



MODELO TERMOQUÍMICO E ECONÔMICO DO PROCESSO LD COMO FERRAMENTA DE DECISÕES PARA O VALOR-EM-USO, APRENDIZADO E AUDITORIA DO PROCESSO¹

Ana Cristina Linhares das Dores²
Ronaldo Santos Sampaio³

Resumo

Este trabalho apresenta um modelo, termodinâmico e econômico, off-line para um conversor LD, desenvolvido para analisar e otimizar o processo, visando baixo custo e alta produtividade, respeitando as restrições metalúrgicas. Através dele é possível identificar as potencialidades do conversor LD, analisando os efeitos de diferentes parâmetros operacionais, e criando cenários de melhor desempenho. O modelo funciona como auditor do processo, já que identifica falhas metrológicas, além de considerar a qualidade e custos das matérias-primas. O critério de Valor-em-Uso torna-se o procedimento de tomada de decisões para uso de determinados insumos e tecnologias. É um modelo aberto e de fácil compreensão, construído no Microsoft Excel 2007 e Visual Basic. A sua democratização, nos níveis da organização, poderá elevar o domínio do processo e suas relações de causa e efeito.

Palavras-chave: Valor-em-Uso; Modelo termoquímico do processo LD; Refino primário.

THERMOCHEMICAL AND ECONOMIC MODEL OF THE LD PROCESS AS A TOOL-MAKING TO THE VALUE-IN-USE, LEARNING AND PROCESS AUDIT

Abstract

This work presents a thermodynamic and economic off-line model for a LD converter developed in order to analyze and optimize the process, aiming low costs, and high productivity, respecting metallurgical requirements. This program can identify the potentialities of LD converters, analyzing the effects of operating parameters, and creating scenarios that represent the best performance. The model is used to check the operational procedures and helps to verify measurement problems, but also taking into account the quality and cost of raw materials. The value-in-use criterion is a good procedure to take decisions about the use of new technologies and raw materials. This is a open and easy-understandable tool, build in Microsoft Excel 2007 and Visual Basic. The use of this program by all people involved in the process take them to a better domain of the process and its cause-effect relationships.

Key words: Value-in-use; Thermochemical model of BOF; Primary refining.

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

² Estudante de Engenharia Metalúrgica, Sócio Junior da ABM.

³ Engenheiro Metalurgista, Ph.D. Diretor Executivo da seção brasileira American Iron & Steel Technologies e consultor pela RSConsultants Ltda., Sócio da ABM.



1 INTRODUÇÃO

A produtividade de uma aciaria está diretamente relacionada ao tempo gasto em cada uma das etapas de produção do aço. Na operação de refino primário em conversores a oxigênio, por exemplo, o tempo de processamento é dividido nas seguintes etapas: carregamento da sucata, carregamento do gusa líquido, sopro de oxigênio, vazamento do aço e vazamento da escória.

O controle e conhecimento técnico de cada uma dessas etapas são fundamentais para otimização do tempo de processo. Como por exemplo, a transformação da carga metálica em aço que ocorre durante a etapa do sopro de oxigênio. O domínio das reações que ocorrem neste período possibilita a redução do tempo de processo e, conseqüentemente, aumento da produtividade.

A melhor performance no processo de refino do aço é verificada por parâmetros que minimizem os custos e aumentem a capacidade produtiva, sem afetar a qualidade do aço produzido, tais como:

- flexibilidade no uso de matérias-primas e insumos;
- escolha de parâmetros que gerem maiores produtividade e rendimento; e
- melhor aproveitamento da energia.

A Figura 1 apresenta as variáveis que podem ser controladas durante o refino primário para aumentar a produtividade e reduzir os custos do processo, de modo a buscar a melhor performance. Através dos quadros mostrados na extremidade direita da Figura 1, é possível perceber que o custo do processo de refino é dado pelo produto do consumo das matérias-primas e o preço das mesmas, sendo que nem sempre um processo LD com parâmetros bem controlados na área de operação, oferece o aço de menor custo. Dessa forma, é necessário uma relação de maior sinergia na área técnica do processo de modo a alcançar a melhor performance do quadro mostrado, ou seja, um cenário de menor custo e alta produtividade.

