



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“ANÁLISE DO IMPACTO DAS PARADAS DA PLANTA DE PCI NOS
PARÂMETROS OPERACIONAIS DO ALTO-FORNO”**

Yara Aparecida Santiago Queiroz

Ouro Preto, outubro de 2024

Yara Aparecida Santiago Queiroz

**“Análise do impacto das paradas da planta de PCI nos parâmetros operacionais do
Alto-Forno”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Johne Jesus Mol Peixoto

Coorientador: Pedro Tomaz de Aquino

Ouro Preto, outubro de 2024.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Yara Aparecida Santiago Queiroz

Análise do impacto das paradas da planta de PCI nos parâmetros operacionais do Alto-Forno

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 18 de outubro de 2024

Membros da banca

Prof. DSc Johne Jesus Mol Peixoto - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. DSc. Cláudio Batista Vieira - Membro (Universidade Federal de Ouro Preto)

Prof. MSc. Heric Henrique Souza e Silva - Membro (Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Branco)

Johne Jesus Mol Peixoto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/05/2025



Documento assinado eletronicamente por **Johne Jesus Mol Peixoto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2025, às 16:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0904199** e o código CRC **A7A7FF55**.

RESUMO

Em 2022, a produção de 1.855.026 toneladas de aço destacou a versatilidade dessa commodity na economia mundial. Com os avanços tecnológicos na siderurgia, tornou-se viável e eficaz a injeção de combustíveis auxiliares nos altos-fornos, resultando em uma redução significativa nos custos de produção do ferro-gusa e, conseqüentemente, do aço, além de uma diminuição nas emissões de gases de efeito estufa gerados no processo de produção do coque. A utilização de injeção de carvão pulverizado reduz os custos de produção, porém altera os parâmetros operacionais do alto-forno. Este trabalho analisou os dados de novembro de 2022 a abril de 2023 de um alto-forno a coque com injeção de carvão mineral pelas ventaneiras. Paradas longas da planta de injeção, levam a operação do forno *all coke* (somente coque). Foi identificado que a ausência de injeção influencia diretamente nos parâmetros operacionais, exigindo a implementação de ações para mitigar as falhas da planta de moagem de carvão para injeção. Uma manutenção preventiva mensal foi iniciada em fevereiro de 2023, com o objetivo de eliminar ocorrências de operação *all coke*. No mês seguinte ao seu início, já foi observada uma redução nas operações *all coke* (somente coque).

Palavras-chave: Alto-forno; ferro-gusa; injeção; carvão pulverizado; PCI.

ABSTRACT

In 2022, the production of 1,855,026 tons of steel highlighted the versatility of this commodity in the world economy. With technological advances in the steel industry, the injection of auxiliary fuels into blast furnaces became feasible and effective, resulting in a significant reduction in production costs of pig iron and, consequently, steel, in addition to a decrease in greenhouse gas emissions generated in the coke production process. The use of pulverized coal injection reduces production costs, but changes the operational parameters of the blast furnace. This work analyzed the data from November 2022 to April 2023 of a coke blast furnace with mineral coal injection through the windows. Long stops of the injection plant, lead to the operation of the all coke oven (coke only). It was identified that the absence of injection directly influences operational parameters, requiring the implementation of actions to mitigate the failures of the coal milling plant for injection. A monthly preventive maintenance was started in February 2023, with the aim of eliminating occurrences of all-coke operation. In the month following its start, a reduction in all coke operations (coke only) has already been observed.

Keywords: Blast furnace; cast iron; injection; pulverized coal; PCI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Processo em contracorrente	11
Figura 3.2- Funcionamento do Alto-Forno	12
Figura 3.3- Zonas internas Alto-Forno.....	13
Figura 3.4- Reações de redução do minério de ferro	14
Figura 3.5- Injeção de carvão	17
Figura 3.6- Fluxograma típico de uma planta de PCI para Altos-Fornos.	19
Figura 3.7- Injeção no alto-forno	20
Figura 5.1- Causas parada do PCI.....	25
Figura 5.2- Ocorrências <i>all coke</i> relativo a 6 meses de operação	26
Figura 5.3- Variação diária da temperatura de chama e temperatura de sopro no alto forno ..	28
Figura 5.4- Temperatura registrada no topo do alto forno	28
Figura 5.5- Oscilação dos gases responsáveis pela redução do minério: Co e Co ₂	29
Figura 5.6- Gases medidos a partir do topo do reator: H ₂ e N ₂	30
Figura 5.7- Variação da permeabilidade média em diferentes pontos do reator.....	30
Figura 5.8- Correlação entre a variabilidade na vazão de oxigênio e o enriquecimento de oxigênio.....	31
Figura 5.9- Acompanhamento da produtividade do alto forno considerando a média diária ..	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Taxa de substituição de coque.....	16
Tabela 5.1 – Motivos forno <i>all coke</i>	27

LISTA DE SIGLAS

PCI Carvão pulverizado não coqueificável

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS.....	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Alto-Forno.....	11
3.1.1	Zonas do Alto-Forno	12
3.1.2	Redução do minério de ferro	13
3.1.3	Funções do Coque no Alto-Forno	14
3.2	Injeção de carvão pulverizado	15
3.2.1	Planta de Moagem (PCI)	18
3.3	Efeitos da injeção de carvão nos parâmetros operacionais	20
4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	24
5	RESULTADOS E DISCURSSÃO.....	25
5.1	Identificação das Paradas na Planta de PCI	27
5.2	Comportamento dos parâmetros operacionais do Alto-Forno	27
6	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

O aço é uma das commodities mais importantes na economia mundial, visto seu amplo potencial de aplicabilidade. Segundo a *World Steel Association*, no ano de 2022 foram produzidas 1.855.026 toneladas de aço bruto no mundo. Os altos-fornos entram em cena como o primeiro estágio da fabricação do aço, produzindo ferro gusa, obtido a partir da redução do minério de ferro na forma de sinter, minério granulado ou pelota, juntamente com o coque metalúrgico (resultado da coqueificação do carvão mineral), combustíveis auxiliares e fundentes (sílica, cal ou substâncias semelhantes). O sistema funciona em contra corrente, enquanto o gás redutor resultante da combustão sobe, a carga metálica desce, sofrendo o processo de redução. O ferro gusa é então vazado em torno de 1500° C, em seguida esse material é levado para posterior transformação em aço na aciaria.

A partir da década de 1950, os altos-fornos testemunharam avanços tecnológicos significativos com os objetivos principais de minimizar o consumo de combustível, aumentar a eficiência energética e aumentar a produtividade. Uma inovação notável na indústria siderúrgica é o método de co-injeção, onde o carvão pulverizado não coqueificável (PCI) é injetado simultaneamente através das ventaneiras. Essa técnica oferece inúmeras vantagens, como redução no consumo de coque metalúrgico e carvão, maior produtividade, elevação do poder calorífico do gás de topo, melhora na qualidade do ferro-gusa, redução do *Fuel Rate* e menor emissão de CO₂ e SO₂ na atmosfera (Forastieri *et al.*,2014).

O PCI pode ser descrito sucintamente como uma planta de moagem e injeção de carvão mineral para o alto-forno. Assim como qualquer equipamento, esta planta requer manutenção regular para garantir um bom funcionamento. Porém, mesmo com a manutenção em dia, podem ocorrer falhas inesperadas, que impactam diretamente nos parâmetros operacionais do alto-forno.

Em situações de parada da planta de PCI para manutenção é feita uma modificação previa na quantidade de coque a ser carregado pelo topo do reator. Já em situações em que ocorre a falha inesperada, a carga é modificada a partir do momento de parada da planta. Em ambos os casos o corte de injeção no reator não é instantâneo, pois o silo de carvão fino garante a injeção por um período. A taxa de injeção é modificada em função da quantidade de material presente no silo, essa modificação é de suma importância, em razão da não ação instantânea do coque carregado no topo do reator, visto que leva cerca de 6 horas a 8 horas para que a nova carga chegue nas zonas onde ocorre as reações. O forno passa então ao processo *all coke* (todo

combustível é coque metalúrgico), após o corte da injeção. Por este motivo os parâmetros operacionais de um alto-forno sofrem grande impacto, quando há um corte da injeção.

Neste trabalho foi realizado um estudo dos efeitos da interrupção das plantas de PCI nos parâmetros operacionais de processo, utilizando como fonte de dados um alto-forno a coque metalúrgico.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Nesse trabalho foi realizada uma análise do efeito do corte da injeção de carvão pulverizado nos parâmetros operacionais de um alto-forno, devido as paradas da planta de PCI.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar ocorrências de paradas da planta PCI;
- ✓ Identificar parâmetros mais afetados pela alteração na carga do alto-forno durante as interrupções do PCI;
- ✓ Propor estratégias para mitigar os efeitos sobre o regime do forno quando houver paradas do PCI.

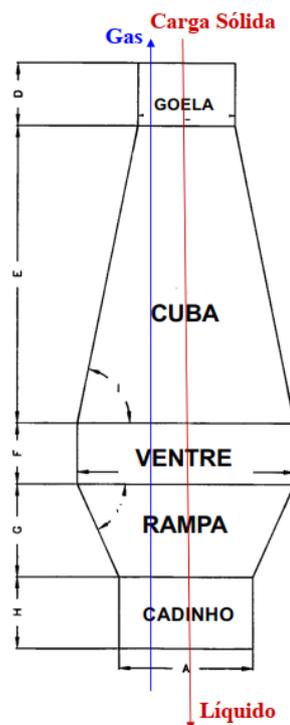
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Alto-Forno

O alto-forno é um reator industrial destinado à produção do ferro gusa no estado líquido a uma temperatura aproximada de 1500°C, onde se deseja produzir um material com boa qualidade e que seja suficiente para garantir as etapas subsequentes até a obtenção final do aço. A matéria prima carregada pelo topo do reator é constituída pela carga metálica: minério de ferro granulado, sinter, pelota, sucata, juntamente com os redutores: coque metalúrgico, carvão vegetal e fundentes: quartzito, calcário e dolomita (Mourão, 2007).

