serem o fator limitante, não faz sentido ter o valor em uso do material substituto impactado, por um aumento ou por uma diminuição da produção, mesmo porque, como já dito, a estratégia é atuar na redução dos custos variáveis. Já na expressão (63), nota-se que o aumento ou diminuição da produção, afetará, diretamente, as vendas, e com isto, o VEU do material substituto irá também depender da produção e do preço de vendas.

Retornando à análise da tabela 17 (porção mais à direita), após a conceituação dada, observa-se que:

- o valor de uso do pré-reduzido de maior sílica, fornecido pela planta DR à aciaria elétrica, foi reduzido de US\$3,77/t a US\$4,10/t, respectivamente, para os cenários de PLV e VLP;
- a queda do valor de uso do pré-reduzido é mais pronunciada para o cenário, cujo fator limitante está na capacidade produtiva da operação (VLP);
- o desconto de US\$15/t para as pelotas de alta sílica poderia ser um pouco menor, tanto na condição de PLV e de VLP, visto que na tabela 17 os valores encontrados de ΔVEU foram todos positivos. Em outras palavras, este desconto poderia ser negociado e seria justo pagar-se um pouco mais pelas pelotas de alta sílica, sem que o resultado financeiro daquela operação fosse afetado, em relação à situação referência;
- na condição de VLP é, economicamente viável, pagar-se até US\$0,70/t a mais, pelas pelotas de alta sílica;
- já na condição de PLV é, economicamente viável, pagar-se até US\$2,28/t a mais, pelas pelotas de alta sílica.

4.9.5.

Estudo de caso 3: valor de uso de pelotas de mais baixo teor em ferro na redução direta e seu impacto na aciaria elétrica

Neste estudo de caso, os resultados econômicos da operação RD/FEA, estão sumarizados na tabela 18, e derivam da substituição de pelotas de redução direta, com 68% Fe total, 1% CaO+MgO, 4% de finos, e custando US\$40/t por uma outra pelota de especificação contendo um nível 1% mais baixo de ferro total. Supostamente, esta redução foi conseguida, por exemplo, pelo aumento do percentual %SiO₂ e/ou Al₂O₃.

Analogamente ao estudo de caso 2, conclui-se que, em termos de contribuição, esta substituição é bastante desvantajosa para a operação conjunta RD/FEA, pois impacta, negativa e substancialmente, a aciaria elétrica, com um benefício para a redução direta, insustentável, nos quatro cenários. Conclui-se, adicionalmente, que o uso destas pelotas, contendo menos %Fe total, exigiria um desconto entre US\$5,61/t e US\$6,22/t, para que fosse, economicamente, viável.

Tabela 18 – Mudança na contribuição e no valor de uso de pelotas contendo menor teor em ferro total⁽⁸⁵⁾.

Δ Contribuição (Δ CTR)		PLV (FEA)	VLP (FEA)	Δ VEU das pelotas contendo -1% Fé total		
US\$/ano	x 1000	(\$645)	(\$708)	US\$/t	PLV (FEA)	VLP (FEA)
PLV (DR)	\$19	= (\$626)	= (\$689)	PLV (DR)	-\$5,65	-\$6,22
VLP (DR)	\$24	= (\$621)	= (\$684)	VLP (DR)	-\$5,61	-\$6,18

4.9.6.

Estudo de caso 4: valor de uso de pelotas de mais baixo percentuais de CaO + MgO na redução direta e seu impacto na aciaria elétrica

Neste quarto estudo de caso, os resultados econômicos da operação RD/FEA estão sumarizados na tabela 19, e resultam da substituição das mesmas pelotas de redução direta com 68% Fe total, 1% CaO+MgO, 4% de finos e custando US\$40/t por uma outra pelota de especificação contendo um nível 0,5% mais baixo de CaO+MgO.

Analogamente ao estudo de caso 3, pode-se, analisando a tabela 19, concluir que, em termos de contribuição, esta substituição traz alguma vantagem para a operação conjunta RD/FEA, pois impacta tímida, mas positivamente, a aciaria elétrica, justificando a perda de contribuição na redução direta. Esta substituição só não valeria a pena para o cenário PVL, na redução direta, e VLP, no FEA, como mostrado na tabela 18. Para este cenário, recomenda-se um pequeno desconto de US\$0,01/t, sobre o valor da nova especificação, para torná-la, economicamente, viável.

Tabela 19 – Mudança na contribuição e no valor de uso de pelotas de minério de ferro contendo menores percentuais de CaO+MgO⁽⁸⁵⁾.

Δ Contribuição (Δ CTR)		PLV (FEA)	VLP (FEA)	Δ VEU das pelotas contendo -0,5% CaO + MgO		
US\$/ano	x 1000	\$16	\$11	US\$/t	PLV (FEA)	VLP (FEA)
PLV (DR)	\$12	= \$4	= (\$1)	PLV (DR)	\$0,03	-\$0,01
VLP (DR)	\$8	= \$8	= \$3	VLP (DR)	\$0,07	\$0,03

4.9.7.

Estudo de caso 5: valor de uso de pelotas com um teor mais alto de finos para a operação combinada RD/FEA

Similarmente aos estudos dos casos 3 e 4, os resultados econômicos da operação RD/FEA, estão sumarizados na tabela 19, e resultam da substituição de pelotas de redução direta, com 68% Fe total, 1% CaO+MgO, 4% de finos e custando US\$40/t, por uma outra de especificação contendo um 1% a mais de finos.

Analogamente aos estudos dos casos 3 e 4, pode-se concluir pela análise da tabela 20, que, em termos de contribuição, esta substituição é desvantajosa para a operação conjunta RD/FEA, apesar de não impactar a aciaria elétrica, mas prejudica o resultado econômico da redução direta nos quatro cenários. Adicionalmente, pela análise dos valores de uso destas pelotas, contendo maior teor de finos, exigiria um desconto entre US\$0,34/t e US\$0,53/t, para que seu emprego, pela referida empresa, tornasse-se, economicamente, viável.

Tabela 20 – Mudança na contribuição e no valor de uso de pelotas de minério de ferro contendo maior teor de finos ⁽⁸⁵⁾.

Δ Contribuição (Δ CTR)		PLV (FEA)	VLP (FEA)	Δ VEU das pelotas contendo +1% de finos		
US\$/ano	x 1000	\$0,00	\$0,00	US\$/t	PLV (FEA)	VLP (FEA)
PLV (DR)	(\$38)	= (\$38)	= (\$38)	PLV (DR)	-\$0,34	-\$0,34
VLP (DR)	(\$59)	= (\$59)	= (\$59)	VLP (DR)	-\$0,53	-\$0,53