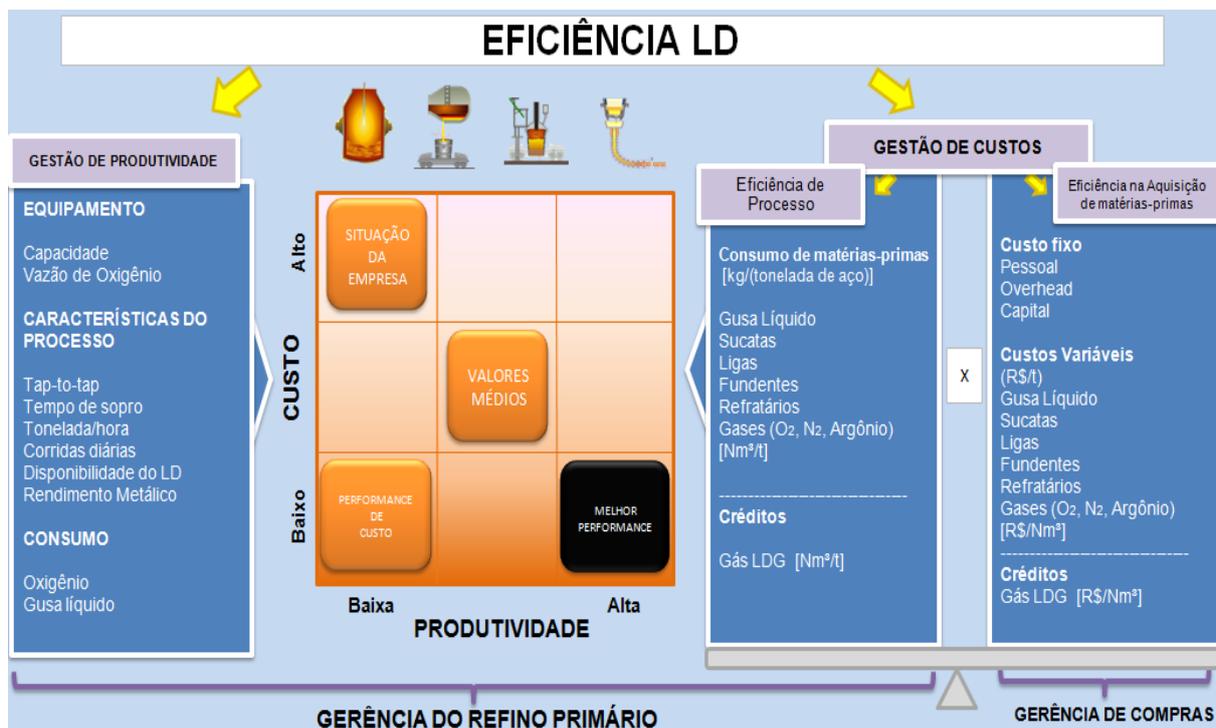


Figura 1. Variáveis importantes para o controle operacional e econômico de uma Aciaria LD.



Barreto⁽¹⁾ descreve que o processo LD não deve ser modelado baseando-se somente em correlações múltiplas e estatísticas. Primeiramente, deve-se procurar equacionar um modelo completamente teórico, para depois inserir a estatística dos dados operacionais.

Desse modo, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático do Conversor LD, cujos fundamentos são o balanço de massa e o balanço térmico, baseados na físico-química metalúrgica clássica, aliados à análise de custos de matérias-primas e aos parâmetros do processo. O conhecimento de processo aliado ao modelo em estudo se transforma em uma eficiente ferramenta para as decisões de cunho tático e operacional relativas ao processo siderúrgico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Construção do Modelo Termoquímico do Conversor LD

A construção do modelo proposto foi realizada em uma planilha eletrônica com o aplicativo Microsoft Excel 2007 com suplemento Solver e programação em Visual Basic. Foram desenvolvidos os balanços de massa e térmico, assim como o balanço econômico do processo.

2.2 Avaliação de Cenários Distintos no Conversor LD

Primeiramente, foi determinado um cenário referência para comparação com as simulações dos cenários propostos. Para isso, foram estudadas condições hipotéticas que representassem a situação operacional de uma aciaria.

