

UMA ANÁLISE SOBRE A INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO NO ALTO-FORNO 1 DA ARCELORMITTAL TUBARÃO POR MEIO DO DIAGRAMA DE RIST¹

Sayd Farage David²
Ramiro Conceição Nascimento³
José Roberto de Oliveira³
Marcelo Lucas Pereira Machado³

Resumo

O processo de redução em altos-fornos envolve os maiores custos de uma empresa siderúrgica. A estabilidade operacional do processo de redução deve ser aliada a um baixo consumo de combustível e a uma boa produtividade. Dessa forma, é de suma importância o controle dos principais parâmetros desse processo como a proporção entre a redução direta e a indireta, a eficiência da cuba, a temperatura da Zona de Reserva Térmica e o balanço de energia da Zona de Elaboração. Para isso foi realizado uma análise, usando o diagrama de Rist, para avaliar as mudanças operacionais de uma operação *All Coke* em relação ao uso de injeção de carvão pulverizado no Alto-Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão. O diagrama de Rist foi eficaz em relacionar os parâmetros estudados com essas mudanças operacionais.

Palavras-chave: Redução em alto-forno; Diagrama de Rist; ArcelorMittal Tubarão; Injeção de carvão pulverizado; Alto-forno 1.

AN ANALYSIS ABOUT THE PULVERIZED COAL INJECTION IN BLAST FURNACES AT ARCELORMITTAL TUBARÃO 1 BY RIST DIAGRAM

Abstract

The reduction process in blast furnace involves the higher cost of a steel company. The operational stability of the reduction process should be accompanied by low fuel consumption and a good productivity. Thus, it is extremely important to control the main parameters of this process as the ratio between the direct and indirect reduction, the efficiency of the stack, the temperature of the Thermal Reserve Zone and energy balance of the Elaboration Zone. This analysis was performed using the Rist diagram, to assess the operational changes of operation *All Coke* in relation to the use of pulverized coal injection in a blast furnace 1 at ArcelorMittal Tubarão. The Rist diagram was effective in to relate the parameters studied with these operational changes.

Key words: Blast furnaces ironmaking; Rist diagram; ArcelorMittal Tubarão; Pulverized coal injection; Blast furnace 1.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Mestrando em Engenharia Metalúrgica do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES.

³ Prof. Dr do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de sua antiga origem, a produção de ferro-gusa em altos-fornos tem-se mantido competitiva em relação a processos alternativos de produção de ferro primário. Várias limitações inerentes ao processo foram suplantadas gradualmente através de modificações engenhosas como, por exemplo, a aglomeração de óxidos de ferro, a injeção de redutores auxiliares nas ventaneiras e o uso de computadores para a análise do processo.

No entanto, nos últimos anos, devido ao aparecimento de novas tecnologias para a fabricação de ferro-gusa, as variações nos preços e na qualidade das matérias-primas e as restrições na emissão de poluentes, tornou-se cada vez mais importante o uso de modelos para um controle mais preciso do processo.

Segundo Defendi et al.⁽¹⁾ o diagrama de Rist é um modelo que incorpora as principais características de operação de um alto-forno, ilustrando soluções para vários problemas através de balanços de massa e de calor em estado estacionário, relacionando o grau de oxidação do gás e da carga. Este digrama pode ser usado para o entendimento de alterações nos parâmetros operacionais causados por modificações de processo. Além disso, o diagrama de Rist pode ser utilizado, através de uma interação com um especialista, para projeção de operação.

Os principais parâmetros avaliados pelo diagrama de Rist são a proporção entre a redução direta e a indireta, a eficiência da cuba, a variação da temperatura da Zona de Reserva Térmica e o balanço de energia da Zona de Elaboração. Esses parâmetros são associados ao consumo de combustível, produtividade e composição do sopro.

O diagrama de Rist tem sido muito usado para determinar a variação de parâmetros operacionais em altos-fornos quando há variações no processo. Um exemplo disso é o trabalho de Ariyama et al.⁽²⁾ em que o diagrama é usado para determinar as condições operacionais do alto-forno em relação às modificações propostas ao processo para a redução da emissão de CO₂ ou o estudo de Kasai e Matsui⁽³⁾ que avaliou a influência da reatividade do coque na redução da Temperatura da Zona de Reserva Térmica.

Com o intuito de possuir um controle mais restrito do processo de redução foi desenvolvido um estudo baseado nos conceitos do diagrama de Rist para avaliar os principais parâmetros envolvidos nesse processo. Para isso foi analisado as variações operacionais de um processo *All Coke* em relação ao uso de injeção de carvão pulverizado, *Pulverized Coal Injection* (PCI), em dois períodos distintos do Alto-Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão. Essas variações serão determinadas através das características do gás de topo, do sopro, da composição da carga e do ferro-gusa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Diagrama de Rist

O diagrama de Rist é baseado no equilíbrio termoquímico dos principais elementos envolvidos na reação de redução. Ele possui algumas restrições, pois não considera fatores como a distribuição e a permeabilidade da carga, a velocidade de produção ou a profundidade do sopro.

Esse diagrama é um modelo matemático que usa um balanço de massa e energia para representar de forma gráfica a operação do Alto-Forno. Ele faz uso

principalmente do balanço de carbono, oxigênio e hidrogênio envolvidos na formação do gás redutor, ilustrando as condições que o oxigênio é transferido da carga para o gás.

