

Impacto do gás natural no contexto de baixo carbono da siderurgia brasileira

Jean Philippe Santos Gherardi de Alencar ^{1*} 

Resumo

As mudanças climáticas têm sido debatidas de forma abrangente no mundo todo e isso tem colocado pressão na indústria siderúrgica. Muitas alternativas tecnológicas vêm sendo apresentadas e testadas a fim de se reduzir a emissão de gases de efeito estufa. Concomitante a isso, o Brasil vive uma expectativa de maiores investimentos na cadeia do gás natural, que podem aumentar a produção e reduzir os custos de maneira significativa. Este avaliou o impacto da utilização do Gás Natural na matriz siderúrgica tanto da rota Alto-Forno quanto da rota de Redução Direta, fazendo um comparativo econômico e ambiental entre diferentes casos. Notou-se que os artifícios de uso de gás natural e otimização da carga metálica auxiliam na redução das emissões. No cenário de preços avaliado, essas substituições também trouxeram redução no custo do aço. A rota de Redução Direta referência nas simulações apresentou um fator de emissão muito menor que a rota base Alto-Forno, porém seu custo de aço foi superior. Cenários em que o preço do gás natural alcance 2,5 \$/MMBTU ou exista uma compensação financeira para emissões de CO₂, a rota de Redução Direta pode ser economicamente tão competitiva quanto Alto-Forno no Brasil.

Palavras-chave: Siderurgia; Emissões; Gás natural; Simulação.

Natural gas impacts on the low carbon context of brazilian steelmaking industry

Abstract

Climate change has been widely discussed worldwide and this has put pressure on the steel industry. Many technologies have been developed in order to avoid greenhouse gases emissions. Concomitant to this, Brazil is expecting greater investments in the natural gas supply chain, which can increase production and significantly reduce costs. This work evaluated the impact of Natural Gas in the steelmaking matrix of both routes: Blast Furnace and Direct Reduction, raising an economic and environmental comparison between different cases. It was noted that aspects such as natural gas usage and metallic burden optimization help to reduce emissions. Based on the prices estimated, these substitutions also brought a reduction in the steel costs. The Direct Reduction route showed a much lower emission factor than the Blast Furnace reference route, but its cost was higher. Scenarios considering natural gas costs at 2.5 \$/MMBTU or financial compensations for CO₂ emissions, the Direct Reduction route can be economically as competitive as Blast Furnace in Brazil.

Keywords: Steelmaking, Emissions, Natural gas, Simulation.

1 Introdução

As mudanças climáticas têm sido alvo de muitas das principais discussões globais devido ao seu potencial risco frente a humanidade e o planeta Terra. A comunidade científica vem fazendo esforços cada vez mais aprofundados e de forma compartilhada a fim de engajar o máximo de países junto a essa causa [1]. Atualmente, a manifestação mais formal e significativa da sensibilização mundial é o Acordo de Paris, que tenta limitar o aumento de temperatura em até 2 °C acima dos níveis pré-industriais até 2100 [2].

179 países ratificaram o acordo em 2016 e a partir disso vem trabalhando em suas NDC's (*Nationally Determined Contribution*). O Brasil tem meta de chegar em 2025 com 37% menos emissões que em 2005 e, em seguida, alcançar 43% de redução comparado à mesma referência até 2030 [3]. Nesse contexto, algumas políticas e mecanismos vem sendo discutidos no Brasil como o combate ao desmatamento ilegal, taxaço de emissões e precificação do carbono [4,5]. O grupo do PMR (*Partnership Market Readiness*) brasileiro

¹Diretoria de Desenvolvimento de Negócios e Produto, VALE SA, Nova Lima, MG, Brasil.

*Autor correspondente: jeanpga@gmail.com



divulgou no fim de 2020 o fechamento do seu trabalho sugerindo ao governo brasileiro a criação de um mercado regulado de carbono nos próximos anos [6].

O motivo da importância desse assunto para a siderurgia como um todo é o fato de que a produção de aço representa 7% da emissão de CO₂ via combustíveis fósseis do mundo [7]. Dentre as principais rotas de produção de ferro primário: via AF (Alto-Forno) e RD (Redução Direta) existem diferenças relevantes de fatores de emissões e isso tem suscitado várias discussões sobre adaptações e inovações de rotas tecnológicas [8-15]. Grande parte dessas modificações de rota estão concentradas na etapa de redução do óxido de ferro, pois é nesta etapa em que se tem a maior intensidade de emissões. Na rota AF, por exemplo, estima-se que 70% das emissões ocorre especificamente no reator Alto-Forno.

Diante disso, um dos aspectos extremamente relevantes é o combustível que será o agente redutor das reações químicas para obtenção do ferro primário. O hidrogênio verde, cuja pegada de carbono seria próxima de zero, é uma das opções estudadas pelas indústrias. Contudo, os obstáculos de escala de produção e custos associados precisam ainda ser superados [16,17]. Outro tipo de combustível capaz de prover um ciclo de vida de carbono até positivo é o carvão vegetal. Seu uso na siderurgia brasileira é bastante comum e propício devido às extensas áreas disponíveis e clima favorável para plantações de árvores. Porém, há algumas barreiras que impedem sua alavancagem no setor, como as restrições técnicas de uso em AF de grande porte, bem como a falta de um ambiente de negócios favorável a produção de carvão vegetal, envolvendo crédito, certificações e controles, além de logística apropriada [18]. Por outro lado, o GN (Gás Natural), pouco usado na siderurgia brasileira atualmente devido aos custos, pode se tornar mais competitivo com a chegada de novos projetos e marcos. A Nova Lei do Gás (PL 4476/20) impactará o mercado de uma maneira positiva, uma vez que eliminará barreiras importantes do ponto de vista regulatório e técnico. Facilitar o acesso de terceiros às infraestruturas essenciais e incentivar a entrada de novos agentes no mercado fomentará o desenvolvimento de uma estrutura de distribuição e custos competitivos. Como boa parte desse volume de GN será demandado pela indústria, é de se esperar que a siderurgia nacional leve isso em consideração nas suas estratégias de médio e longo prazo [19,20].