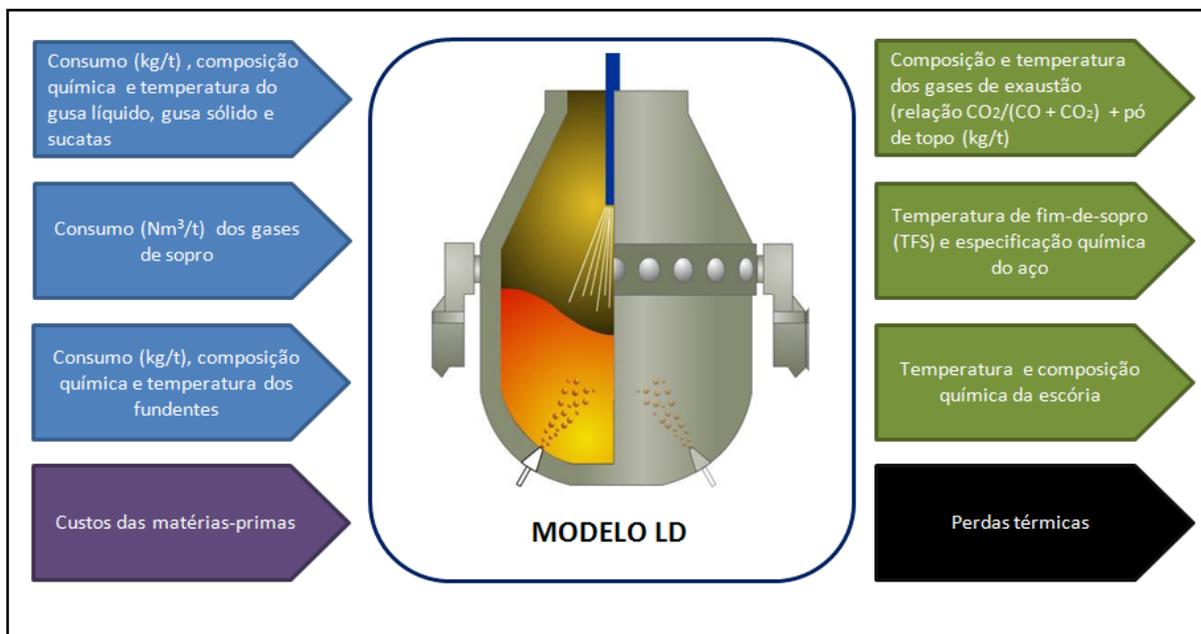


Figura 2. Determinação de variáveis do cenário referência.

Após determinado o cenário padrão, outros cenários distintos foram propostos e simulados para efetuar a análise econômica do processo das distintas condições. Os cenários propostos são descritos a seguir:

- redução da percentagem de gusa sólido na carga metálica;
- redução do consumo de sucata de escória;



- aumento da temperatura do gusa líquido;
- diminuição da temperatura de fim de sopro (TFS) do aço;
- redução da basicidade binária; e
- combustão secundária de 30%.

O programa desenvolvido define o carregamento de materiais no Conversor LD que apresentem o menor custo, sem afetar a qualidade do aço. Os resultados econômicos obtidos nestas simulações foram comparados com os obtidos no cenário referência.

2.3 Determinação do Valor-em-uso para o Gusa Sólido

O valor-em-uso é a capacidade que um produto tem para satisfazer determinadas necessidades. Esse critério objetiva valorar uma determinada matéria-prima em função do benefício ou prejuízo advindo da sua utilização no processo. Nesse sentido, o modelo avaliará qual o valor do preço do insumo em questão, que proporcione uma operação com custo mínimo do aço e lucro máximo. No presente trabalho, foi analisado o custo da matéria-prima gusa sólido.

Foram analisados dois cenários: o cenário 1 que não utiliza gusa sólido na carga metálica e o cenário 2 que usa a capacidade máxima de gusa sólido considerada na situação operacional hipotética.

Para o cálculo do valor-em-uso, foi utilizado o comando "Atingir Metas" do Microsoft Excel 2007.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Construção do Modelo Termoquímico do Conversor LD

O modelo matemático foi construído visando uma função objetivo de custo mínimo, cercada de restrições ou condições de contornos conforme esquematizado a seguir:

Função Objetivo: Minimização do Custo

$$\text{Min } \sum \text{Preço Matéria-prima (\$/tonelada)} * \text{Peso Matéria-prima (tonelada)}$$

Nessa relação, foram abordados todos os materiais que entram no Conversor LD, tais como a carga metálica (gusa líquido, gusa sólido e sucata), fundentes (sinter, cal, dolomita calcinada) e gases (Oxigênio, Argônio e Nitrogênio).

Para otimizar e representar, com coerência, o processo de refino primário foi necessário adotar os seguintes fundamentos e restrições descritos abaixo:

Restrição 1 – Conservação de massa:

A conservação dos materiais na forma elementar foi considerada. Foram considerados os balanços de massa do ferro, carbono, fósforo, enxofre, silício, cálcio, manganês, entre outros.

$$\sum W_{\text{Elemento,Entrada}} - \sum W_{\text{Elemento,Saída}} = 0$$



Restrição 2 – Balanço Térmico:

O balanço térmico do sistema deve respeitar as leis da termodinâmica, ou seja, toda energia que entra deve ser a mesma que sai.

$$\sum \text{Energia}_{\text{Entrada}} - \sum \text{Energia}_{\text{Saída}} = 0 \quad (1^{\text{a}} \text{ Lei da Termodinâmica})$$

A temperatura de referência considerada foi de 25°C ou 298K.

O cálculo do balanço térmico do modelo LD considerou como entradas de energia:

- calor de resfriamento do gusa líquido da sua temperatura até a temperatura de referência; e
- calor das reações exotérmicas.

As saídas de energia foram:

- calor de aquecimento do aço da temperatura de referência até a temperatura fim-de-sopro (TFS);
- calor de aquecimento da escória da temperatura de referência até a sua temperatura;
- calor de aquecimento dos gases de exaustão da temperatura de referência até a sua temperatura;
- calor de aquecimento do pó de topo da temperatura de referência até a sua temperatura; e
- perdas térmicas (fechamento do balanço térmico).