No diagrama, o balanço de massa para os três elementos anteriormente citados, é preferencial e devem ser feitos prioritariamente uma vez que estes são envolvidos em:

- na formação do gás redutor via reações em elevadas temperaturas (reação de combustão, redução direta dos óxidos de ferro e dos não ferrosos);⁽⁴⁾ e
- na utilização do gás redutor via redução indireta dos óxidos de ferro.⁽⁴⁾

Os eixos representam a formação de gás redutor de acordo com as fontes de oxigênio. O eixo x descreve a fração da contribuição na formação de um mol de gás redutor, equação 1. Esse eixo pode ser dividido em: reação de combustão nas ventaneiras (X_b), de redução de metalóide (X_f) e da reação de *solution loss* (X_{sl}) (Figura 1). Já o eixo y representa essas frações em relação à formação de um mol de ferro, ou seja, a quantidade de gás redutor necessária para formar um mol de ferro metálico, μ , equação 2.

$$X_b + X_f + X_{sl} = 1 \text{ (mol de gás redutor)}^{(4)} \quad (1)$$

$$Y_b + Y_f + Y_{sl} = \mu \text{ (mol de gás redutor / mol de Fe)}^{(4)} \quad (2)$$

Em relação às fontes de oxigênio temos que a parte positiva do eixo y representa o grau de oxidação do minério de ferro, ou seja, o oxigênio proveniente do minério. E a parte negativa a quantidade de oxigênio proveniente do sopro e da redução dos não ferrosos.

A origem do eixo y no diagrama é arbitrária. Por conveniência pode ser escolhido um eixo y de tal forma que o oxigênio originalmente combinado com o ferro ($Y_{sl} + Y_i$) apareça no lado positivo e as outras fontes de oxigênio e hidrogênio apareçam do lado negativo.

O eixo x pode ser dividido em duas partes, a de formação de gás redutor e a de redução indireta, o seu consumo:

- formação de gás redutor: corresponde ao intervalo de $0 < x < 1$, no qual a formação de gás redutor se deve a reação de “solution loss”, redução de não ferrosos e da reação de combustão do sopro; e
- redução indireta: corresponde ao intervalo de $1 < x < 2$, no qual ocorre o consumo do gás redutor sem sua reposição.

Através dessas divisões podemos formar os segmentos AE, GW e UV (Figura 1). O segmento principal é denominado Reta Operacional, AE. Esse segmento é interceptado por retas auxiliares que representam o grau de redução da carga ao chegar à Zona de Elaboração, segmento GR, e o balanço de energia da Zona de Elaboração, segmento UV.

A Reta Operacional ilustrada na Figura 1 através do segmento EA representa de forma gráfica a participação dos elementos carbono, oxigênio e hidrogênio, através de balanço de massa, na formação do gás redutor e na utilização deste através de redução indireta. Os segmentos BD, DP e PE estão confinados no intervalo de $0 < X < 1$ representam à formação do gás redutor e o segmento AB confinado no intervalo $1 < X < 2$ corresponde à utilização deste através de redução indireta dos óxidos de ferro.

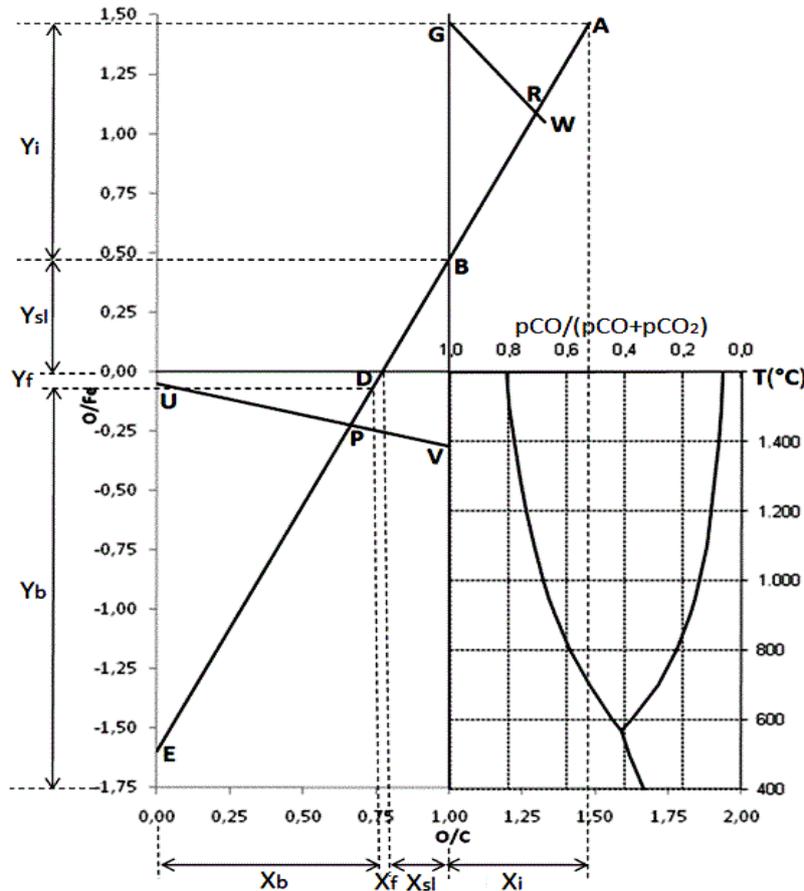


Figura 1. Diagrama de Rist.

2.2 Cálculo do Segmento AE

A reta operacional possui dois importantes grupos de propriedades associadas com a redução indireta na cuba, ponto ω , e com o balanço térmico da Zona de Elaboração, ponto P.