Este reator tem como princípio de funcionamento o fluxo em contracorrente, o gás quente em seu efeito ascendente é responsável por percolar a carga metálica, reduzindo a mesma até alcançar seu estágio final em ferro gusa, como é mostrado na Figura 3.1. A presença de carbono no coque metalúrgico tem dupla função, primeiramente quando combinado com o oxigênio do minério de ferro, garante a liberação do ferro metálico e geração de calor para as reações químicas em elevadas temperaturas, assegurando assim a redutibilidade do minério de ferro em ferro gusa (Mota, 2018).

Figura 3.1: Processo em contracorrente.



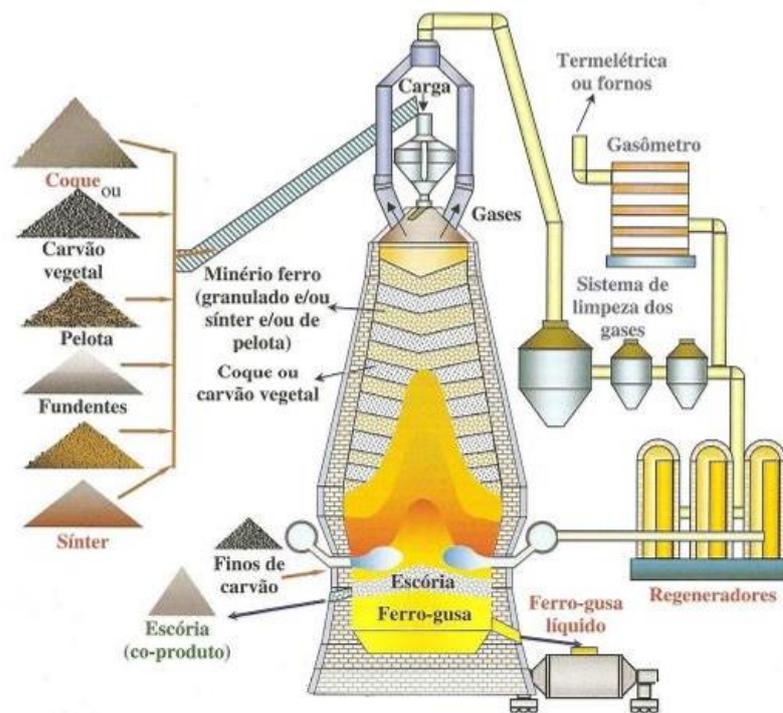
Fonte: Vieira, 2021.

O processo do alto-forno pode ser observado através da Figura 3.2. A matéria prima é carregada no topo do reator, para combustão do coque, o gás quente enriquecido com oxigênio

é introduzido nas ventaneiras, através de um conjunto denominado algaraviz. Nos algaravizes também são inseridas as lanças para injeção auxiliar de carvão pulverizado (Mourão, 2007).

O forno é constituído por camadas alternadas de minério e coque em toda sua extensão, ao final da redução do minério de ferro em ferro metálico, o forno é esgotado, obtendo ferro gusa que se destina a aciaria e escória que é subproduto para indústria cimenteira.

Figura 3.2: Funcionamento do Alto-Forno.



Fonte: Rizzo, 2009.

3.1.1 Zonas do Alto-Forno

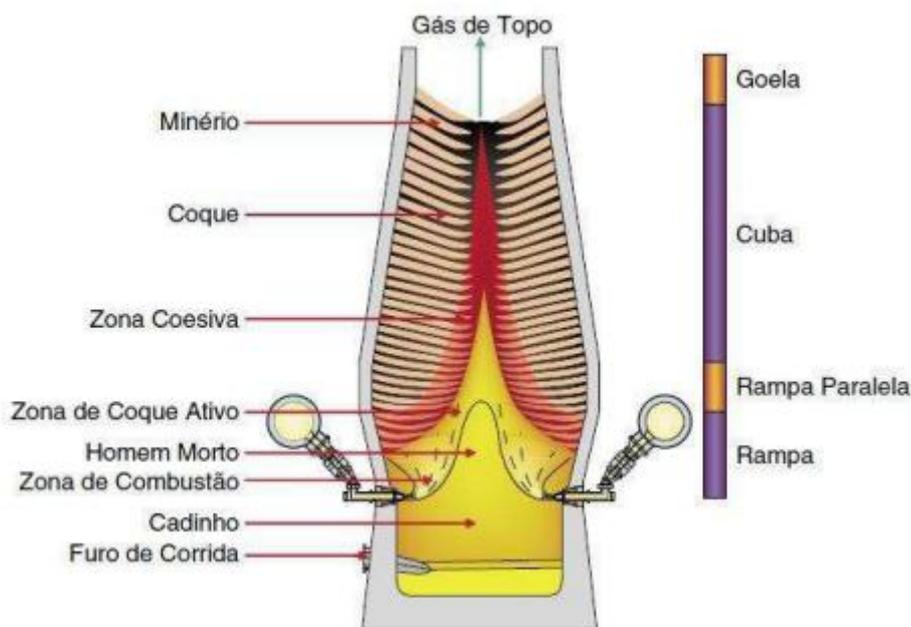
O Alto-Forno é constituído de cinco zonas internas, conforme mostra a Figura 3.3 As principais características de cada uma dessas zonas são descritas a seguir.

- Zona granular: Do mesmo modo como foi carregado no topo do forno, o minério e o coque permanecem em camadas alternadas. A redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido, dado que nesta região coexistem apenas as fases (gás e sólido) (Mourão, 2007). Logo após o carregamento, a hematita (Fe_2O_3), é reduzida através do gás redutor CO para magnetita (Fe_3O_4). As reações com o CO continuam, de forma que a magnetita reduza à wustita (FeO), ainda nessa região de zona granular (Yallico, 2011).
- Zona Coesiva ou Zona de Amolecimento e Fusão: Região compreendida na faixa de temperatura onde se inicia o amolecimento e a fusão da carga metálica (Mourão, 2007). Destaca-se que na zona em questão, ocorre a formação da escória primaria e redução da

maior parte dos óxidos. A forma, posição e a espessura desta zona afetam diretamente o escoamento gasoso no forno e por consequência tem influência direta na sua performance operacional (Vieira,2021).

- Zona de Gotejamento: O coque presente nesta região é encontrado na forma sólida, em cujos interstícios gotejam o gusa e a escória. Esta zona é dividida em duas subzonas: a região de coque ativo e a região de coque inativo, popularmente conhecida como "homem morto"(Mourão, 2007).
- Zona de Combustão: Região parcialmente vazia em frente as ventaneiras, devido a energia cinética do soprador de ar quente. As partículas de coque presentes nesta zona são queimadas gerando o gás redutor e energia (Mourão, 2007).
- Cadinho: É preenchido com coque granulado por cujos interstícios se depositam o gusa e a escória, que se separam em duas camadas por diferença de densidade (Mourão, 2007). A porção de coque desta região tem sobre si grande parte do peso de toda a coluna de carga do alto-forno e, dependendo da relação de forças entre o peso da carga e o empuxo exercido pela gusa, escória e ar soprado, pode ser ou não apoiada no fundo do cadinho (Juanes,2019).

Figura 3.3: Zonas internas Alto-Forno.



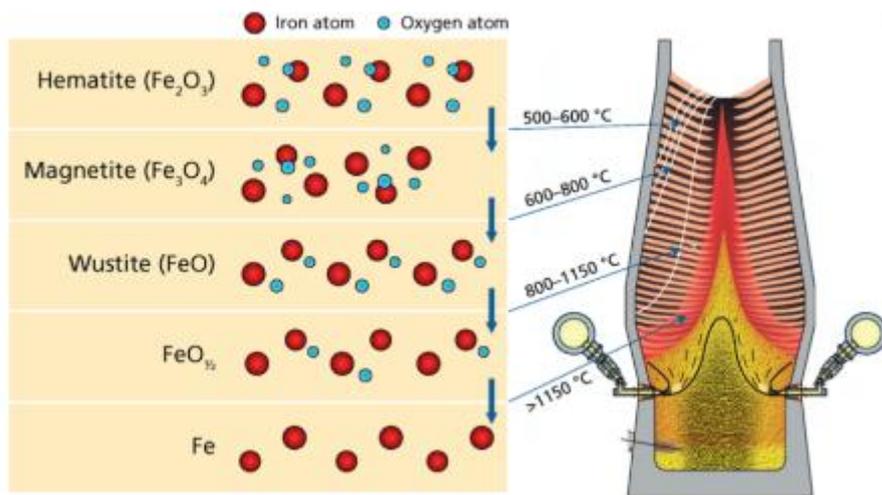
Fonte: Geerdes et al., 2020

3.1.2 Redução do minério de ferro

Para a remoção total do oxigênio do mineral são necessárias algumas etapas, como mostra a Figura 3.4.