Tavares⁽²⁾ descreve o cálculo do calor de aquecimento e de resfriamento através da equação 1:

$$(H_t - H_{298})_i \text{ [Kcal/mol]} = A * T + B * 10^{-3} * T^2 + C * 10^5 * T^{-1} + D \text{ (Equação 1)}$$

Carvalho⁽³⁾ fornece os valores das constantes A, B, C e D, bem como as faixas de temperatura, em que estas são válidas.

Restrição 3 – Capacidade de refino:

Todo Conversor LD tem suas características específicas. Para avaliar esse requisito, foi inserido o conceito de partição de enxofre e fósforo. Coeficiente de partição é definido como a distribuição do elemento entre a escória e o aço.

Restrição 4 – Especificação do produto:

É definida a composição final do aço a ser produzido, ou seja, consiste em um limite superior e inferior para cada elemento, não prejudicando a qualidade do processo.

Restrição 5 – Composição da escória

A escória, de demasiada importância para processamento de algumas reações de refino, deve possuir restrições metalúrgicas no modelo. Como restrição, a escória deve estar com sua basicidade binária e magnésiana entre uma faixa determinada pelo usuário.

$$\text{Basicidade Binária} = \% \text{ CaO} / \% \text{ SiO}_2$$



$$\text{Basicidade Magnesiânica} = \% \text{MgO} / \% \text{SiO}_2$$

Restrição 6 – Saturação de MgO na escória

Por fim, foi definido um limite inferior e superior para a porcentagem de MgO na escória. O objetivo é estar próximo à porcentagem de MgO de saturação real necessária para atender os aspectos metalúrgicos em relação à proteção do refratário.

3.2 Avaliação de Cenários Distintos no Conversor LD

Para avaliar os benefícios econômicos do modelo em estudo, foram propostos cenários que representassem mudanças na qualidade de matérias-primas, bem como variações dos parâmetros operacionais do refino primário. Com isso, foi possível avaliar os potenciais de lucro das situações em análise, a partir dos efeitos promovidos no custo do aço e na produtividade do processo.

As Figuras 3 e 4 relacionam o custo do aço com o aumento do consumo de sucatas e a redução do consumo de gusa líquido. Eles foram construídos de modo que a variação das massas desses insumos para cada um dos cenários propostos foram representados em porcentagens calculadas a partir dos resultados obtidos no cenário referência. Já o custo do aço do cenário referência foi transformado em porcentagem, sendo considerado igual a 100%. A partir desse valor, foi obtido o custo do aço dos outros cenários em estudo.

Para a análise dessas figuras, é necessário mencionar o cenário econômico considerado. A relação entre os preços dos insumos da carga metálica é mostrada a seguir:

$$R\$/\text{Unidade}_{\text{gusa sólido adquirido}} > R\$/\text{Unidade}_{\text{gusa líquido}} > R\$/\text{Unidade}_{\text{sucatas}}$$