Em relação as rotas predominantes de produção de ferro primário, a matéria-prima ferrosa e os agentes redutores

são os principais insumos do processo produtivo. Na rota RD, o GN é peça-chave, sendo ele o gás reformador que reestabelece o equilíbrio e quantidades necessárias de H₂ e CO para a redução.

O consumo de GN nessa rota é impactado pela qualidade da matéria-prima (potencial de metalização) e variáveis de processo, como capacidade dos reformadores. Por outro lado, na rota AF o consumo de GN pode ser feito como combustível auxiliar. Seu uso traz alguns benefícios como a redução do consumo total de combustíveis, redução do volume de escória e aumento de produtividade, tendo como contrapartida necessária o enriquecimento do oxigênio e/ou o pré-aquecimento do GN para manutenção da temperatura de chama [21,22]. Ainda assim, por conta dos aspectos endotérmicos do metano, é esperado que o limite de injeção de GN como combustível auxiliar no AF seja da ordem de até 150 kg/t metal líquido [23].

Assim sendo, este estudo visa avaliar por meio de simulações numéricas como o GN, insumo estratégico para a siderurgia, pode ser sensível para a competitividade das rotas RD e AF tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental no cenário futuro do Brasil.

2 Desenvolvimento

2.1 Metodologia

A estrutura do trabalho foi dividida em etapas de modo a possibilitar uma melhor organização dos dados e seleção dos casos simulados. O objetivo ao longo desse processo foi construir análises que estimassem variações de custos de produção de aço e emissões de CO₂ de diferentes cenários a fim de permitir comparações em contextos diversos. A Tabela 1 apresenta uma visão geral sobre as etapas consideradas.

A primeira etapa foi a definição dos casos de referência das rotas siderúrgicas. No caso da rota de Redução Direta tomou-se por base uma operação fictícia contemplando o uso de duas diferentes pelotas (A e B) no reator RD e com uma participação de 20% de sucata no FEA (Forno Elétrico a Arco). Já no caso da rota AF optou-se por trabalhar com uma carga metálica que estivesse dentro da faixa de padrão de consumo do mercado doméstico: 73% de sinter, 16% de

Tabela 1. Segmentação das etapas do estudo

Etapa	Descrição	Objetivo
1	Definição dos Casos Base	Estabelecer casos hipotéticos de referência para a rota AF e RD que serão base de comparação
2	Estimativa de Dados de Matéria-Prima e Custos	Consolidar todos os dados de qualidade de matéria-prima e perspectivas de custos de insumos e produção para simulação do custo relativo de aço
3	Geração de Casos Análises	Selecionar as variáveis a serem modificadas na simulação e seus respectivos níveis para a criação dos casos análises
4	Criação dos Gráficos de Sensibilidade	Alterar alguns parâmetros de preço a fim de se construir diferentes curvas que mostrassem a sensibilidade do mesmo à competitividade da produção do aço

Tabela 2. Composição químicas das matérias-primas do estudo

Matérias-primas	Fe Total	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Mn	P	TiO ₂	S	PPC	C	Si
Sinter Feed A	62,30	6,20	1,50	0,05	0,05	0,05	0,065	0,00	0,00	2,60	-	0,00
Pelota A	65,85	2,55	0,50	2,55	0,00	0,09	0,025	0,00	0,00	0,00	-	0,00
Granulado A	65,20	3,70	1,60	0,00	0,00	0,04	0,080	0,00	0,00	1,00	-	0,00
PRD A	67,20	1,95	0,55	1,00	0,07	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	-	0,00
PRD B	64,50	4,50	1,83	1,60	0,30	0,30	0,05	0,00	0,00	0,00	-	0,00
Finos de coque	0,90	5,60	3,70	0,40	0,10	0,00	0,040	0,15	0,05	-	88,62	0,00
Carvão de Injeção (CI)	0,30	3,54	2,41	1,20	0,05	0,02	0,007	0,10	0,22	-	92,00	0,00
Coque Metalúrgico	0,50	5,00	3,70	0,35	0,05	0,00	0,050	0,19	0,52	-	89,36	0,00
Cal Virgem	0,05	0,53	0,05	94,24	0,13	0,03	0,059	0,03	0,05	4,60	-	0,00
Magnesita	1,60	1,60	0,63	0,47	49,00	0,98	0,000	0,02	0,00	44,00	-	0,00
Calcário Calcítico	0,10	1,50	0,30	49,70	0,30	0,00	0,014	0,00	0,01	48,00	-	0,00
Dolomita	0,50	2,00	0,50	0,40	45,60	0,30	0,000	0,00	0,00	50,20	-	0,00
Quartzo	0,33	99,20	0,10	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	-	0,00
Gusa Sólido	94,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,080	0,00	0,03	0,00	4,50	0,40
Sucata Interna	99,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,40	0,020	0,00	0,02	0,00	0,08	0,02
Sucata de Resíduos	78,62	4,00	1,00	10,00	2,00	0,20	0,020	0,00	0,02	0,00	0,10	0,04
Sucata de Mercado	99,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,020	0,00	0,03	0,00	0,10	0,10

pelota e 11% de granulado. Adicionalmente, no reator LD foi estabelecido um valor por volta de 85% de gusa líquido para a produção de aço. A Tabela 2 apresenta a qualidade química geral dos principais insumos das simulações que foram feitas em ambas as rotas. A química do *Sinter Feed A* que foi utilizada não representa um valor de um minério específico, mas sim a química de um *blend* de minérios típicos que podem ser encontrados na região do Quadrilátero Ferrífero em MG. Já a Pelota A e Granulado A, também insumos das simulações da rota AF, se assemelham à química de produtos específicos que são fornecidos pela Vale a alguns clientes do Brasil.