O primeiro passo é a redução da hematita (Fe_2O_3) em magnetita (Fe_3O_4), na faixa de temperatura de 500°C a 600°C . A reação gera energia, aumentando assim a temperatura da carga. Seguida da redução para Wustita (FeO) na faixa de 600°C a 800°C , esta reação difere da anterior pois ela não gera e sim demanda energia. Nas regiões inferiores do forno, a temperatura da carga aumenta gradualmente, e parte dos óxidos de ferro são reduzidos a ferro metálico até que a carga comece a amolecer e fundir na zona coesiva. O ferro fundido juntamente com a escória passa através da camada de coque presente abaixo da zona coesiva e por fim é realizado o esgotamento desse material (Geerdes *et al.*, 2020).

Figura 3.4: Reações de redução do minério de ferro.



Fonte: Geerdes et al., 2020.

3.1.3 Funções do Coque no Alto-Forno

O coque é a principal fonte de energia para a produção de gusa, desempenhando três funções primordiais ao processo: química, térmica e física.

1. Função Química e Térmica

Segundo Lanza, “o coque e o carvão são as principais fontes de energia para o processo, torna-se praticamente dispensável comentar sobre a importância dos mesmos no estado térmico do forno”.

O coque no alto-forno é responsável por fornecer o carbono para as reações químicas do processo e suprir a maior parte do calor requerido, o perfil térmico característico é influenciado diretamente pela ocorrência da reação de Boudouard ou *solution loss* ou reatividade do coque (Filho, 2007).



Na região das ventaneiras, são gerados todo o calor e os gases necessários para o processo. O ar pré-aquecido a uma temperatura de 1100°C entra em contato com o coque, de modo que nessa área ocorram as reações de combustão (Filho, 2007).

O papel químico é desempenhado pelo fornecimento de gás redutor, fonte de carbono que provoca a redução direta e indireta do minério de ferro (Coelho *et al.*, 2004).

2. Função Física

Com sua estrutura sólida e permeável, o coque oferece suporte de carga sólida e permite a passagem de gases, tornando-se essencial para o processo de descida até o cadinho sem perder sua forma (Coelho *et al.*, 2004).

Sendo esta talvez a sua principal função, a partir dela é possível, segundo Filho, 2007:

- Fornece a camada permeável no topo do forno para que o gás passe por ela;
- Fornece a separação das camadas mais pesadas, mais densas e menos permeáveis de sínter, fundentes, minério granulado e pelotas;
- Fornece a camada permeável (janelas) na parte inferior do forno através das quais os líquidos podem gotejar e os gases quentes podem passar;
- Sustenta o peso da coluna de carga;
- Fornece a camada permeável para que o gusa e a escória fluam para os furos de corrida.

Para cumprir com as funções de combustível, redutor, carburante e permeabilizador do processo de alto-forno, o coque deve apresentar as seguintes características, segundo Coelho *et al.*, 2004:

- Máximo teor em carbono e mínimos teores em cinza, enxofre e umidade;
- Adequados valores de reatividade ao CO₂ e H₂O;
- Faixa granulométrica, ao ser carregado, estrita e adequada;
- Altos valores de resistência a degradação de origem mecânica, térmica e química.
- Álcalis (Na₂O, K₂O e ZnO) e fósforo.

3.2 Injeção de carvão pulverizado

Para injeção auxiliar nos altos-fornos, é necessário que o material contenha alta porcentagem de hidrocarbonetos, logo, teoricamente qualquer material que apresente esse requisito, seria passível de ser injetado. Entretanto, para ser viável a injeção é requerida que o material corresponda aos aspectos práticos e econômicos. Ao decorrer da história da utilização de combustíveis auxiliares muitos materiais foram testados entre eles: plásticos picotados, óleo

combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados, entre outros (Mourão, 2007).

No mundo a injeção auxiliar de combustíveis é largamente utilizada. Até o final da década de setenta e início de oitenta, a injeção de óleo era a mais comum. No entanto, com a crise do petróleo, esse tipo de injeção se tornou inviável economicamente. A partir desse momento, a injeção de carvão, que já era utilizada, passou por um grande desenvolvimento. Hoje em dia, os fornos são capazes de injetar de 150kg a 200kg de finos de carvão por tonelada de gusa produzido (Lanza, 2002).

No que se refere aos materiais injetados nos altos-fornos, o carvão é amplamente utilizado devido ao seu custo relativamente baixo e à abundância de suas reservas em comparação com outros combustíveis fósseis. De acordo com Nomura e Callcott (2011), 47,7% dos altos-fornos em todo o mundo utilizam a injeção de carvão pulverizado, enquanto apenas 4,1% utilizam óleo, 11,9% utilizam gás natural e 0,2% utilizam injeção de plásticos

A injeção de combustível tem como objetivo substituir parte do coque que é carregado no topo do forno. É importante ressaltar que o coque desempenha um papel fundamental no processo, atuando como permeabilizante de carga. Portanto, a utilização de injeções auxiliares requer procedimentos e cuidados especiais, uma vez que podem causar modificações significativas no processo, como alterações nas posições das isotermas no interior do forno. Essas alterações, por sua vez, afetam o estado térmico do alto-forno (Lanza, 2001). Nesse sentido, é essencial adotar uma abordagem profissional ao lidar com a injeção de materiais nos altos-fornos, a fim de garantir um processo eficiente e seguro.

A Tabela 3.1 apresenta a taxa de substituição de coque para os diversos tipos de combustíveis auxiliares. Convém ressaltar que a taxa de substituição varia com a qualidade do combustível utilizado, e com a taxa de injeção em kg/t praticada.

Tabela 3.1: Taxa de substituição de coque.

COMBUSTIVEL	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO Kg de coque / Kg de combustível
Óleo	0,95
Gás natural	1,00
Alcatrão	1,20
Finos de carvão mineral	0,90
Finos de carvão vegetal	0,70

Fonte: Lanza, 2001.

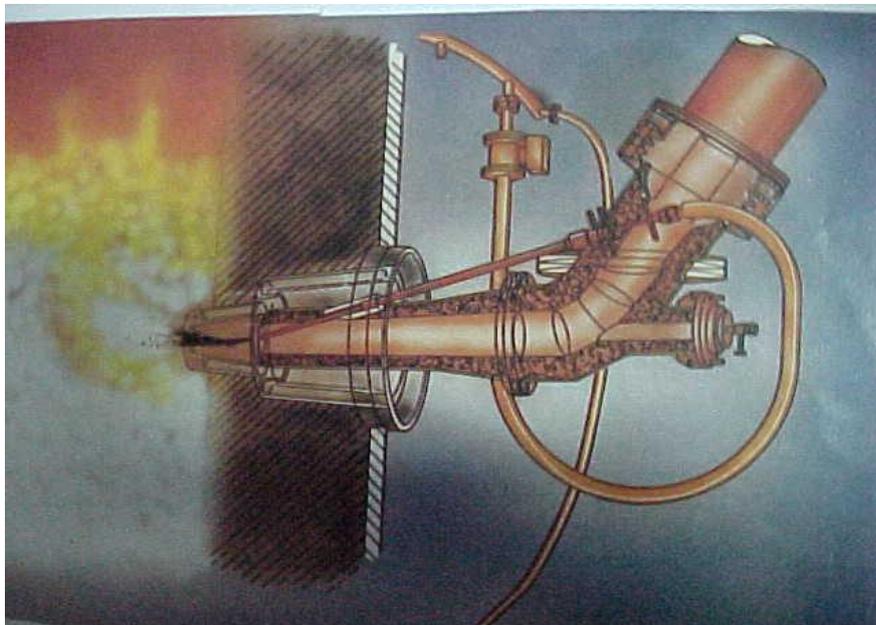
Diferente do coque, o carvão pulverizado desempenha apenas duas das três funções básicas do coque ao processo: servir como fonte de gás redutor e prover uma fonte de calor. A

partir do carvão pulverizado não é possível promover uma base permeável no alto-forno, sendo esta exclusiva do coque (Mourão, 2007).

No funcionamento de um alto-forno, é crucial garantir uma operação estável, o que requer uma distribuição uniforme do fluxo de gás ascendente e um livre fluxo de gusa e escória até o cadinho. Portanto, para alcançar uma operação estável e altamente produtiva, é essencial manter uma boa permeabilidade no reator. (Carpenter, 2006).

A injeção de carvão é realizada através de lanças inseridas nas ventaneiras. O carvão é transportado até o alto-forno por meio de uma linha pressurizada, onde a pressão na linha necessariamente é superior a pressão no interior do reator e para garantir o arraste do material faz-se o uso de nitrogênio. (Lanza, 2001). Como mostra a Figura 3.5.

Figura 3.5: Injeção de carvão.



Fonte: Companhia Siderúrgica Paulista, 2001.

Segundo Mourão, 2007 a injeção de carvão pulverizado pode propiciar os seguintes benefícios:

- Redução de custos pela substituição de coque por carvões não coqueificáveis de baixo custo, além de redução do consumo energético;
- Grande elevação de produtividade, devido a possibilidade de elevação do enriquecimento do ar soprado com oxigênio;
- Extensão da vida útil das baterias de coqueificação, devido à redução da demanda de coque;
- Maior estabilidade de qualidade do gusa e redução do teor de silício.

Por outro lado, o carvão injetado tem um tempo muito curto, cinco milissegundos, na região da zona de combustão, por isso, suas características de combustibilidade são muito importantes para o desempenho do processo. Carvões com uma combustibilidade inadequada podem ocasionar problemas na prática do alto-forno tais como a diminuição da permeabilidade e a distribuição não desejável dos gases e temperatura no forno (Carpenter, 2006). Na prática, é desejada uma alta eficiência de combustão do carvão na zona de combustão e, portanto, essa eficiência é considerada uma das mais importantes preocupações na operação com PCI (Shen; Yu, 2015).