A Reta Operacional é determinada pelos pontos A e E.

O ponto A é determinado pela oxidação dos gases de saída, coordenada X_A , e pelo grau de oxidação da carga metálica, coordenada Y_A .

A coordenada X_A é calculada a partir da composição dos gases de saída no topo do alto-forno, segundo a equação 3. A sua composição é dada em porcentagem.

$$X_A = 1 + \frac{(H_2O + CO_2)}{(CO_2 + CO + H_2 + H_2O)} \quad (3)$$

A coordenada Y_A é determinada pela composição da carga metálica, em relação ao teor de Ferro total, %TFe (Hematita mais a quantidade de Wustita na carga metálica), e a porcentagem de FeO. O grau de oxidação é determinado pela quantidade de oxigênio contida no minério relativo a um átomo de ferro, ou seja, a porcentagem dos óxidos de ferro vezes a sua quantidade em mol de oxigênio que é relativa a um mol de ferro (1,5 para a Hematita e 1,05 para a Wustita), segundo a equação 4.

$$Y_A = \frac{(\%TFe - \%FeO) \cdot 1,5 + \%FeO \cdot 1,05}{\%TFe} \quad (4)$$

O ponto E é determinado pelas coordenadas X_E e Y_E . A coordenada X_E por convenção é igual a zero, e a coordenada Y_E representa a quantidade de gás

reductor produzida na reação de combustão nas ventaneiras, Y_b , mais a quantidade de gás reductor devido à redução direta do metalóide Y_f . Assim, temos:⁽⁴⁾

$$X_E = 0 \quad (5)$$

$$Y_E = -Y_b - Y_f \quad (6)$$

A coordenada Y_f é dependente da composição química do ferro gusa, ou seja, da porcentagem em massa de Si, Mn e P no ferro-gusa. Logo, quantidade de CO formado pela reação de redução direta dos não ferrosos por mol de ferro em uma tonelada de ferro gusa (MolFe), é representada por:

$$Y_f = \frac{(\%Si \cdot 10 \cdot \frac{2}{28,09} + \%Mn \cdot 10 \cdot \frac{1}{54,94} + \%P \cdot 10 \cdot \frac{5}{30,97} \cdot \frac{1}{2}) \cdot 1000}{\text{MolFe}} \quad (7)$$

O termo Y_b é determinado pela quantidade de CO e H_2 formado nas ventaneiras em relação à quantidade em mol de ferro para uma tonelada de ferro-gusa.

$$Y_b = \frac{(\text{MolCOVent} + \text{MolH}_2\text{Vent})}{\text{MolFe}} \quad (8)$$

Com essas coordenadas pode-se traçar o segmento AE e determinar algumas quantidades como está representado no diagrama da 0. Com o segmento AE podemos determinar outros pontos como as coordenadas que representam a redução Indireta (X_i, Y_i) e de Redução Direta, ponto B(X_{SL}, Y_{SL}), pois já sabemos que no intervalo de $1 < x < 2$ corresponde ao domínio de consumo de gás reductor.⁽⁴⁾

A inclinação da reta AE, μ , indica número de moles de gás reductor (CO e H_2) necessário para produzir um mol de ferro.⁽⁴⁾

2.3 Cálculo do Segmento GW

O segmento GW representa um balanço de massa e energia da Zona de Preparação. O balanço de massa é relativo ao grau de oxidação da carga metálica quando ela passa para a Zona de Elaboração, Ponto R, e o balanço de energia é referente a essa temperatura de equilíbrio (Figura 1).

Esse segmento é calculado em função da composição do gás de topo e do grau de oxidação da carga metálica. E ele representa, quando intercepta com a reta operacional, o grau de oxidação da carga metálica quando ela passa para a Zona de Elaboração, ponto R da Figura 1. Esse ponto é determinado pela intersecção do seguimento GW com o AE.

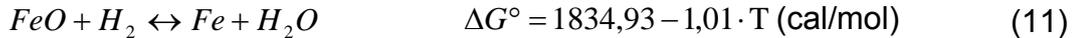
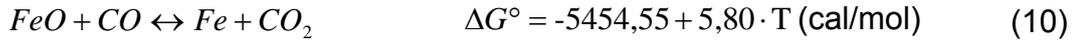
O ponto G é determinado pelo grau de oxidação da carga metálica no carregamento do alto-forno, por isso temos que $Y_G = Y_A$ e como não há redução direta na Zona de Preparação $X_G = 1$.⁽⁴⁾

Ponto W é determinado pelas coordenadas Y_W e X_W . Por definição Y_W é igual a 1,05, razão molar entre o oxigênio e o ferro na Wustita.

X_W corresponde ao grau de oxidação dos gases no início da Zona de Elaboração. A composição é dependente da temperatura de reatividade do coque, que de acordo com a literatura TR=950°C e da composição dos gases nessa temperatura, equação 9.

$$X_W = 1 + \left[\frac{\left(\frac{CO + CO_2}{1 + K_{10}} \right) + \left(\frac{H_2 + H_2O}{1 + K_{11}} \right)}{CO + CO_2 + H_2 + H_2O} \right] \quad (9)$$

Onde K_{10} e K_{11} são as constantes de equilíbrio das reações 10 e 11 respectivamente⁽⁵⁾



O ponto R é determinado pela intersecção da reta AE com o segmento GW, e ele determina o grau de oxidação do minério de ferro, como está ilustrada na Figura 1. Através desse ponto se pode determinar o desvio de Rist, o Fator Omega. Esse cálculo é determinado pela diferença entre o grau de oxidação do minério no eixo O/Fe do ponto R e do ponto W, que é o da wustita, 1,05:⁽⁴⁾

$$\omega = Y_R - 1,05 \quad (12)$$

Esse segmento possui relação direta com o sistema Fe-C-O, ou seja, as coordenadas O/C do diagrama de Rist representam as respectivas relações $P_{CO}/(P_{CO} + P_{CO_2})$, do equilíbrio FeO-Fe, associadas aos pontos R e W apresentados na Figura 1.