Percebe-se que a qualidade da Pelota e do Granulado são superiores a qualidade do *Sinter Feed*. As pelotas PRD A e B também se diferem quanto à qualidade. Por um lado, a PRD A representa uma pelota do portfólio A direcionada para o mercado RD, por outro a PRD B representa uma qualidade inferior que pode ser encontrada no mercado RD da região do Oriente Médio e Norte da África. Com relação aos fundentes utilizados, procurou-se utilizar valores típicos de fornecedores nacionais. O Gás Natural não consta na Tabela, mas sua composição de hidrocarbonetos foi simplificada no modelo como 92% CH₄ e 8% C₂H₆. Os valores de qualidade dos metálicos foram tomados a partir de referências de mercado [24].

A etapa 3, por sua vez, consistiu em elencar quais seriam as variáveis alteradas nas simulações de Casos Análises. Na rota AF as variações realizadas foram a troca de combustíveis e a mudança na carga metálica do AF. A injeção de GN foi feita através da substituição parcial do carvão de injeção e do coque, enquanto a mudança da carga

Tabela 3. Preços das variáveis alteradas nas simulações

Insumo	Cenário BAU (1)	Cenário Alternativo (2)
Minério de Ferro 62% (\$/t)	98 [27]	127
Prêmio Pelota PAF (\$/t)	35 [28]	45
Prêmio Pelota PRD (\$/t)	46 [28]	60
Gás Natural (\$/MMBtu)	8 [26]	10
Energia Elétrica (\$/kWh)	0,06 [29]	0,08
Sucata Mista (\$/t)	350 [30]	455

Obs: Os valores por tonelada são em base seca.

metálica foi feita pela adição de pelotas em detrimento de Granulado e Sinter. Por outro lado, na rota RD a modificação se deu pela substituição da pelota B pela A e pela alteração da partição de sucata e DRI (*Direct Reduced Iron*) dentro do FEA.

Por fim, na etapa 4 utilizou-se alguns custos de insumos projetados e estimados para avaliar como ficaria a atratividade dos respectivos casos análises, tanto na perspectiva do custo quanto das emissões. O GN, por exemplo, estima-se que tenha um preço atualmente na ordem de 12 \$/MMBtu [25] ao passo que sua expectativa futura seja atingir o patamar entre 7,30 a 8,10 \$/MMBtu [26]. Nesse sentido, foram construídos dois patamares de cenário de preços de insumos levando-se em conta um horizonte de tempo de curto/médio prazo, que podem ser vistos na Tabela 3.

Um representa a expectativa de *business as usual* (BAU) e outro que representa um cenário fictício de custos mais elevados, aproximadamente 30% superiores ao cenário BAU. Estes cenários de preços foram construídos dessa

maneira a fim de gerar uma sensibilidade nesse tocante na análise final. Os demais elementos consumíveis nos processos bem como outros custos e despesas não foram detalhados, uma vez que o propósito final será comparar o custo de aço relativamente entre os casos análises e o caso base.

As simulações numéricas para representar a produção de aço e seus respectivos parâmetros de entrada e saída foram feitas através do software Modelo Siderúrgico (MSid), de propriedade da Vale. O modelo consiste em equações cuja função objetivo utilizada foi de minimizar o volume de escória do processo. Fazem parte deste modelo as equações de balanço de massa pertinentes aos processos, balanços térmicos e algumas relações empíricas.

2.2 Resultados e discussão

2.2.1 Resultados da Rota Alto-Forno

A Tabela 4 foi criada a fim de consolidar os principais parâmetros técnicos das simulações da rota AF. Os parâmetros apresentados foram agrupados por reator/processo. O cabeçalho das colunas traz os nomes de cada caso, os quais remetem às alterações que foram feitas em

cada ocasião. Os Casos Análise 1 e 2 representam o cenário de substituição de carga ferrosa. No caso 1 elevou-se o consumo de pelotas em substituição ao granulado e no caso 2 houve substituição de granulado + 9% de sínter. Do caso análise 3 ao 7, foram simulados diferentes níveis de injeção de gás natural substituindo outros combustíveis, tanto o carvão de injeção quanto o coque. Para cada um desses casos simulados foi necessário flexibilizar algum tipo de dado de entrada. Contudo, os dados de saída da simulação sempre se mantiveram constantes. A química da escória do AF era visada em 37% SiO₂, 13% Al₂O₃, 5% MgO, enquanto a escória da aciaria era fixada em CaO/SiO₂ igual a 4, MgO igual a 9% e FeO em 24%.

Nota-se que as primeiras substituições de carga, focada em maior consumo de pelotas, trouxeram benefícios no volume de escória do AF. Como o modelo não abrange os aspectos fluidodinâmicos e metalúrgicos, o ganho da substituição da pelota pelo granulado não foi tão contundente, uma vez que a qualidade química geral do granulado estava relativamente próxima à da pelota. Ao substituir o sínter, a redução de escória no AF e coque rate foram mais expressivas. Já no caso 3 ao caso 7, as injeções de gás natural corresponderam a menores taxas de consumo de CI e coque, além de reflexos