A redução de custos é um aspecto primordial para a indústria, uma vez que isso possibilita um aumento nos lucros. Nesse sentido, busca-se atingir a máxima taxa de injeção de carvão possível, já que seu custo é consideravelmente menor em comparação ao coque. No entanto, é importante destacar que uma taxa de injeção mais elevada resulta em um aumento do carvão não queimado, conhecido como *char*, e da energia cinética do sopro. Segundo Mourão, 2007, isso acarreta:

- Variações no formato da zona de combustão e instabilidade a zona de combustão.
- Redução da permeabilidade do coque nas vizinhanças da zona de combustão.
- Aumento da degradação do coque na zona de combustão.
- Variações na distribuição de temperatura da zona de combustão.

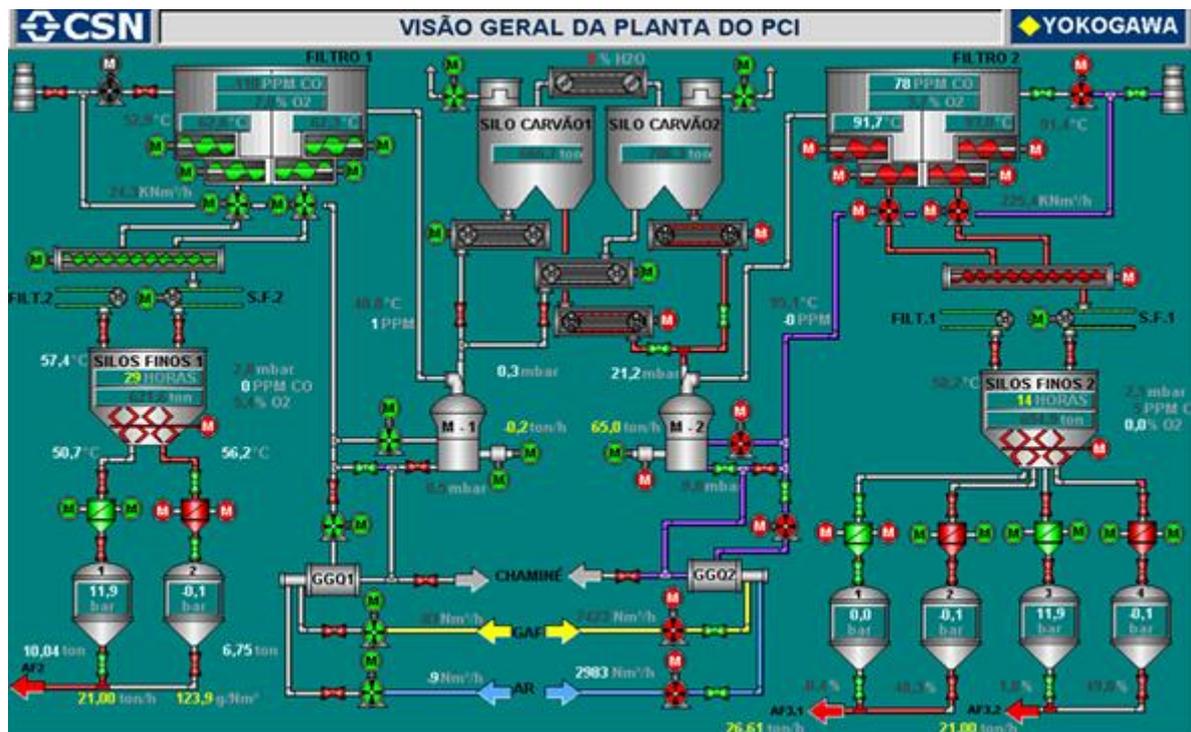
3.2.1 Planta de Moagem (PCI)

Para garantir um processo de moagem eficiente, é necessário adquirir diferentes tipos de carvões, que serão combinados para obter as características desejadas. Alguns dados essenciais sobre esses carvões incluem taxa de substituição, teor de enxofre, percentual de cinzas e HGI (índice de dureza do carvão), que reflete a dificuldade de triturar o material, o que, por sua vez, influencia o consumo de energia e os custos de moagem. Além disso, materiais difíceis de moer provocam abrasão nos rolos e tubulações do moinho, e a gravidade dessa abrasão pode ser avaliada pelo Índice de Abrasão (Zou *et al.*, 2023).

A planta possui um silo para armazenar o carvão bruto, onde é feita a mistura do mix de carvão. O carvão é alimentado no moinho por um transportador de arraste de carvão. O carvão é jogado sobre a mesa do moinho, que gira enquanto os rolos permanecem fixos, moendo assim o carvão. Os gases circulam através do ventilador principal e passam pelo gerador de gás quente (GGQ), onde ocorre a secagem do material e o transporte para o silo de carvão fino (Belo, 2019).

O carvão moído passa por um sistema de classificação, enquanto o gás quente circula ao redor da mesa do moinho, carregando o material. Após a classificação, o material que não está na faixa granulométrica desejada retorna para a etapa de moagem. Já o material que atende aos requisitos de granulometria ideal segue para o filtro de mangas, onde o carvão pulverizado é retido, permitindo apenas a passagem do gás, que será recirculado no sistema. Antes de ser armazenado nos silos de finos, o carvão passa por uma peneira para remover impurezas residuais (Belo, 2019). Na Figura 3.6, exemplifica-se as etapas de preparação de finos para injeção, conforme é realizado em plantas de grandes siderúrgicas.

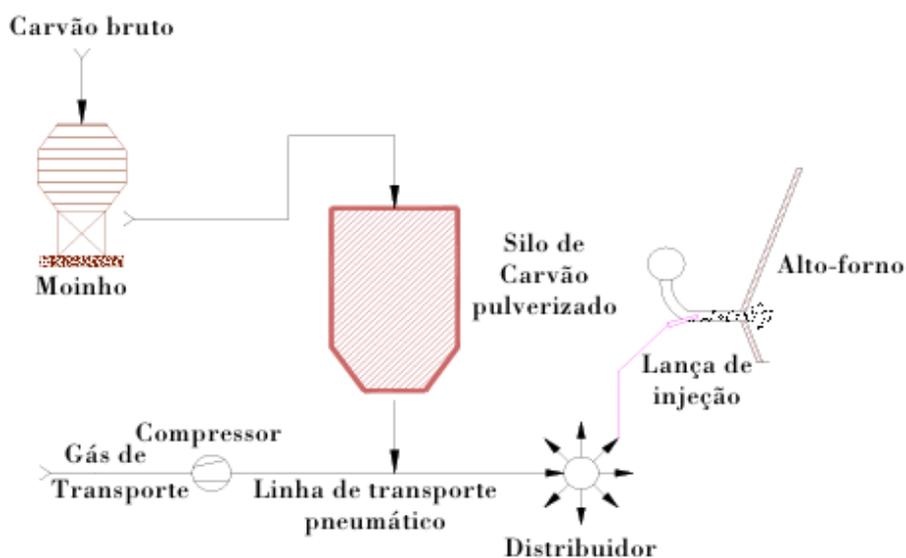
Figura 3.6: Fluxograma típico de uma planta de PCI para Altos-Fornos.



Fonte: Motta,2011.

O transporte do material até as ventaneiras é realizado através do descarregamento nos vasos de injeção. O carvão é distribuído igualmente em duas rotas, um par e outra ímpar, após, ele segue para as ventaneiras, onde é injetado no reator (Motta, 2011), conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 Injeção no alto-forno.



Fonte: Motta,2011.

3.3 Efeitos da injeção de carvão nos parâmetros operacionais

A zona de combustão em frente as ventaneiras é o núcleo do alto-forno, responsável pela geração de energia térmica e agentes redutores através da tecnologia de Injeção de Carvão Pulverizado (PCI). A qualidade do gusa e a duração da campanha do alto-forno são diretamente impactadas pela condição de operação do PCI. Quando ocorre um bloqueio no PCI, o carvão pulverizado injetado na ventaneira pode se tornar intermitente e irregular, resultando em uma permeabilidade local instável do material. Para prevenir tais problemas, é essencial ter um sistema de detecção de bloqueios do PCI mais preciso e confiável (Wang; Huang; Yang, 2020).

O uso de altas taxas de PCI pode trazer efeitos negativos para a operação do alto forno. Por exemplo, pode ocorrer um aumento no teor de fuligem no gás de topo devido à combustão incompleta do carvão injetado na ventaneira. Portanto, é essencial melhorar a dispersão das partículas de carvão na ventaneira e otimizar as condições para uma reação química eficiente para garantir uma combustão ótima do carvão (Puttinger; Stocker, 2018)

Métodos simples e comuns para detectar bloqueios no PCI incluem o método de diferença de temperatura e o método óptico. O método de diferença de temperatura se baseia no fato de que a temperatura do carvão pulverizado é superior à temperatura ambiente e à temperatura do ar comprimido após o resfriamento a seco. Por outro lado, o método óptico avalia a condição de operação do PCI através da instalação de um fotodetector, que requer boa transmissão de luz na área de detecção. No entanto, a maioria dos pipelines de carvão é opaca e seu ambiente interno é complexo, o que limita a aplicação efetiva deste método (Wang; Huang; Yang, 2020).