A eficiência da cuba (η) representa a quantidade do óxido de ferro que é reduzida a wustita até a Zona de Elaboração, ou seja, indica a extensão da redução indireta na cuba. Quanto maior a eficiência da cuba menor será a extensão da reação de redução direta e conseqüentemente menor o consumo energético do alto-forno. A eficiência da cuba pode ser determinada pela razão entre os segmentos RG e GW:⁽⁴⁾

$$\eta = \frac{RG}{GW} \quad (13)$$

A temperatura de início de reatividade do coque possui relação direta com a composição dos gases, como está demonstrado na equação 9. E através da Figura 1 podemos relacionar essa temperatura com o desvio de Rist e com a eficiência da cuba.

Para um mesmo valor de Y_E , quanto maior o desvio de Rist menor a eficiência da cuba e maior será o consumo específico de coque. Isso fica claro, pois para um mesmo valor de Y_E , entrada de gás redutor nas ventaneiras por mol de ferro, há um aumento no valor de μ . Esse aumento é proporcional a redução direta do alto-forno em resposta ao aumento da temperatura da Zona de Reserva Térmica.

2.4 Cálculo do Segmento UV

As propriedades da linha de operação associadas com o balanço de térmico da Zona de Elaboração é representada pelo ponto P. Esse ponto é determinado pela intersecção da reta operacional com o segmento UV.

O segmento UV é construído a partir de um balanço térmico das reações de combustão, de *solution loss* e de outras necessidades térmicas da Zona de Elaboração como o aquecimento e fusão da carga e perdas térmica.

O balanço de energia do forno é feito da seguinte forma:⁽⁴⁾

$$q_b \cdot Y_b = q_{SL} \cdot Y_{SL} + \theta \quad (14)$$

A quantidade q_b representa o calor fornecido pelo sopro e q_{SL} o calor requerido pela reação de Boudouard. A variável θ quantifica o calor requerido pela Zona de Elaboração menos a reação de *solution loss*, e o seu valor é determinado de maneira indireta através do ponto P. Logo essa variável representa as demais necessidades térmicas da Zona de Elaboração.⁽⁴⁾

As variáveis que representam a quantidade de calor, q_b e q_{SL} , são referentes a um mol de gás redutor. Já a variável θ não possui esse referencial.

O ponto P divide o segmento UV em duas regiões em que o seu comprimento corresponde à quantidade de calor requerida pela redução direta em relação ao calor fornecido pelo sopro. E esse ponto divide o segmento UV na razão $PU/PV = q_{sl}/q_b$.⁽⁴⁾

A reta operacional gira em torno de P sob influência de fatores que afetam a quantidade de “solution loss” sem alterar outros requerimentos térmicos da Zona de Elaboração. As coordenadas do ponto P, em relação a um mol de gás redutor, são:

$$X_P = \frac{q_{SL}}{(q_{SL} + q_b)} \quad (15)$$

$$Y_P = \frac{\theta}{(q_{SL} + q_b)} \quad (16)$$

É interessante notar o quanto a reação de Boudouard é endotérmica, isso pode ser comparado quando, por simples inspeção na Figura 1, comparamos o segmento UP com o PV.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos dados de cada período foram determinados os seus valores médios e os seus desvios para cada variável de entrada do modelo. A Tabela 1 apresenta os valores para o período em que não é usado o PCI, chamado de operação *All Coke* e os dados do período em que é usada a injeção de carvão pulverizado.

Com esses dados foi possível determinar o diagrama de Rist que compara as duas formas de operação do Alto-Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão. A Tabela 2 contém os pontos de cada segmento usado na determinação do diagrama da Figura 2.

Tabela 1. Variáveis de entrada para a operação *All Coque* e com PCI

Variáveis de Entrada	Operação <i>All Coke</i>		Operação com PCI	
	Média	Desvio médio	Média	Desvio médio
Volume de Sopro (Nm ³ /min)	7134,92	73,732	6308,16	62,657
Temperatura do Ar de Sopro (°C)	1142,94	7,852	1246,79	0,923
Taxa de O ₂ (%)	1,84	0,150	5,28	0,107
Umidade do Ar de Sopro (g/Nm ³)	49,93	2,252	28,15	2,631
Produção Espec. Pó (Kg / t - Gusa)	12,50	2,507	10,89	2,720
Composição de H ₂ no Topo (%)	3,30	0,183	4,47	0,114
Composição de N ₂ no Topo (%)	50,97	0,221	47,12	0,165
Composição de CO no Topo (%)	23,40	0,234	23,98	0,171
Composição de CO ₂ no Topo (%)	22,33	0,232	24,43	0,156
Consumo de Coque (Kg/t-gusa)	486,26	10,311	325,46	9,335
Consumo Carvão no PCI (Kg/t-gusa)	0,00	0,000	146,34	2,811
Taxa Sinter (%)	84,78	0,108	64,08	3,541
Taxa Pelota (%)	0,00	0,000	20,69	3,647
Taxa Minério (%)	15,17	0,046	14,43	0,116
[C] (%)	4,71	0,079	4,95	0,050
[Si] (%)	0,23	0,025	0,18	0,025
[Mn] (%)	0,42	0,040	0,46	0,022
[P] (%)	0,08	0,003	0,08	0,002
[S] (%)	0,04	0,005	0,03	0,003
Produção Diária de Gusa (t/d)	9815,89	228,930	10727,67	173,000