Tabela 4. Parâmetros e componentes das simulações na rota AF

Parâmetros	Unidade	Caso Base	Caso 1 +11% Pelota	Caso 2 +20% Pelota	Caso 3 + 25Nm ³ de GN vs CI	Caso 4 + 75Nm ³ de GN vs CI	Caso 5 + 25Nm ³ GN vs Coque	Caso 6 + 75Nm ³ GN vs Coque	Caso 7 + 126Nm ³ GN vs Coque e CI
Sinterização									
Sinter Feed A	(%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Fe Total	(%)	55,97	56,19	56,13	56,03	56,03	56,03	56,03	56,2
SiO ₂	(%)	6,14	6,15	6,15	6,14	6,14	6,14	6,14	6,15
MgO	(%)	1,28	1,27	1,34	1,26	1,26	1,26	1,26	1,23
Al ₂ O ₃	(%)	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59
P	(%)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Basicidade		1,7	1,65	1,65	1,69	1,69	1,69	1,69	1,65
Alto-Forno									
Sínter	(%)	73	73	64	73	73	73	73	73
Pelota A	(%)	16	27	36	16	16	16	16	16
Granulado A	(%)	11	0	0	11	11	11	11	11
Gás Natural	(kg/t gusa)	0	0	0	19,08	57,28	19,09	57,28	95,03
Fundentes	(kg/t gusa)	12,09	13,17	10,37	11,85	12,63	12,04	13,31	11,67
Carvão de Injeção	(kg/t gusa)	150	150	150	116	48	150	150	65,2
Coque	(kg/t gusa)	357	356,36	351,32	356,16	355,29	328,57	272,55	284,33
Slag rate	(kg/t gusa)	306,15	302,94	277,76	301,95	297,61	302,01	297,9	287,81
Aciaria									
Gusa Líquido	(%)	85,79	85,79	85,79	85,79	85,79	85,79	85,79	85,79
Gusa Sólido	(%)	2	2	2	2	2	2	2	2
Sucata Interna	(%)	7	7	7	7	7	7	7	7
Sucata de Resíduos	(%)	2	2	2	2	2	2	2	2
Sucata de Mercado	(%)	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21	3,21
Fundentes	(kg/t aço)	44,17	45,08	45,75	44,23	44,33	44,36	44,7	44,73
Oxigênio	(Nm ³)	50,07	50,13	50,17	50,08	50,08	50,08	50,1	50,1
Slag Rate	(kg/t aço)	75,15	76,19	76,94	75,2	75,28	75,34	75,69	75,72

no volume de escória, uma vez que nos outros combustíveis existem teores de cinza e no GN não. O fator de conversão utilizado dentro do modelo levou em conta o poder calorífico dos redutores e foi de 0,56 kg de CI para cada kg de GN e 0,67 kg de coque para cada 1 kg de GN injetado. Há de ressaltar ainda que com a injeção de GN e menor carga de coque, haverá mudanças na relação coque/minério do forno de modo que sua produtividade será maior nesses casos.

A Figura 1 mostra a intensidade de emissão de cada um dos casos simulados na rota AF. O caso base teve uma emissão de 2,13 t CO₂ para cada tonelada de aço e este valor está em linha com a ordem de grandeza esperada para uma rota alto-forno e aciaria à oxigênio [8]. Nos casos análises todas as emissões encontradas foram inferiores àquela do caso base e isso confirma o potencial que os artifícios testados têm para prover redução de CO₂.

Nota-se que no caso em que a pelota substituiu o granulado e o sinter alcançando o nível de 36% da carga, a redução de emissões foi similar à provocada pela injeção de 25 Nm³ de GN. Por outro lado, nos casos de injeção de

GN em níveis de 75 Nm³ e 126 Nm³ as reduções foram da ordem de, respectivamente, 7 e 13%. Tal conjectura aponta que, numa eventual combinação de otimização de carga metálica e injeção de GN o patamar de redução de CO₂ poderia atingir algo em torno de 20%. Para reduções mais drásticas nessa rota, algumas alternativas poderiam ser exploradas como maior uso de sucata no forno LD, uso de pré-metalizado no AF, biomassa, além de mecanismos de CCU (*Carbon Capture and Usage*) como o TGRBF (*Top Gas Recycle Blast Furnace*).

No que diz respeito ao custo de produção de aço, pode-se observar na Figura 2 que os casos análises, além de promover a redução das emissões também promove redução de custo. A diferença entre os preços dos cenários 1 e 2 não trouxe grandes impactos, mas no cenário 2 foi possível notar uma favorabilidade ao maior uso de pelotas em substituição ao sinter e, devido ao maior preço de gás no cenário 2, a redução de custo proveniente dele em substituição ao coque e CI foi menor que o apontado nos casos do cenário 1 de BAU.

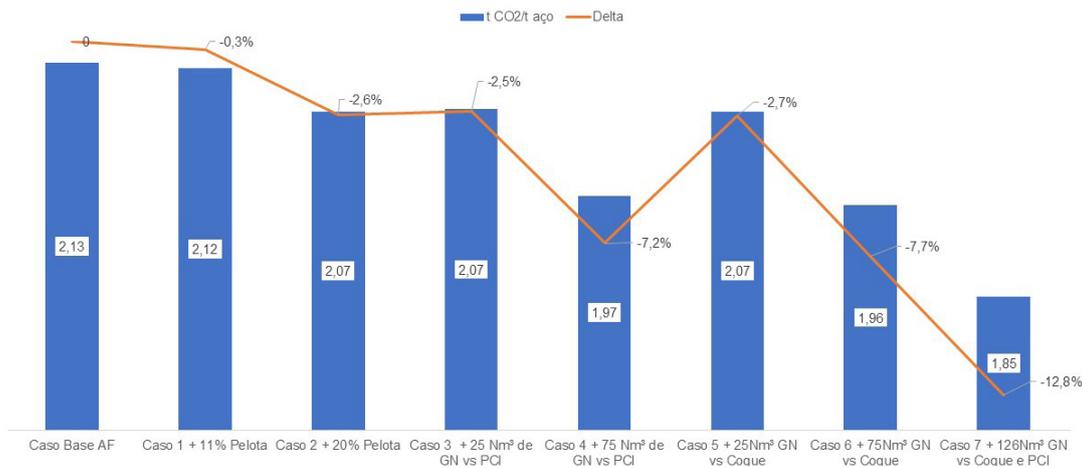


Figura 1. Intensidade de emissão da rota AF/BOF para os casos simulados.