Bloqueios curtos, que duram apenas alguns segundos, podem ser observados várias vezes por hora. Já bloqueios mais longos, com duração superior a um minuto, podem ocorrer várias vezes ao dia e durar cerca de meia hora em casos extremos. Embora os bloqueios mais curtos possam não afetar significativamente a operação do alto-forno, a injeção contínua de carvão em casos de bloqueios mais prolongados não é desejável. Nesses casos, é importante desligar o ramo PCI na ventaneira afetada para evitar a acumulação de partículas de carvão não queimadas (Puttinger; Stocker, 2018)

Uma das grandes vantagens de adotar a injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos é a redução dos custos operacionais. No entanto, é importante ressaltar que essa técnica traz consigo algumas mudanças nos parâmetros de operação, como: temperatura da chama, permeabilidade e produtividade. Por isso, é fundamental tomar medidas específicas para garantir as condições ideais de funcionamento.

I. Temperatura de chama

A temperatura de chama pode ser definida como a temperatura com que os gases saem da zona de combustão. Em uma operação normal do alto-forno, busca-se manter essa temperatura o mais constante possível. No entanto, a injeção de carvão pulverizado pode diminuir, isso é devido à quebra das moléculas do carvão ser uma reação endotérmica, o que significa que ela absorve energia. Além disso, os finos de carvão são injetados a uma temperatura de aproximadamente 60 °C, enquanto o nitrogênio, utilizado para o transporte das partículas, é injetado a 25 °C, o que contribui para a redução da temperatura do sistema. De forma matemática, é possível demonstrar uma relação direta entre a massa de carvão injetada e o decréscimo na temperatura de chama. Para compensar essa redução, é necessário tomar medidas como aumentar a temperatura de sopro ou aumentar o percentual de enriquecimento com oxigênio (Lanza,2001).

A injeção de carvão pulverizado, diferente da operação *all coke* permite um melhor ajuste da temperatura teórica de chama (Mourão, 2007). Logo, quando se deseja uma modificação rápida na temperatura de chama, a primeira modificação ocorre na taxa de injeção.

II. Permeabilidade

O carregamento do alto-forno é feito de forma estratégica, alternando camadas de coque e carga metálica. Essa técnica é essencial para garantir que o fluxo gasoso percorra a carga de maneira eficiente. O coque desempenha um papel fundamental nesse processo, devido à sua granulometria e ao fato de não se fundir na zona de amolecimento e fusão. No entanto, quando se substitui o coque por carvão pulverizado, a quantidade de coque no leito diminui, o que acarreta uma piora na permeabilidade na parte superior do alto-forno. Além disso, o volume de

gases que atravessam o leito aumenta devido ao gás de arraste e aos voláteis do carvão. Esse fator também contribui para uma piora na permeabilidade na parte superior do reator. Na parte inferior do alto-forno, a presença de carvão não queimado também contribui para uma piora na permeabilidade. Esses aspectos devem ser considerados para garantir um funcionamento eficiente do processo. (Lanza,2001).

III. Tempo de residência

O tempo exigido para que a carga metálica atravessasse a zona de preparação, desde a parte superior do forno até a zona de elaboração, pode ser otimizado. A introdução de carvão pulverizado na mistura diminui o consumo de coque inserido pelo topo do reator. Com isso, o espaço anteriormente ocupado pelo coque passa a ser preenchido pela carga metálica, resultando em um aumento no tempo de permanência da mesma (Lanza, 2002). O aumento do tempo de residência tem consequência positivas, segundo Vieira (2012):

- A. O aumento do tempo de residência implica em maior tempo de reação da carga metálica na zona de preparação, a extensão de uma dada reação depende do tempo disponível para que ela se desenvolva.
- B. Na zona de preparação a redução é feita sem consumo de carbono. Desse modo, quanto mais se conseguir reduzir nessa região, menor será o consumo global de carbono no alto-forno.

IV. Alteração na proporção de hidrogênio dos gases

A injeção de finos provoca um aumento no teor de hidrogênio dos gases, devido à presença de materiais voláteis que contêm esse elemento. Vale destacar que a redução causada pelo hidrogênio é cinco vezes mais rápida do que a causada pelo CO. Portanto, a incorporação desse hidrogênio aos gases é de extrema importância (Lanza,2001).

V. Produtividade

A injeção de carvão pulverizado em um alto-forno pode trazer melhorias significativas em sua produtividade. Ao substituir parte do coque carregado pelo topo por carga metálica, é possível aumentar a produção diária, mantendo-se o tempo de residência da carga metálica constante. Além disso, a queima do oxigênio com os combustíveis carregados é a principal fonte de energia para o processo de alto-forno. Ao enriquecer o ar com oxigênio, aumenta-se a quantidade de energia introduzida no reator, o que contribui para um incremento na produtividade. O enriquecimento do ar com oxigênio é comumente realizado ao utilizar-se combustível auxiliar, o que proporciona um fator adicional para elevar a produtividade. No entanto, é necessário ter cautela para não injetar uma quantidade excessiva de carvão, pois isso

pode prejudicar a produtividade devido à presença de carvão não queimado na zona de combustão (Lanza,2001).

VI. Controle térmico.

O alto-forno possui uma reserva interna de energia, denominada homem morto, essa reserva é responsável por absorver qualquer diferença entre as quantidades de carbono carregadas e consumidas durante as operações. Quando se busca reduzir o consumo de carbono no alto-forno, há uma tendência de diminuir a altura do homem morto. No entanto, a redução exagerada, pode consumir essa reserva, resultando em um resfriamento indesejado do cadinho. O coque que é carregado no topo do alto-forno demora cerca de 6 a 8 horas para fazer efeito em termos de balanço energético. Mesmo que sejam feitas correções no carregamento, ainda existe a possibilidade de ocorrer resfriamento. É por isso que a injeção de carvão pulverizado se torna tão importante, ela atua como uma espécie de reserva térmica externa, já que é injetado diretamente na zona de combustão e tem um tempo de resposta mais rápido 1,5 horas a 2 horas (Lanza,2001).

Assim, na operação com PCI, é viável reduzir a estatura do "homem-morto", minimizando os riscos operacionais envolvidos. Como consequência ocorre uma queda significativa nos níveis de silício e enxofre presentes no gusa. Além disso, devido à resposta rápida do sistema, é possível gerenciar as flutuações operacionais do processo por meio da adição ou remoção de carvão. Dessa forma, o controle térmico pode ser efetuado com maior eficácia, por meio do manejo da temperatura de sopro, do oxigênio ou do próprio carvão PCI (Lanza, 2001).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente estudo teve como foco avaliar os efeitos da interrupção da injeção de carvão pulverizado no alto-forno, decorrente das paradas da planta de PCI. O corte da injeção ocorre em situações de falha na planta de moagem e injeção. A fim de avaliar os impactos operacionais, é utilizado como fonte o banco de dados reais de um alto-forno a coque, de capacidade de 4100 t/dia. Todos os parâmetros operacionais tratados nesse trabalho foram normalizados utilizando para tal os valores de referência do processo na empresa em questão ($\text{Variável}_{\text{normalizada}} = \text{Valor}_{\text{instantâneo}} / \text{Valor}_{\text{referencia}}$). A análise abrangeu o período de novembro de 2022 a abril de 2023, a partir do retorno da operação do forno pós-reforma.

Utilizando os relatórios diários de troca de turno dos operadores (responsável pelo controle do processo na sala de controle), foram registradas as paradas de emergência e identificadas as causas mais frequentes de interrupção da planta de moagem. É importante ressaltar que o corte da injeção não ocorre imediatamente após a parada da planta. Em casos em que a parada excedeu a capacidade de armazenamento do silo de carvão fino, fez-se necessária as operações *all coke*, resultando em uma modificação da carga metálica no reator para 100% coque metalúrgico. Essas informações foram consideradas na análise dos efeitos operacionais da interrupção da injeção no alto-forno.

A frequência dos dados analisados foi média horária, os parâmetros não possuem unidade devido a normalização realizada:

- temperatura de chama;
- temperatura de sopro;
- temperatura de topo;
- permeabilidade;
- vazão de oxigênio;
- enriquecimento de O₂;
- gases de topo (O₂, H₂, CO, CO₂ e N₂);
- rendimento gasoso.

O parâmetro de produtividade difere dos demais por ser medido como média/dia. Para análise dos resultados foi utilizado o Microsoft Excel para gerar gráficos destacando os períodos de operação *all coke*.