Devido às diferentes formas de operação temos algumas variações nos valores das variáveis de entrada. O uso de PCI aumenta a produtividade de ferro-gusa de maneira significativa com praticamente a mesma quantidade de “Fuel Rate”. A eficiência da operação com PCI depende de parâmetros que são influentes no rendimento de sua combustão, como a disponibilidade de oxigênio e a quantidade de calor. Para isso, no período em que é usado o PCI há um aumento do enriquecimento de oxigênio e da temperatura de sopro e redução da umidade de sopro.

Tabela 2. Pontos de Rist para a operação All Coke e com PCI

Pontos Rist	Operação All Coke		Operação com PCI	
	Média	Desvio médio	Média	Desvio médio
XA	1,464	0,00361	1,485	0,00281
YA	1,452	0,00007	1,463	0,00196
XE	0,000	-	0,000	-
YE	-1,466	0,03702	-1,494	0,02116
XG	1,000	-	1,000	-
YG	1,452	0,00007	1,463	0,00196
XW	1,317	0,00046	1,321	0,00043
YW	1,050	-	1,050	-
XU	0,000	-	0,000	-
YU	-0,018	0,00110	-0,016	0,00118
XV	1,000	-	1,000	-
YV	-0,247	0,03052	-0,291	0,01242

Os pontos X_E , Y_E , Y_W , X_U e X_V da Tabela 2 possuem desvio médio igual a zero pois são pontos fixos do diagrama de Rist.

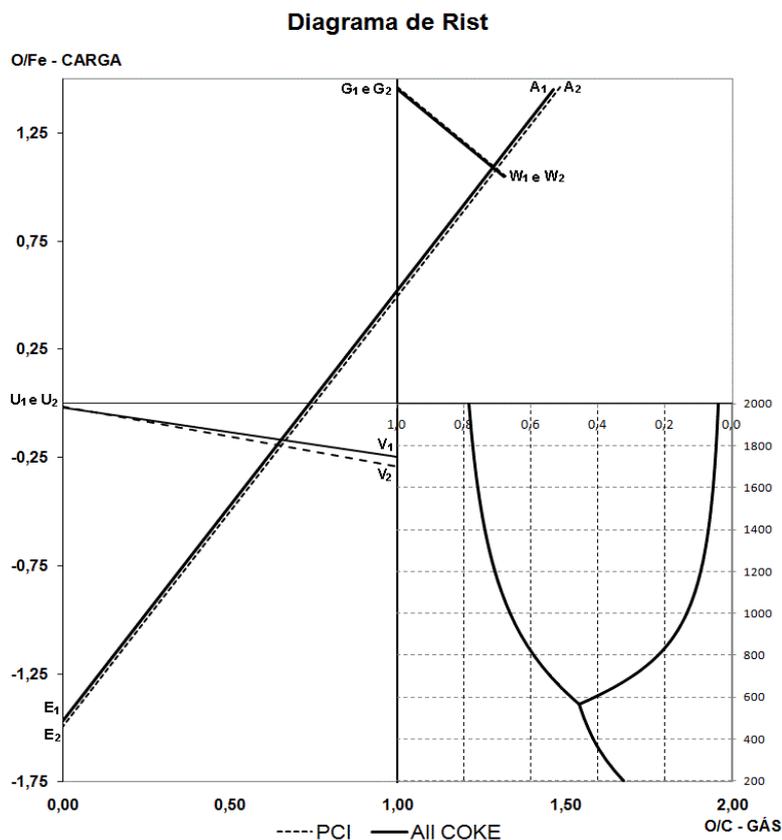


Figura 2. Diagrama de Rist comparando as duas formas de operação.

A Figura 2 foi dividida em quatro regiões para a melhor visualização de cada parte dos segmentos. Os pontos apresentados nos diagramas seguintes possuem índices 1 e 2. O índice 1 corresponde a operação *All Coke* e 2 para a operação com PCI. A Figura 3a apresenta a quantidade de redução direta para cada forma de operação, pontos B₁ e B₂. A Figura 3b apresenta a região do segmento GW e os pontos R₁ e R₂, e a Figura 6a compara esses pontos com o aumento da temperatura da Zona de Reserva Térmica, pontos T₁ e T₂. A Figura 6b apresenta o balanço térmico da Zona de Elaboração através dos pontos V₁ e V₂. A redução direta da operação *All Coke*, ponto B₁, é maior do que na operação com PCI, B₂. Isso é representado pela intersecção do segmento AE com o segmento vertical que passa por X=1, Figura 3a.