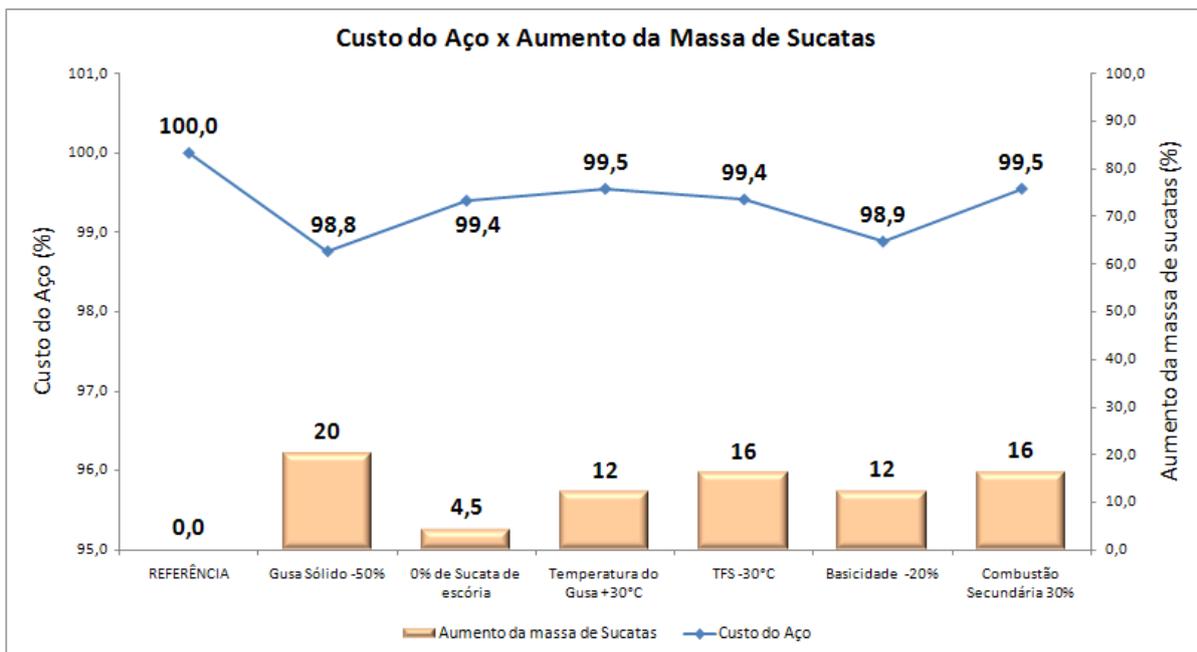


Figura 3. Relação do custo do aço produzido no conversor LD e aumento da massa de sucatas.

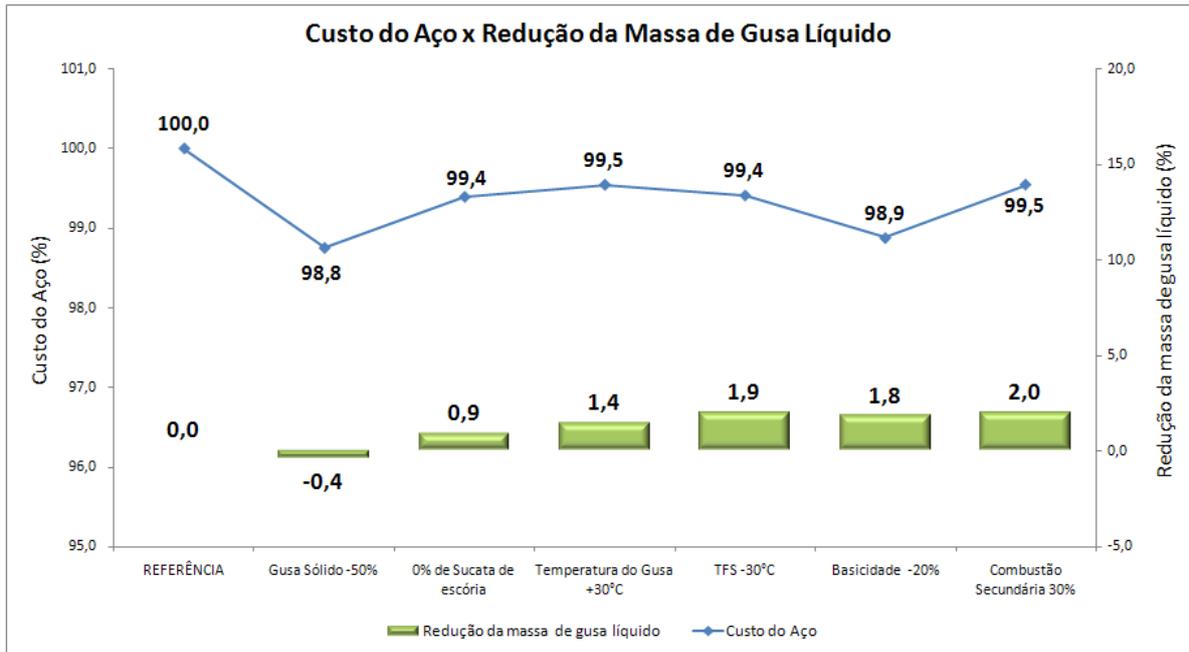


Figura 4. Relação do custo do aço produzido no conversor LD e a redução do consumo de gusa líquido.

Pelas Figuras 3 e 4, verifica-se que, em todos os cenários, houve redução do custo do aço. Com exceção do cenário relativo ao gusa sólido, nota-se que a diminuição do custo do aço é acompanhada pela economia do consumo de gusa líquido e do aumento da utilização de sucatas no conversor LD. Esse efeito provoca a diminuição do custo do aço, já que o gusa líquido apresenta maior preço que a sucata.

O cenário que apresenta a redução de 50% da massa de gusa sólido mostra um aumento de 0,4% na massa de gusa líquido e um aumento de 20% na massa de sucatas em relação ao cenário referência.

O gusa sólido possui teores de silício e carbono semelhantes aos do gusa líquido. Tais elementos são oxidados na etapa de sopro e essas reações exotérmicas liberam grande quantidade de energia para o sistema. Assim a redução do gusa sólido diminui o aporte térmico para o conversor LD, o que é compensado pelo maior consumo de gusa líquido, e permite também o uso de maior massa de sucata, a qual atua como refrigerante no processo. A sucata, por possuir maior teor em ferro que o gusa sólido, aumenta o rendimento metálico e, conseqüentemente, melhora a produtividade do refino. Como o gusa sólido adquirido é o insumo mais caro da carga metálica, a sua substituição por gusa líquido e sucatas produz uma redução de cerca de 1% no custo do aço.