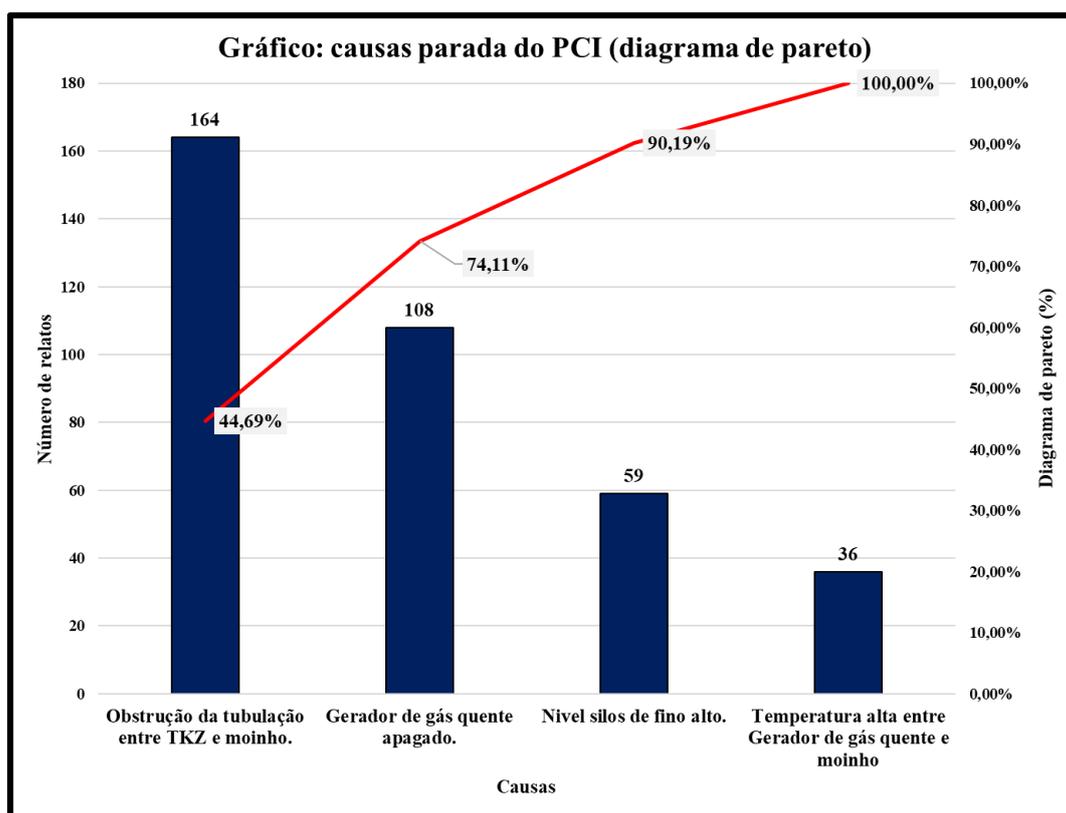
5 RESULTADOS E DISCURSSÃO

5.1 Identificação das Paradas na Planta de PCI

Neste capítulo são apresentados os resultados das paradas de injeção de finos no alto-forno a carvão mineral, juntamente com a discussão das relações deste indicador com os parâmetros de processo. Os resultados analisados referem-se ao período de 01/11/2022 a 01/04/2023.

Durante cada turno, os operadores preenchem uma planilha para registrar os eventos ocorridos na operação do alto-forno. Para cada parada da planta de moagem, eles anotam o motivo, o tempo de inatividade, se foi necessário interromper a injeção e qual foi a solução aplicada para o problema. A partir desses registros, foram levantados os principais motivos das paradas na planta de moagem destacados na Figura 5.1. Neste contexto, o número de ocorrências refere-se às paradas que foram resolvidas dentro do prazo estabelecido, sem a necessidade de recorrer a operação *all coke*.

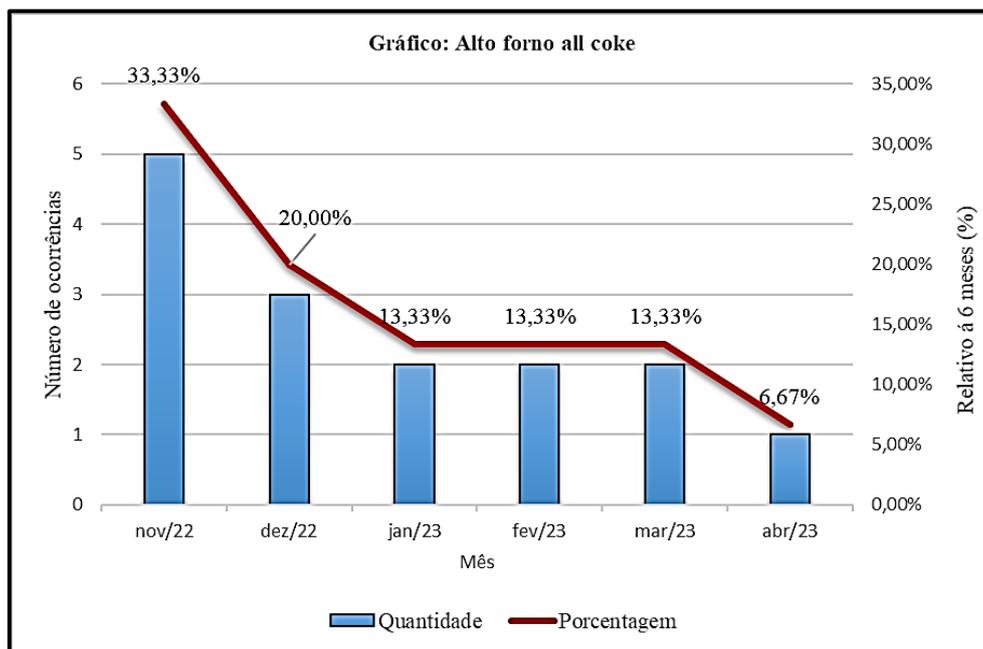
Figura 5.1 Causas de parada da planta de PCI.



Durante os seis meses de análise de dados, foram registradas 15 operações *all coke*. Conforme ilustrado na Figura 5.2, o mês de novembro apresentou a maior frequência de ocorrências, totalizando 5 paradas da planta.

O mês de novembro, após o retorno das operações, foi o mais impactado devido às alterações implementadas durante a parada em relação a sistemas, automação e manutenção. No entanto, a partir de dezembro, com a colaboração conjunta das equipes de engenharia, automação, mecânica e elétrica, os números de operação *all coke* começaram a melhorar. Não é possível especificar quais modificações foram realizadas, pois elas foram determinadas com base nas discussões de um QG (comitê para resolução de crises) criado para mitigar e resolver as crises relacionadas à operação *all coke*.

Figura 5.2 Ocorrências de operação *all coke* relativo a 6 meses de operação.



A Tabela 5.1 enumera os motivos que levaram às operações *all coke*, dados considerados após período de reforma. Como indicado, a falha do gerador de gás quente é um dos principais fatores que resultaram na parada da planta. De acordo com os registros dos operadores, ele foi o segundo maior responsável pelas falhas do PCI.

Tabela 5.1 Motivos forno *all coke*.

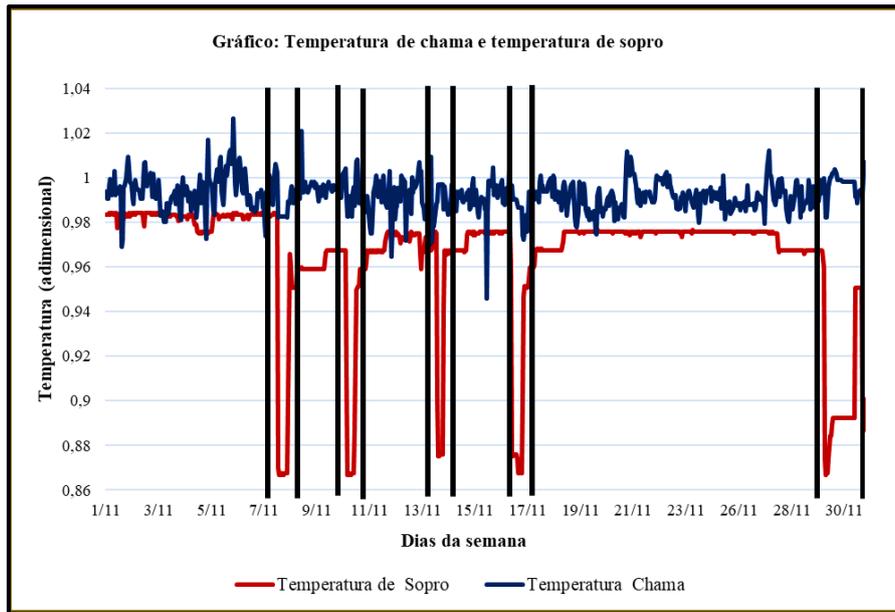
Dados Forno <i>all coke</i>	
Paradas	Motivo
01	Falha no gerador de gás quente
02	Falha no gerador de gás quente
03	Falha no gerador de gás quente
04	Falha no gerador de gás quente
05 e 06	Falha no gerador de gás quente
07	Raspador da moagem A quebrado/ Delta de pressão do moinho alto e geração elevada de rejeito
08	Obstrução filtro de processo moagem
09	Obstrução entre o transportador de corrente e moinho
10	Travamento do moinho e falha na estanqueidade do gás de alto-forno do gerador de gás quente
11	Obstrução moinho e falha na estanqueidade
12	Falha no gerador de gás quente
13	Falha na estanqueidade
14	Falha na estanqueidade
15	Falha na comunicação do gerador de gás quente com o supervisor

5.2 Comportamento dos parâmetros operacionais do Alto-Forno

Neste segmento, são discutidos os parâmetros de processo acompanhados diariamente com base em médias horárias e média diária no alto-forno. As análises a seguir destacam os resultados com foco no mês de novembro, considerando que os demais meses demonstraram um comportamento semelhante, portanto, os gráficos correspondentes não foram apresentados. As datas relacionadas às paradas são indicadas nos gráficos.