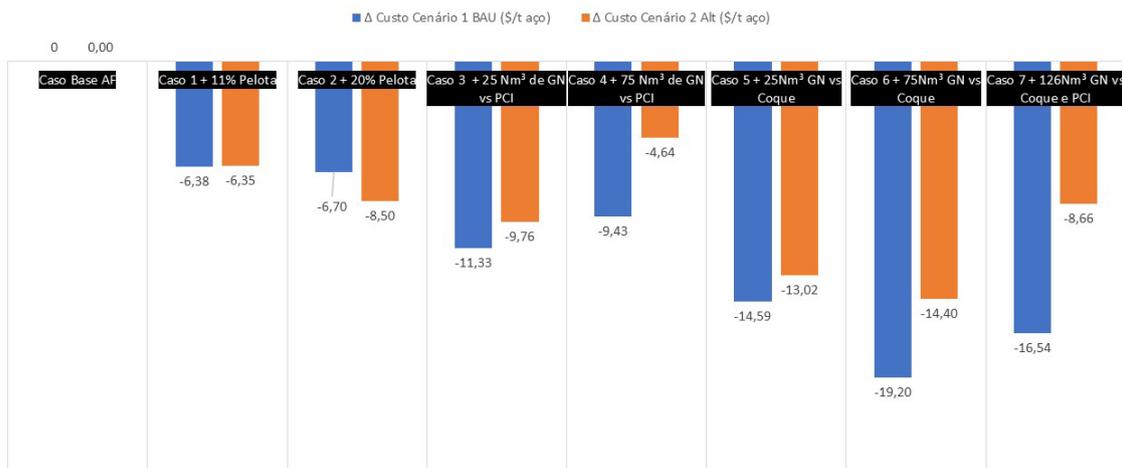


Figura 2. Custo de aço relativo para os casos da rota AF/LD.

2.2.2 Resultados da Rota Redução Direta

De modo análogo aos resultados da rota AF, a Tabela 5 apresenta os principais componentes e respostas das simulações feitas no MSid para a rota RD.

Inicialmente, há de se ressaltar que todos os casos análise foram feitos com as mesmas condições de contorno do caso base. No reator RD, a metalização alvo do DRI foi de 94% e a carburação foi de 2,5%. Tal meta à luz da diferença de potencial de metalização entre as duas pelotas, resultou nas discretas diferenças de consumo de gás que podem ser vistas na tabela 5. Ainda em função das diferenças entre as pelotas PRD A e B, constata-se uma distinção importante da quantidade de ganga no DRI resultante. Essa qualidade do DRI, por conseguinte, impele alterações no consumo de energia elétrica dentro do forno elétrico e na quantidade de escória. Por fim, o tempo de ciclo também é impactado. Quanto maior a quantidade de ganga no DRI maior será a demanda energética para fusão do mesmo [31,32]. Acompanhando o consumo de energia elétrica encontra-se também os consumos de outros insumos como eletrodos e refratários. O impacto do uso da sucata, cujo teor de ferro é muito elevado, reflete numa redução drástica de escória, concomitante a um menor consumo de energia elétrica e menor *tap-to-tap* [32].

A Figura 3 apresenta os valores de emissões de CO₂ por tonelada de aço para cada um dos casos simulados. Observa-se que a emissão de CO₂ obtida no caso base foi de 0,59 tCO₂/t aço e este valor está em linha, porém é menor do que o que é encontrado em outros estudos que caracterizaram

o processo RD/FEA [32,33]. Tal condição se deve ao fato de que o grid de emissões da matriz energética brasileira é razoavelmente menor quando se comparado com outras matrizes onde a rota RD é comum.

O fator de tCO₂/MWh utilizado neste estudo foi de 0,0617 [34]. Constata-se pela análise do gráfico da Figura 3 que há um impacto positivo na utilização de carga de melhor qualidade (100% PRD A) no reator RD em termos de emissões. Em valores, a diferença é pequena porque a proporção de pelota substituída (20%) também era um patamar baixo. A medida em que houvesse maior quantidade de PRD B no caso base e/ou maior consumo de DRI como carga no FEA haveria, conseqüentemente, um maior impacto relativo à otimização da carga ferrosa no reator RD. Percebe-se ainda que o efeito de maior utilização de sucata no FEA tem maior potencial de redução de emissões atingindo níveis de redução próximos de 25 e 50% quando da utilização de 40 e 60% de sucata no FEA, respectivamente. Contudo, não foi alvo desse trabalho analisar as possíveis dificuldades técnico-operacionais do uso de maior sucata na carga como: menor densidade de carregamento do forno, aumento do *tap-off*, formação de espuma na escória e elementos contaminantes no aço [35,36].

Quanto ao contexto econômico, a Figura 4 apresenta as diferenças entre os custos de produção de aço de cada um dos casos, tendo como base o caso com 80% da PRD A na carga e 20% de sucata no FEA. Observa-se primeiramente que a utilização de uma pelota de melhor qualidade química implica numa redução do custo do aço. Essa redução do custo em função da pelota fica maior no cenário de preços alternativos (30% de majoração). Outro aspecto notório é