A sucata de escória possui menor teor em ferro e maior quantidade de óxidos na sua composição em relação às outras sucatas consideradas pelo modelo LD. Assim, a sua redução pode ser entendida como uma análise dos efeitos da melhoria da qualidade de sucatas e a importância de se conhecer a sua composição química.

A sucata de escória aumentou a massa de sucata rica em ferro em 4,5% e reduziu o consumo de gusa líquido em cerca de 1%. Como essa matéria-prima possui elevados teores de óxidos na sua composição, a sua redução provoca a diminuição da massa de escória do refino primário, o que diminui a saída de energia do sistema, de modo a beneficiar o balanço térmico.

O aumento da temperatura de gusa líquido diminui a massa desse mesmo insumo em 1,4% e aumenta o consumo de sucatas em 12%, o que confere uma redução do custo do aço de 0,5%, enquanto que a redução da temperatura fim-de-sopro (TFS)



diminui a massa de gusa líquido em cerca de 2% e aumenta em 16% a massa de sucata consumida. Esses dois cenários atuam de modo semelhante, já que melhoram o aproveitamento de energia no balanço térmico: o aumento da temperatura de gusa líquido aumenta a entrada de energia do sistema e a redução da TFS diminui a saída de energia no conversor LD.

Já a redução da basicidade binária (%CaO/%SiO₂) provoca a redução dos principais óxidos constituintes da escória, o que reduz a massa desta de forma acentuada, com uma diminuição de cerca de 16%. Esse efeito é semelhante ao que foi obtido para o cenário da redução de sucata de escória: com a diminuição da escória, a saída de energia do sistema diminui, o que contribui para diminuir a massa de gusa líquido em 1,8% e aumentar a massa de sucata em 12%.

A combustão secundária, através da reação exotérmica da combustão do gás CO a CO₂, beneficia o balanço térmico com disponibilidade de energia no processo. Com isso, o consumo de gusa líquido reduz 2% e há o aumento em 16% do consumo de sucatas, e, conseqüentemente, contribui para reduzir o custo do aço em 0,5%.

A Figura 5 mostra o aumento do lucro horário (R\$/hora) em porcentagem em relação ao cenário referência, e a sua relação com o custo do aço e a produtividade horária (tonelada/hora). O cálculo do lucro horário está representado na equação 2.

$$\text{Lucro (R\$/h)} = [\text{Preço de venda (R\$/t)} - \text{Custo do Aço (R\$/t)}] \times \text{Produtividade Horária (t/h)} \quad (\text{Equação 2})$$

Os valores do custo do aço e da produtividade calculados pelo modelo LD também foram transformados em porcentagem. Ou seja, os números relativos a essas variáveis no cenário referência foram transformados em 100%, sendo que os valores dos outros cenários foram calculados proporcionalmente. A transformação dos valores reais para porcentagem não considerou a diferença numérica existente entre o custo do aço e a produtividade.