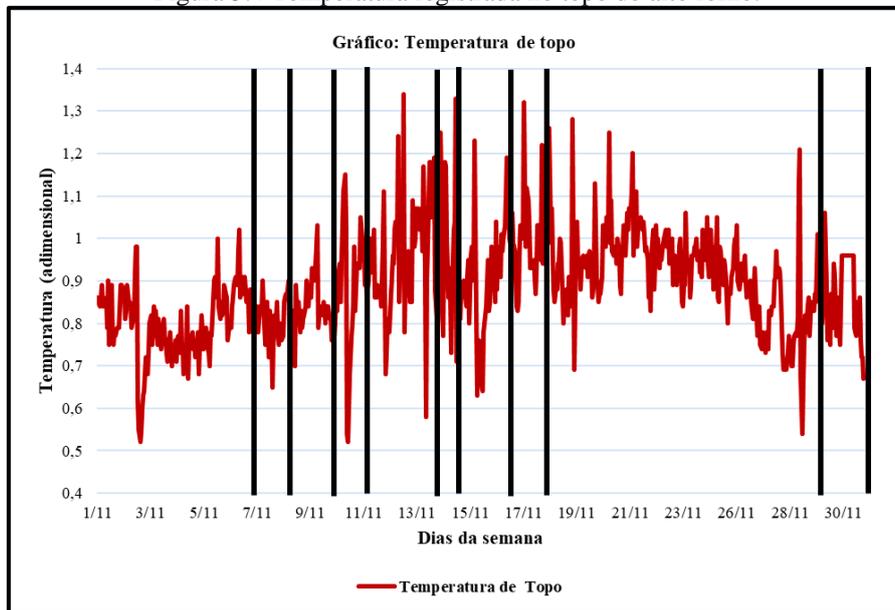
A Figura 5.3 evidencia uma forte correlação da temperatura de sopro e a taxa de injeção, uma vez que em todas as paradas houve uma significativa queda em seus valores. Por outro lado, a temperatura de chama não demonstrou uma relação direta com as paradas. Conforme mencionado no capítulo de revisão, durante a operação do alto-forno busca-se manter a temperatura de chama o mais constante possível. No entanto, a injeção de carvão pode reduzi-la, resultando em uma maior instabilidade em momentos sem injeção.

Figura 5.3 Variação diária da temperatura de chama e temperatura de sopro no alto forno.



Durante o mês de novembro, a temperatura do topo do alto-forno passou por uma variação significativa, conforme demonstrado na Figura 5.4. No entanto, durante os momentos de parada, houve uma queda em seu valor.

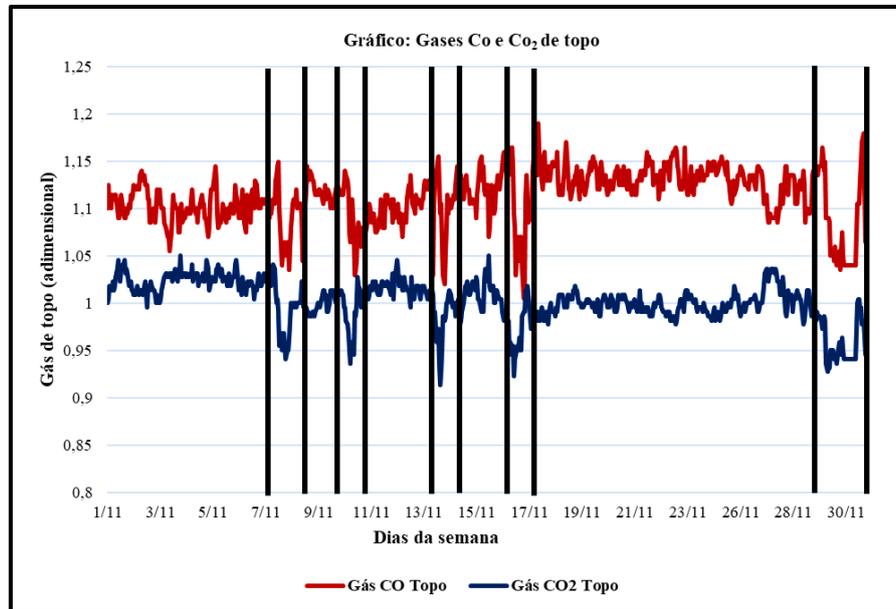
Figura 5.4 Temperatura registrada no topo do alto forno.



Os gases CO e CO₂ são gerados durante a redução do minério. Se esses gases estão em níveis baixos, pode indicar que o minério não está sendo reduzido de forma completa ou eficaz. Para garantir a redução adequada do minério, esses gases precisam percolar através da carga. No entanto, se houver barreiras no centro do reator devido à má permeabilidade, causada por carregamento inadequado de materiais, os gases podem subir pelas regiões próximas às paredes do reator, permitindo que alcancem o topo do forno.

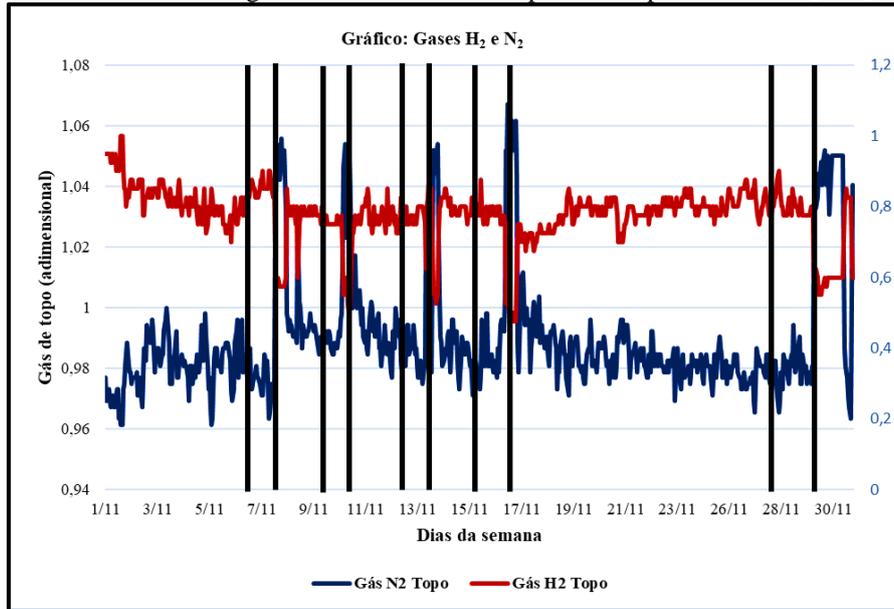
A medição dos gases CO e CO₂ é feita no topo do reator, e a presença de níveis baixos desses gases sugere que houve um aproveitamento inadequado no processo de redução. Essa perda tem um impacto negativo no desempenho e na eficácia do processo de redução. A Figura 5.5 mostra que ocorreu queda em todas as paradas da planta de PCI.

Figura 5.5 Oscilação dos gases responsáveis pela redução do minério: CO e CO₂



Os gases hidrogênio e nitrogênio apresentam comportamentos opostos em situações de parada, conforme Figura 5.6. A injeção de finos resulta em um aumento no teor de hidrogênio nos gases, devido à presença de materiais voláteis que contêm esse elemento. Quando a injeção é interrompida, observa-se um declínio significativo nos valores de hidrogênio. O percentual de hidrogênio é utilizado também para monitorar a quantidade de água dentro do reator. Se os valores de hidrogênio aumentarem rapidamente, pode indicar por exemplo uma ventaneira furada, resultando em entrada de água no forno.

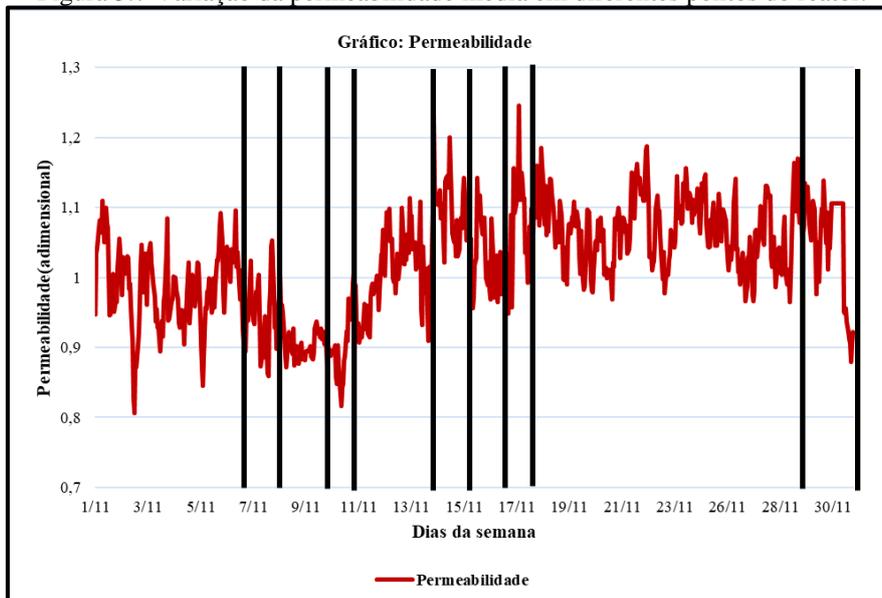
Figura 5.6 Gases medidos a partir do topo do reator: H₂ e N₂.



A permeabilidade no alto-forno é crucial para garantir que os gases de redução possam fluir de maneira eficaz através da carga, facilitando uma reação de redução eficiente. O coque e o carvão pulverizado exercem efeitos opostos na permeabilidade. As partículas de carvão pulverizado podem obstruir a passagem dos gases, levando a uma diminuição da permeabilidade.