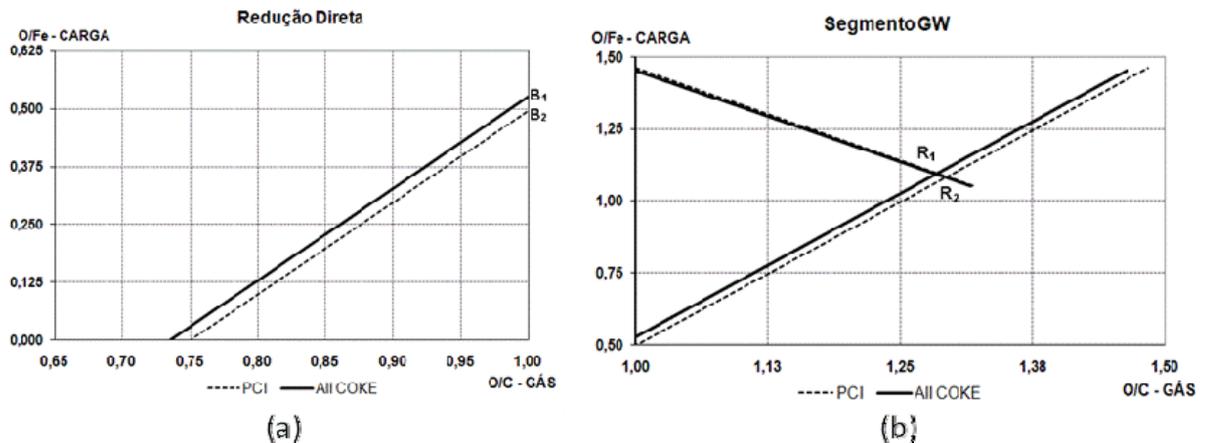


Figura 3. a) pontos B₁ e B₂. Medida da extensão de redução direta para cada período; b) comparação entre R₁ e R₂ para as duas formas de operação.

O gráfico da Figura 4a indica a porcentagem de redução direta diária determinada pelo modelo. A redução direta foi calculada através da divisão da coordenada Y_B pela coordenada Y_A e expressa em porcentagem. De acordo com a Figura 4a a porcentagem de redução direta no primeiro período é maior do que no segundo.

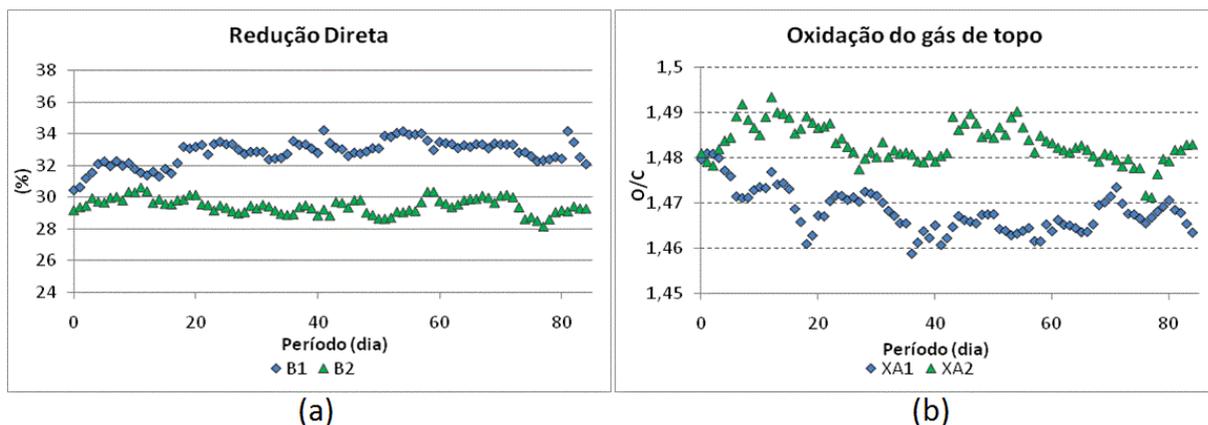


Figura 4. Porcentagem de redução direta (a) e o grau de oxidação do gás de topo (b) calculada diariamente para cada forma de operação.

A Tabela 1 mostra que há uma pequena variação no consumo de *Fuel rate* com um aumento significativo na produção de ferro-gusa. Isso se deve a maior taxa de redução direta no processo *All coke*. A redução direta ocorre com maior consumo específico de redutor, pois parte dele é usado para gerar calor devido à reação de Boudouard.

A oxidação do gás de topo é um indicativo do aumento na proporção de redução indireta. No gráfico da Figura 4b temos que o processo *All Coke* possui menor oxidação do gás de topo devido à maior quantidade de redução direta. Assim, quanto maior a extensão da reação de gaseificação maior a regeneração do gás e, conseqüentemente, menor será a oxidação do gás de topo.

O desvio de Rist e a Eficiência da cuba são calculados para cada dia do período escolhido e são apresentados na Figura 5a e 5b, respectivamente. Nelas ficam evidentes que o processo em que há uso de PCI a carga metálica é reduzida com mais eficiência na Zona de Preparação.