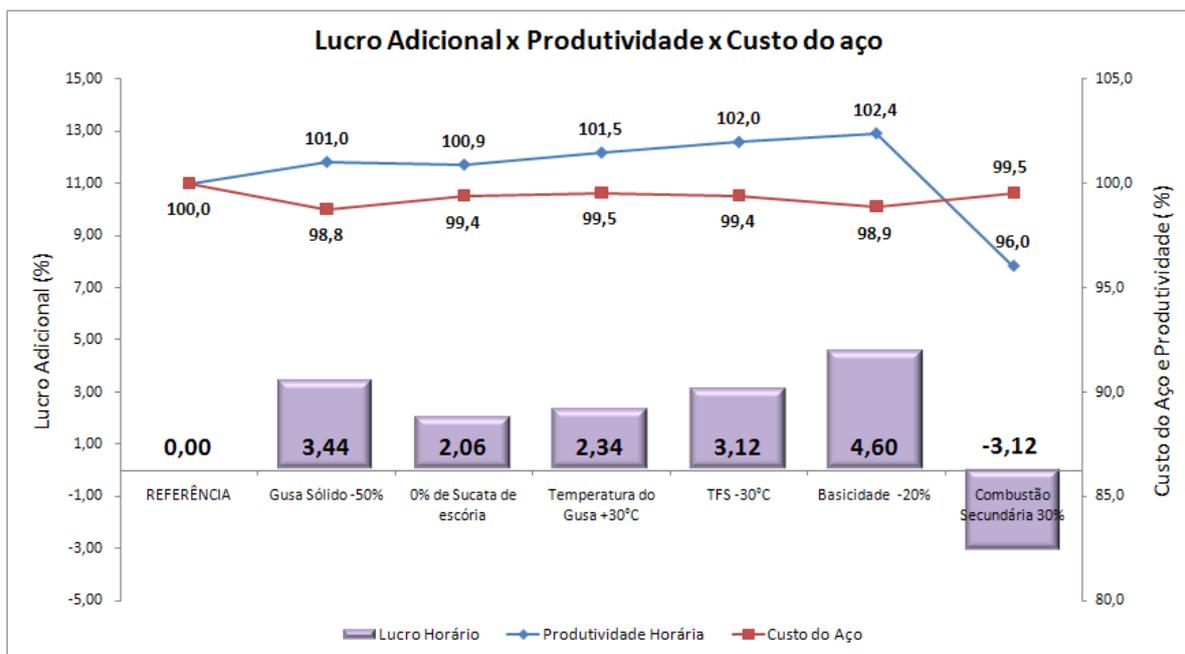


Figura 5. Comparação do lucro adicional para cada cenário, em função do cenário referência e sua relação com o custo do aço e produtividade do processo.



O aumento do lucro pode ser associado ao grau de divergência entre as retas de custo e produtividade. Isso é traduzido pela equação 2, já que quanto maior a produtividade e menor o custo do aço, maior o lucro obtido.

Pela Figura 5, nota-se que o cenário de combustão secundária apresentou um prejuízo de 3,12%, devido à diminuição da produtividade em relação ao cenário referência. A combustão secundária aumenta o tempo de sopro do processo, devido à oxidação do CO a CO₂, o que aumenta o tap-to-tap e reduz a produtividade horária. Assim, para que a combustão secundária configure um potencial de lucro ao processo de refino primário, é necessário um quadro econômico que produza um aço de menor custo, capaz de compensar a perda de produtividade desse cenário..

A redução da basicidade binária eleva o lucro em 4,60%. Esse cenário representa a maior produtividade entre os demais cenários e também a maior redução do custo do aço depois do cenário de redução do gusa sólido.

O gusa líquido possui cerca de 0,100% de fósforo. A maioria das especificações dos aços requerem teor de fósforo final menor que 0,020%. Isso significa que a desfosforação é uma das etapas mais importantes no refino primário.

Dessa forma, o *input* de fósforo deve ser um parâmetro relevante na comparação dos cenários. Na Figura 6, é mostrada a relação entre a entrada de fósforo através das matérias-primas (gusa líquido, gusa sólido, sucatas e fundentes), o que é chamado de input de fósforo no conversor LD e o teor de fósforo no aço para cada um dos cenários.

No modelo, a quantidade de fósforo que entra com as matérias-primas é calculada em kg/(tonelada de aço produzido), sendo que o teor de fósforo do aço é dado em percentagem. Para a construção da Figura 6, o valor do teor de fósforo no aço para o cenário referência foi considerado igual a 100%. Tendo como base esse número e as devidas proporções com os valores reais, foram calculados os valores para os outros cenários propostos. O input de fósforo no LD também foi calculado em percentagem, sendo que os valores relativos a essa variável na figura representa o percentual de fósforo reduzido em relação ao cenário referência.