Tabela 5. Parâmetros e componentes das simulações na rota RD

Parâmetros	Unidade	Caso Base RD	Caso 1 - 40% Sucata	Caso 2 - 60% Sucata	Caso 3 - 100% DRPA	Caso 4 - 100% DRP A - 40% Sucata	Caso 5 - 100% DRP A - 60% Sucata
Redução Direta							
DRP A	(%)	80	80	80	100	100	100
DRP B	(%)	20	20	20	0	0	0
Grau de Metalização da Carga	(%)	93,6	93,6	93,6	94,0	94,0	94,0
Gás Natural	(Gcal/t DRI)	2,58	2,58	2,58	2,57	2,57	2,57
Fe Total	(%)	89,56	89,56	89,56	90,84	90,84	90,84
SiO ₂	(%)	3,31	3,31	3,31	2,64	2,64	2,64
Al ₂ O ₃	(%)	1,08	1,08	1,08	0,74	0,74	0,74
P ₂ O ₅	(%)	0,105	0,105	0,105	0,093	0,093	0,093
Reator FEA							
Pré-reduzido	(%)	80	60	40	80	60	40
Sucata	(%)	20	40	60	20	40	60
Fundentes	(kg/t aço)	70,04	61,58	53,51	55,25	50,81	46,53
Ligas	(kg/t aço)	8,01	8,03	8,05	8,23	8,19	8,16
Oxigênio	(Nm ³ /t aço)	22,92	18,44	14,18	20,89	17,01	13,28
Energia Elétrica	(kWh/t aço)	660,07	632,91	606,99	639,95	618,46	597,76
Eletrodos	(kg/t aço)	2,97	2,85	2,73	2,88	2,78	2,69
Refratários	(kg/t aço)	13,20	12,66	12,14	12,80	12,37	11,96
<i>Slag Rate</i>	(kg/t aço)	181,44	155,30	130,34	143,93	128,04	112,72
Tap-to-tap	(min)	100,9	97,0	93,3	98,0	94,9	91,9

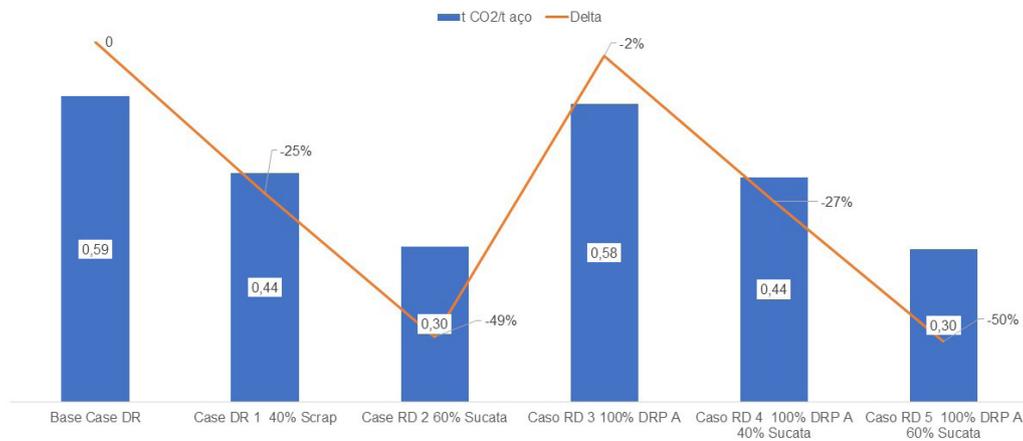


Figura 3. Fator de emissão da rota RD/FEA para os casos simulados.

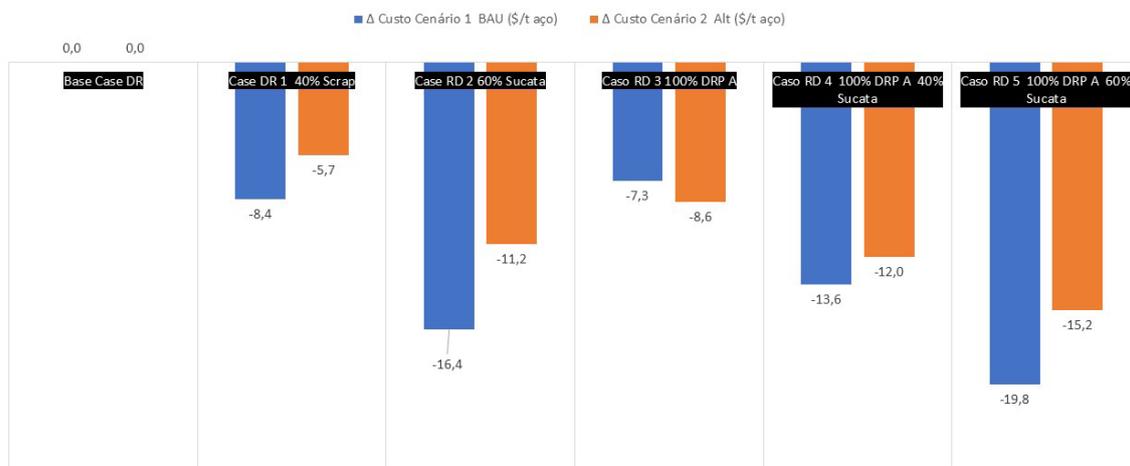


Figura 4. Custo de aço relativo para os casos da rota RD/FEA.

que para um mesmo tipo de carga no forno RD, o maior uso de sucata auxiliou na redução de custo do aço. No cenário 2, a conjectura de acréscimo de preço de GN, energia elétrica, sucata e índice de minério, acabou diminuindo a vantagem competitiva da sucata em relação ao DRI, porém ainda manteve o impacto de reduzir o custo de aço.

2.2.3 Comparativo de equilíbrio rota Alto-Forno vs Redução Direta

Dentro do contexto dessas simulações, apesar do foco das análises ser a modificação dos parâmetros dentro de cada rota, é possível e interessante fazer uma comparação entre as rotas. Atualmente no Brasil não há nenhuma planta de RD rodando e o motivo principal para isso é a baixa disponibilidade e alto preço do GN. Contudo, ainda se comparando o custo de produção de aço com o preço futuro de GN da ordem de 8 \$/MMBTU, tem-se que o custo de operação (OPEX) envolvido na rota RD ainda seria superior ao custo da operação típica da rota AF no mercado interno.