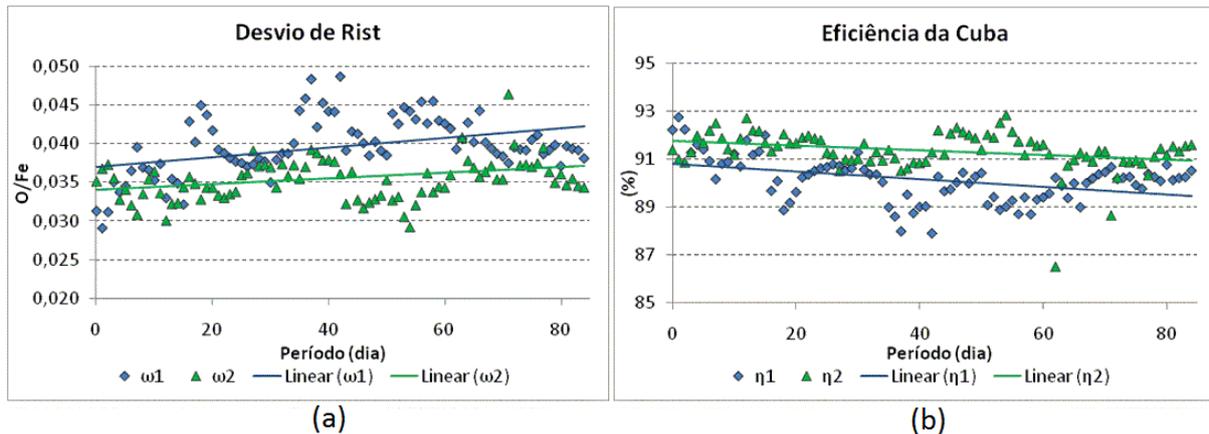


Figura 5. Desvio de Rist (a) e a Eficiência da Cuba (b) determinado pelo modelo.

A redução da eficiência de cuba do processo *All coke* indicado na Figura 5b é acompanhada pelo aumento da temperatura da Zona de Reserva Térmica do Alto-Forno. Esse aumento é apresentado no gráfico da Figura 6a pelos pontos T_1 e T_2 . Em resposta a esse aumento de temperatura há um aumento proporcional da quantidade de redução direta.

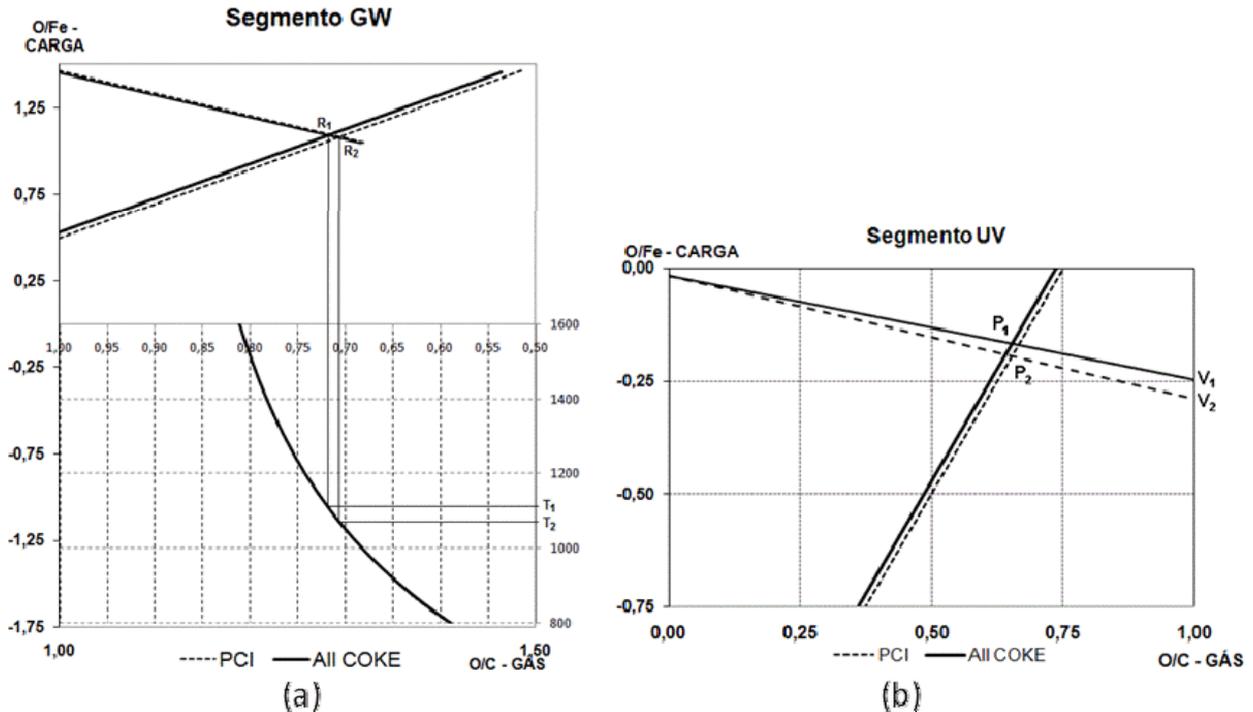


Figura 6. a) Desvio da idealidade e a temperatura da Zona de Reserva Térmica para as duas formas de operação; b) Segmento UV para as duas formas de operação.

A Figura 6b apresenta o balanço de energia da Zona de Elaboração em relação às suas necessidades térmicas. As variáveis estudadas foram o ponto P e o ponto V. O processo com uso de PCI necessita de uma maior quantidade de calor de sopro para a formação do gás redutor, pois a quantidade de calor de sopro é proporcional à eficiência da queima do PCI, por isso, V_2 é maior que V_1 . Isso é confirmado pela Tabela 1, pois a operação com uso de PCI apresenta um maior valor para o Enriquecimento de oxigênio e Temperatura de sopro e uma menor Umidade de sopro.

É esperado um aumento no teor de silício no ferro-gusa na operação com uso de PCI, pois houve um aumento na quantidade de calor fornecida para a Zona de Elaboração, mas de acordo com a Tabela 1 há uma redução no seu teor. Esse fato se deve a maior velocidade de produção nesse período. A produtividade é proporcional à velocidade de carregamento e quanto maior for essa frequência menor é o tempo para que haja incorporação do silício no ferro-gusa.