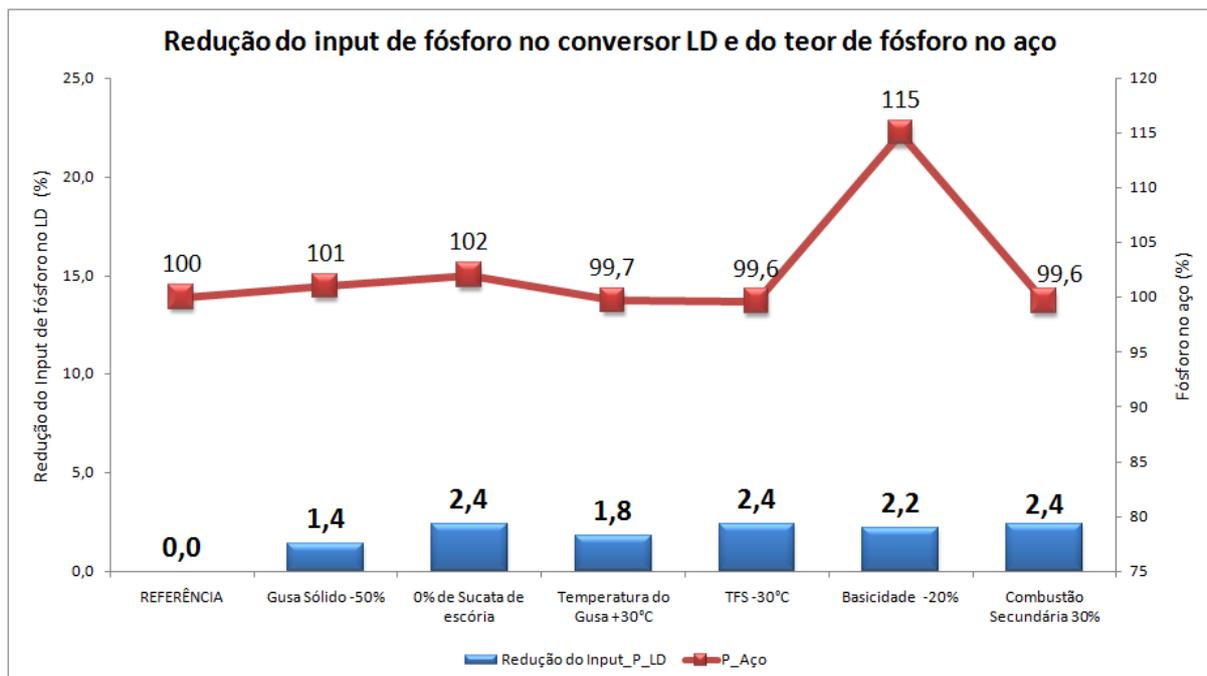


Figura 6. Input de Fósforo no Conversor LD e Fósforo no aço.



Nota-se, a partir da Figura 6, que todos os cenários proporcionaram uma redução do input de fósforo no conversor LD. Porém, com relação aos cenários de redução de gusa sólido, da sucata de escória e da basicidade binária, apesar da diminuição do input no LD, observa-se um aumento de teor de fósforo no aço de 1%, quando se reduz o gusa sólido, de 2%, quando diminui a sucata de escória e de 15%, quando ocorre a redução da basicidade binária. Esse fato deve-se à diminuição da massa de escória (houve redução de cerca de 4% para o cenário relativo ao gusa sólido, cerca de 5% referente à diminuição da sucata de escória e de 17% para a redução da basicidade binária), o que pode ser explicitado pela equação 3:

$$\uparrow(\%P)_{\text{aço}} = \frac{\text{Peso P entra} \times 100 - \text{Peso P pó}}{1000 + \downarrow \text{Peso Escória} \times L_p} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que,

L_p = Coeficiente de partição do fósforo.

A incorporação do fósforo no aço pode ser minimizada pela redução da temperatura fim-de-sopro contrapondo o aumento do fósforo face a redução do peso da escória.

3.3 Valor-em-uso do Gusa Sólido no Refino Primário

Foi observado que o aumento do gusa sólido na carga metálica aumentou o custo do aço e reduziu a produtividade, o que resultou em uma perda de lucro. Esses resultados podem ser verificados nas Figuras 3, 4 e 5.

Em seguida, a partir do cenário 2 e através do comando “Atingir Metas” do Microsoft Excel 2007, foi obtido o preço do gusa sólido para o qual o custo do aço atingisse o valor do cenário 1, o que corresponde ao seu valor mínimo em relação à utilização desta matéria-prima. Nesse caso, a produtividade foi mantida constante para os cenários 1 e 2. Esse fato representa uma situação, em que não é interessante do ponto de vista econômico aumentar a produção do aço para o mercado siderúrgico.

O valor-em-uso obtido para o gusa sólido é cerca de 40% menor que o seu valor considerado no modelo LD. O número encontrado refere-se ao valor máximo que se deve pagar pelo gusa sólido, de modo a obter o aço de menor custo.

4 CONCLUSÃO

Foi desenvolvido um modelo econômico e termodinâmico que serve como ferramenta de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias e processos. Através dele, foi possível identificar as potencialidades do conversor LD, analisando os efeitos de diferentes parâmetros operacionais, e criando cenários e alternativas que representaram o melhor desempenho.

Foi verificado e quantificado nos custos do processo, os efeitos da redução da temperatura fim-de-sopro (TFS), aumento da temperatura do gusa, redução da massa de escória, melhor qualidade da carga metálica, dentre outros.

Com relação à análise econômica do gusa sólido, o valor-em-uso dessa matéria-prima é cerca de 40% inferior ao valor considerado pelo modelo, de forma a obter o custo mínimo do aço. Esse valor está diretamente relacionado com o impacto da qualidade do gusa sólido no processo de refino primário.

Dessa forma, essa ferramenta contribui para que as decisões na produção do conversor LD sejam tomadas com base no custo do aço produzido e no lucro obtido.



Além disso, o modelo construído na plataforma do Microsoft Excel é aberto e flexível, o que facilita a sua democratização na área de operação.

REFERÊNCIAS

- 1 BARRETO, A.F.M. *Controle Estático de Fim de Sopro do Conversor LD*. 1981. 146f. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Faculdade de Engenharia Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- 2 TAVARES, R. P.; CASTRO, L. F.; SAMPAIO, R. S.. *Termodinâmica Metalúrgica*. Belo Horizonte: Editora UFMG.
- 3 CARVALHO, J. L. R.; ASSIS P. S.; CAMILO, R.D.; FIGUEIRA, R.M.; CAMPOS, V. F. *Dados Termodinâmicos para Metalurgistas*. Belo Horizonte. 1977.