Na Figura 5 é demonstrado um diagrama que sinaliza as combinações em cor verde que, se ocorrerem, poderiam tornar a rota de RD tão competitiva quanto o cenário de rota AF comentado como caso base nesse estudo.

Constata-se que, assumindo que haja um custo de GN mais competitivo e/ou compensações financeiras para as reduções de emissões de CO₂ no Brasil, há condição da rota RD atingir níveis de OPEX compatíveis aos da rota AF típica. Com o GN ao preço de 2,5 \$/MMBTU ainda que não exista compensação de CO₂, a rota de RD fica viável. Por outro lado, um GN a 5 \$/MMBTU precisaria de um complemento de crédito de carbono de 17 \$, ao passo que, com o custo de GN a 8 \$/MMBTU a contrapartida de CO₂ deveria ser de 35 \$/tCO₂. Tal captação de créditos de carbono poderia ocorrer de duas formas: ou pela introdução de um mercado regulado de carbono nacional ou pela comercialização de créditos de carbonos internacionais a partir da exploração do artigo 6º do Acordo de Paris [37], fazendo assim com que os custos e investimentos em rotas como a RD sejam fomentados em larga escala.

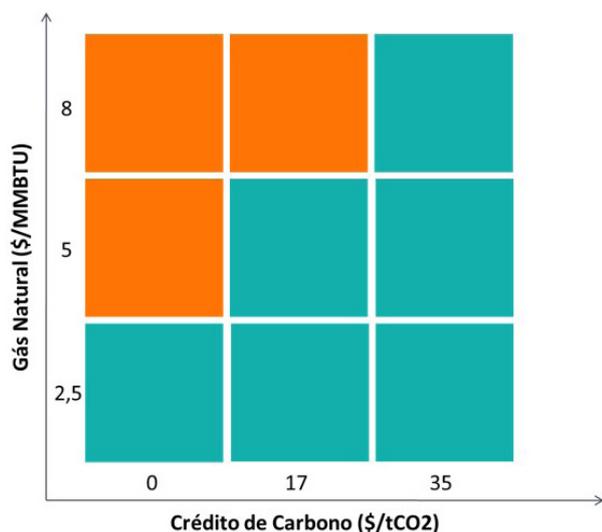


Figura 5. Panorama e condições de equilíbrio de custo de produção de aço nas rotas AF e RD.

3 Conclusão

O contexto de mudanças climáticas bem como a busca incessante por maior eficiência operacional e redução de custos de produção faz com que a cadeia minero-metalúrgica tenha que se atualizar e encontrar novas alternativas. Tais alternativas podem se tornar viáveis em diferentes cenários

de tempo e pôde ser visto por este trabalho que o impacto destas alternativas são específicos e distintos entre si.

Em relação a rota AF foi percebido que o uso de gás natural em substituição de carvão de injeção e coque metalúrgico trouxe ganhos de reduções de CO₂ e de redução de custo de aço nas circunstâncias avaliadas. Em níveis de 126 Nm³/t metal líquido de injeção a redução de gás carbônico alcançou níveis da ordem de 12,8%. Há de se destacar ainda que nesse cenário de injeção ainda haveria ganhos de produtividade que não foram considerados neste estudo em questão. Outra alavanca de eficiência na rota AF é a otimização da carga metálica utilizando mais pelotas no forno.

Na rota RD foi observado que a utilização de pelotas de melhor qualidade no reator RD culminou em menor custo de produção de aço. A sucata além de ter contribuído fortemente para a redução de emissões também resultou em menores custos de produção. Contudo, sabe-se que os preços de sucata são voláteis e seu uso em proporções muito elevadas pode não ser viável do ponto de vista técnico.

A competitividade relativa entre as rotas AF e RD está diretamente ligada aos preços dos seus principais insumos: matéria-prima e agentes redutores. Nos cenários de preços avaliado como *business as usual* a rota AF usada como caso base nas simulações tem custo de produção de aço menor que a rota RD referência que foi simulada. Todavia, algumas mudanças como menor preço de GN e compensações financeiras para menores emissões de CO₂ podem colocar a rota RD/FEA em condições similares de custo de operação da rota AF/LD.

Referências

- O'Neill BC, Carter TR, Ebi K, Harrison PA, Kemp-Benedict E, Kok K, et al. Achievements and needs for the climate change scenario framework. *Nature Climate Change*. 2020;10:1074-1084.
- United Nations. Climate Change. The Paris Agreement [Internet]. 2017 [acesso em 20 maio 2020]. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- La Rovere EL. The potential contribution of emerging economies to stop dangerous climate change. The case of Brazil. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. 2020;11(1):e614.
- International Carbon Action Partnership. ETS Map [Internet]. 2019 [acesso em 20 maio 2020]. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets-map?etsid=79>.
- Confederação Nacional da Indústria. A precificação de carbono e os impactos na competitividade da cadeia de valor da indústria. Brasília – CNI; 2020. 41 p.
- FGV. Seminário final PMR Brasil: Contribuições para uma proposta de precificação de carbono no País [Internet]. 2020 [acesso em 20 dez. 2020]. Disponível em: <https://portal.fgv.br/webinar-seminario-final-pmr-brasil-contribuicoes-proposta-precificacao-carbono-pais>.
- World Steel Association. Steel's Contribution To A Low Carbon Future And Climate Resilient Societies [Internet]. 2018 [acesso em 20 maio 2020]. Disponível em: https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:7ec64bc1-c51c-439b-84b8-94496686b8c6/Position_paper_climate_2020_vfinal.pdf.
- Conejo AN, Birat JP, Dutta A. A review of the current environmental challenges of the steel industry and its value chain. *Journal of Environmental Management*. 2020;259:1-9.
- Voestalpine Group. 2019 Environmental Statement [Internet]. 2019 [acesso 20 maio 2020]. Disponível em: <https://www.voestalpine.com/group/static/sites/group/.downloads/en/group/2019-environmental-statement.pdf>.
- Sormann A, Seftejani MN, Schenk J, Spreitzer D. Hydrogen-the way to a carbon free steelmaking. *AdMet*; 2018.
- Smil V. Still the iron age: iron and steel in the modern world. Butterworth-Heinemann. 2016.