Em relação ao equilíbrio térmico das duas situações temos que a maior quantidade de calor fornecido na situação 2 é usada pelo processo de combustão do carvão pulverizado, V_2 é maior que V_1 . Em relação ao equilíbrio químico, a maior quantidade de gás redutor formado na Zona de Elaboração devido à injeção de PCI reduz a quantidade de redução direta, pois o CO que seria formado pela redução direta é fornecido pela combustão do PCI.

O deslocamento de P no segmento UV não é muito pronunciado, pois não há grande variação no valor de μ , ou seja, não houve variação no consumo específico de combustível, *Fuel rate*, Figura 7. Dessa forma, a substituição de uma fração de coque no *Fuel rate* do processo *All coke* não trouxe alterações significativas na quantidade de gás redutor.

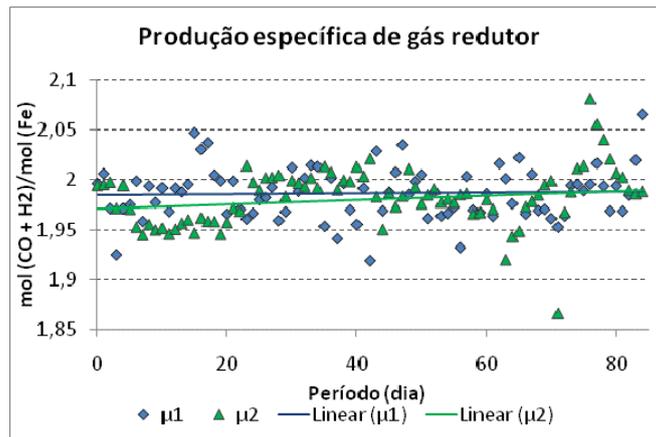


Figura 7. Produção específica de gás redutor para cada período.

5 CONCLUSÃO

Em condições operacionais estáveis do Alto-Forno 1 da ArcelorMittal Tubarão o diagrama de Rist mostrou de uma maneira simples a variação dos principais parâmetros operacionais quando houve uma alteração no processo de redução. E a variação desses parâmetros apresentou uma boa concordância com os dados reais do processo de redução.

O diagrama fez uso de parâmetros que são de grande importância para o processo de redução além de realizar correlações com índices que avaliam a qualidade operacional desse processo, como o consumo específico de combustível, volume e temperatura de sopro, e produtividade.

Os parâmetros usados (redução direta, eficiência da cuba, temperatura da Zona de Reserva Térmica e o balanço térmico da Zona de Elaboração) pelo diagrama de Rist são eficazes para avaliar o processo de redução em Altos-Fornos.

De acordo com o diagrama de Rist temos que o uso de PCI traz benefícios como: a redução da temperatura da Zona de Reserva Térmica, da porcentagem de redução direta, do consumo de *Coke rate* e promove um aumento da eficiência da cuba. Também, a injeção de carvão pulverizado não alterou a quantidade de CO do processo de redução.

A temperatura da Zona de Reserva Térmica do alto-forno está relacionada com a extensão da reação de redução direta e com o consumo de *Coke rate*. Quanto maior a quantidade de redução direta maior será a temperatura da Zona de Reserva Térmica que é proporcional ao consumo de *Coke rate*. Isso trás consequências como a redução da eficiência da cuba e da oxidação do gás de topo.

O menor grau de oxidação do gás de topo é consequência do aumento da proporção de redução direta em resposta ao aumento temperatura da Zona de Reserva Térmica. Assim, quanto maior a proporção de redução direta em relação à indireta, maior será a regeneração dos gases e menor a oxidação do gás de topo.

As medidas para aumentar a eficiência da combustão do PCI geram um aumento da quantidade de calor na Zona de Elaboração. Entretanto, esse aumento é compensado pela diminuição da quantidade de redução direta. Logo, o CO que seria gerado pela redução direta é formado pela combustão do PCI.

O diagrama de Rist, apesar de suas restrições, pode ser usado para avaliar o processo de redução, bem como entender e a relacionar os parâmetros operacionais, tais como: redução direta, consumo específico de coque, eficiência da cuba e o estudo do perfil térmico do alto-forno. Além disso, ele pode ser utilizado, através de uma interação com um especialista, para projeção de operação.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ifes, pelo apoio na execução deste trabalho.

A ArcelorMittal Tubarão pelo fornecimento dos dados industriais.

REFERÊNCIAS

- 1 DEFENDI, G. A.; FUJIHARA, F. K.; GUSHIKEN, J. I. ; SILVA, M. C. ; CUNHA, F. G. **Revisitando o diagrama de Rist**. XXXV Seminário de redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, ABM, Florianópolis, SC, 2005.
- 2 ARIYAMA, T.; MURAI, R.; ISHII, J.; SATO, M.; Reduction of CO₂ Emissions from Integrated Steel Works and Its Subjects for a Future Study. ISIJ International, Chiba, v. 45, n. 10, 2005, p. 1371–1378.
- 3 KASAI, A.; MATSUI, Y. Lowering of Thermal Reserve Zone Temperature in Blast Furnace by Adjoining Carbonaceous Material and Iron Ore. ISIJ, Kakogawa, v. 44, n. 12, 2004, p. 2073–2078.
- 4 RIST, A.; MEYSSON, N. A dual graphic representation of the blast furnace mass and heat balances. Journal of Metals, France. 1967.
- 5 GHOSH, A.; CHATERJEE, A. **Ironmaking and Steelmaking**: Theory and Practice. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2008.