- 12 Arens M, Worrell E, Eichhammer W, Hasanbeigi A, Zhang Q. Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term- the case of Germany. *Journal of Cleaner Production*. 2017;163:84-98.
- 13 Hille V, Redenius A. SALCOS–schrittweise, flexible Dekarbonisierung auf basis bewährter Technologie. *Stahl und Eisen*. 2018;138(11):95-101.
- 14 Dorndorf M, Duarte P, Argenta P, Maggiolino S, Marcozzi M. Transforming the steelmaking process. *Steel Times International*. 2018;42(7):29-32.
- 15 Warner NA. Zero CO₂ steelmaking in a future low carbon economy. 1. Energy conservation in smelting hematite ore directly to refined iron slab. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018;127(2):73-83.
- 16 César A, Veras TS, Mozer TS, Santos DCRM, Conejero MA. Hydrogen productive chain in Brazil: An analysis of the competitiveness' drivers. *Journal of Cleaner Production*. 2019;207:751-763.
- 17 Hydrogen Council. Path to hydrogen competitiveness [Internet]. 2020 [acesso em 20 maio 2020]. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf.
- 18 Pinto RGD, Szklo AS, Rathmann R. CO₂ emissions mitigation strategy in the Brazilian iron and steel sector–From structural to intensity effects. *Energy Policy*. 2018;114:380-393.
- 19 CNI. Uma análise da nova lei do gás à luz do interesse público. Confederação Nacional da Indústria. Brasília: CNI; 2020. 72 p.
- 20 Santos EM, Peyrel D, Netto ALA. Oportunidades e desafios do gás natural e do gás natural liquefeito no Brasil [recurso eletrônico]. 1. ed. Rio de Janeiro: Letra Capital; 2020.
- 21 Castro LFA, Tavares RP, Morelato AP. Injeção de carvão pulverizado nas ventaneiras do alto-forno. Belo Horizonte: Convênio entre USIMINAS e Fundação Christiano Ottoni, Demet, UFMG; 1997. 173 p.
- 22 Okosun T, Nielson S, D'Alessio J, Ray S, Street S, Zhou C. On the impacts of pre-heated natural gas injection in blast furnaces. *Processes*. 2020; 8(7):771.
- 23 Jampani M, Gibson J, Pistorius PC. Increased use of natural gas in blast furnace ironmaking: mass and energy balance calculations. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2019;50(3):1290-1299.
- 24 S&P Global. Preços do aço Platts SBB. Brasil – Doméstico [Internet]. 2021 [acesso em 19 jan. 2021]. Disponível em: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/commodities/metals>.
- 25 Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres. Os impactos dos preços da energia elétrica e do gás natural no crescimento e desenvolvimento econômico. Estudo realizado em parceria com Ex Ante Consultoria Econômica. Brasília: ABRACE; 2019.
- 26 Gomes I. Novo mercado e impactos no preço do gás natural. FGV ENERGIA Caderno Opinião [Internet]. 2019 [acesso em 19 jan. 2021]. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opiniao_-_novos_mercados_-_ieda_gomes_0.pdf.
- 27 World Bank Group. Commodity Markets Outlook [Internet]. 2020 [acesso em 19 jan. 2021]. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/34621/CMO-October-2020.pdf>.
- 28 S&P Global. Platts Steel Data and Analysis [Internet]. 2021 [acesso em 19 jan. 2021]. Disponível em: <https://www.spglobal.com/platts/en/products-services/metals/steel-data-and-analysis>.
- 29 CRU. Cost Analysis Tool [Internet]. 2020 [acesso em 20 maio 2020]. Disponível em: <https://www.crugroup.com/analysis/cost-analysis-tool/>.
- 30 Cárdenas JGG, Conejo NA, Gnechi GG. Optimization of energy consumption in electric furnaces operated with 100% DRI. *Metal*. 2007;2007:1-7.
- 31 Kirschen M, Badr K, Pfeifer H. Influence of direct reduced iron on the energy balance of the electric arc furnace in steel industry. *Energy*. 2011;36(10):6146-6155.
- 32 Pauluzzi D, Martinis A. Sustainable decrease of CO₂ emissions in the steelmaking industry by means of the energiron direct reduction technology. *AISTech*. 2018:1-7.
- 33 Rammer B, Millner R, Boehm C. Comparing the CO₂ emissions of different steelmaking routes. *BHM. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*. 2017;162(1):7-13.
- 34 Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Fator médio – Inventários Corporativos [Internet]. 2021 [acesso em 09 fev. 2021]. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html.

- 35 Ohno H, Matsubae K, Nakajima K, Kondo Y, Nakamura S, Fukushima Y, Nagasaka T. Optimal recycling of steel scrap and alloying elements: input-output based linear programming method with its application to end-of-life vehicles in Japan. *Environmental Science & Technology*. 2017;51(22):13086-13094.
- 36 Haupt M, Vadenbo C, Zeltner C, Hellweg S. Influence of input-scrap quality on the environmental impact of secondary steel production. *Journal of Industrial Ecology*. 2017;21(2):391-401.
- 37 CEBDS. Posicionamento Empresarial sobre o Artigo 6 do Acordo de Paris [Internet]. 2020 [acesso em 19 jan. 2021]. Disponível em: <https://cebds.org/publicacoes/posicionamento-empresarial-sobre-o-artigo-6-do-acordo-de-paris/#.YBgzg-hKjIV/>.

Recebido em: 15 Dez. 2022

Aceito em: 15 Maio 2024