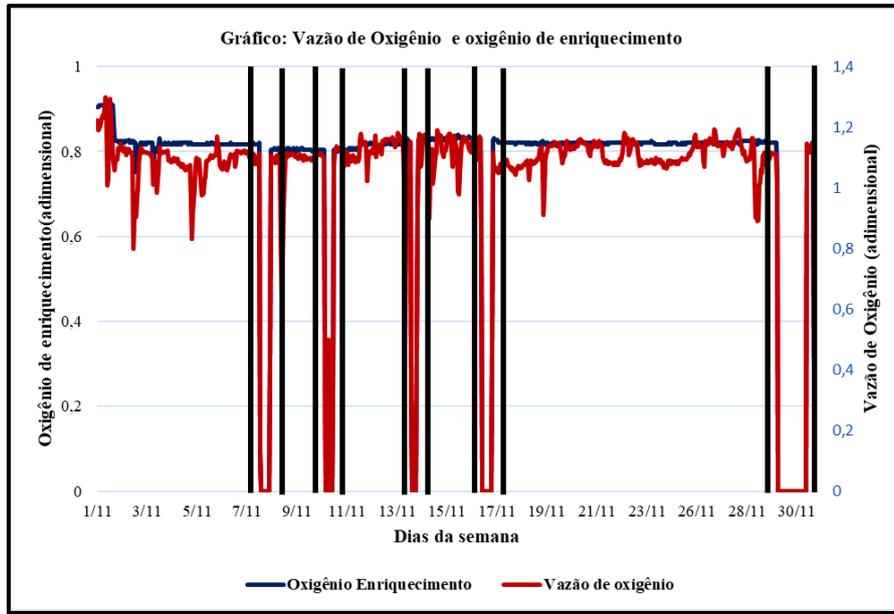
A permeabilidade é monitorada por meio da variação de pressão em cinco níveis distintos do forno. Na Figura 5.7, observa-se que, durante os períodos sem injeção de carvão, a permeabilidade apresentou uma queda. Como os dados consideram pontos variados no forno, qualquer alteração na permeabilidade pode ser atribuída a múltiplos fatores, não estando diretamente relacionada à injeção de carvão.

Figura 5.7 Variação da permeabilidade média em diferentes pontos do reator.



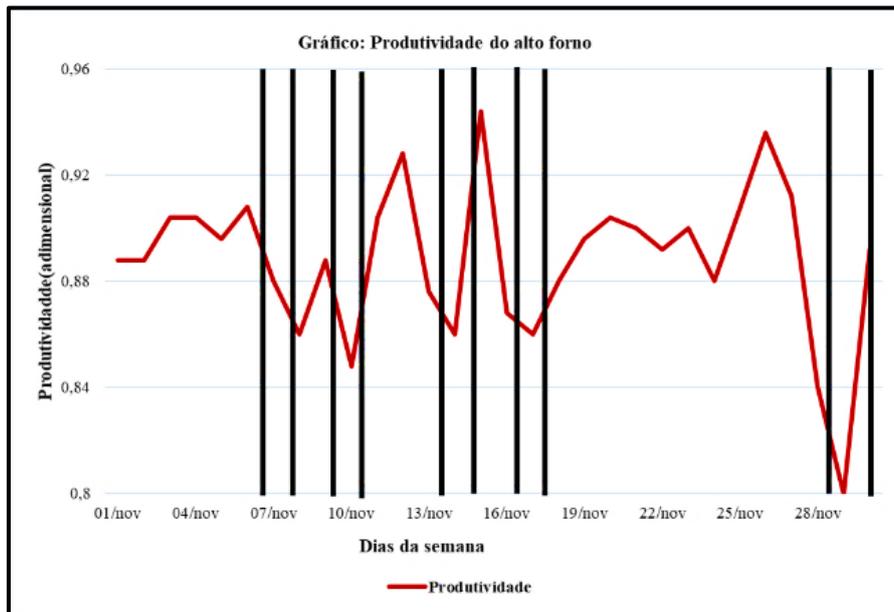
O enriquecimento de oxigênio pode ser empregado para assegurar a estabilidade da temperatura da chama e aumentar a produtividade do alto-forno. No entanto, é normalmente aplicado apenas quando há injeção auxiliar de carvão. A Figura 5.8 exibe a vazão e o enriquecimento de oxigênio, mostrando que, assim como ocorre com a interrupção da injeção de carvão, também ocorre a interrupção do enriquecimento de oxigênio.

Figura 5.8 Correlação entre a variabilidade na vazão de oxigênio e o enriquecimento de oxigênio.



A produtividade é avaliada de maneira distinta dos parâmetros analisados anteriormente, sendo calculada com base na média diária. Conforme Figura 5.9, a produtividade durante todas as paradas apresentou uma redução. Aumentar a taxa de injeção é uma estratégia para elevar a produtividade. Quando parte do coque é substituída e o ar é enriquecido com oxigênio, a quantidade de energia introduzida no reator aumenta, levando a um incremento na produtividade.

Figura 5.9 Acompanhamento da produtividade do alto forno considerando a média diária.



Os parâmetros mencionados anteriormente demonstraram uma forte correlação com as paradas, impactando diretamente na estabilidade operacional. Embora o objetivo do trabalho não seja a análise de custos, é importante ressaltar que a ausência de injeção de carvão é um aspecto crucial, dado que o custo do coque é significativamente mais alto em comparação com o do carvão pulverizado.

Durante o período de coleta desses dados, foram iniciadas as paradas preventivas de manutenção na planta de PCI buscando mitigar as falhas, com uma parada de 48 horas realizada mensalmente. A usina em questão possui duas plantas de PCI, permitindo que uma esteja em manutenção enquanto a outra continue operando.

Além do impacto nos parâmetros, é crucial mencionar as questões ambientais, uma vez que a produção de coque pode ter impactos significativos no meio ambiente devido às emissões de gases de efeito estufa, como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, durante o processo de fabricação.

6 CONCLUSÃO

O entendimento da relação entre os parâmetros de processo e a injeção de carvão pulverizado é de extrema importância. Destaca-se a busca pela estabilidade operacional do alto-forno e a garantia da qualidade do gusa produzido.

As correlações entre os parâmetros e as paradas do alto-forno revelaram uma forte dependência, destacando a importância da injeção contínua para a operação estável do forno. Observou-se uma correlação direta entre a temperatura de sopro e a taxa de injeção: quando a taxa de injeção aumenta, a temperatura de sopro também se eleva. Além disso, a produtividade é um fator essencial. Em um cenário em que o mercado de aço demanda maior produção, é crucial garantir uma alta produtividade. Assim, um aumento na taxa de injeção tem um impacto significativo nesse crescimento.

Por outro lado, é fundamental monitorar cuidadosamente os materiais carregados no forno para assegurar uma boa permeabilidade. O carvão pulverizado pode causar o efeito *bird nest* (ninho de pássaro) que se refere à formação de uma estrutura semelhante a um ninho de pássaro no homem morto. Isso acontece quando o material não se distribui uniformemente, resultando em obstruções ou bloqueios. Se a permeabilidade for comprometida, por exemplo, devido à obstrução por partículas de carvão, os gases CO e CO₂ responsáveis pela redução da carga podem enfrentar barreiras, resultando em condições operacionais desfavoráveis para o forno.

Após o levantamento desses dados, houve apenas uma operação *all coke* até dezembro de 2023, demonstrando a eficácia das paradas preventivas na planta de PCI.

O monitoramento contínuo das causas das paradas na usina visa eliminar totalmente as ocorrências de operação *all coke*, partindo assim para uma elevação na taxa de injeção, consequentemente redução da utilização de coque.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARIYAMA, T. et al. Evolution of blast furnace process toward reductant flexibility and carbon dioxide mitigation in steel works. **ISIJ international**, v. 56, n. 10, p. 1681–1696, 2016.

BELO, Eduardo Oliveira. **Análise de falhas dos equipamentos de um alto-forno**. 2019. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia da Confiabilidade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PA, Brasil, 2019.

CARPENTER, Anne M. **Use of PCI in blast furnaces**. Iea Clean Coal Centre. Londres: 2006. 66 p. Disponível em: < https://www.sustainable-carbon.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/reports/Combustion/use-of-pci-in-blast-furnaces-ccc-116.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023.

COELHO, Robson Jacinto; SILVA, Odilon José da; ALVES, Marcelo Tardim; ANDRADE, Luiz Afonso de; ASSIS, Paulo Santos. Modelos de previsão da qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno-piloto de coqueificação. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 27-32, mar. 2004. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/rem/a/sfvhrTjVvkRWFRPvZ7yQCqQ/>>. Acesso em: 16 maio 2023.

COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA. **Relatórios internos**. Cubatão, 2001

C. Zou; N. Yu; D. Liang; J. He; R. Shi; M. Ren: **ISIJ Int.**, (2023), <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2022-551>

GEERDES, Maarten; CHAIGNEAU, Rénard; LINGIARDI, Oscar; MOLENAAR, Ron; VAN OPBERGEN, Rob; SHA, Yongzhi; WARREN, Peter. **Modern Blast Furnance Ironmaking: an introduction**. 4. ed. Amesterdã: Ios Press, 2020. 274 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=cy4NEAAAQBAJ&hl=pt-BR&source=gbs_book_other_versions>. Acesso em: 02 maio 2023.

JUANES, Mateo de Carvalho. **Quantificação dos componentes carbonosos presentes no sistema de desempoeiramento do gás do alto-forno**. 2019. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49250>>. Acesso em: 09 jun. 2023.

LANZA, L. C. **Manual de controle térmico**. 2001. Ouro Branco, MG.

LANZA, L. C. **PCI**. 2002. Ouro Branco, MG.

MACHADO, F. S. **Aproveitamento Energético de Finos de Carvão em alto-forno, Visando Redução de Emissões e Obtenção de Créditos de Carbono**. 2009. 135f. Tese. Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

MOTTA, Ricardo Sebastião Nadur. **Sistema de injeção de materiais pulverizados em altos-fornos e aciarias**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2018. 394 p.

MOTTA, Ricardo Sebastião Nadur. **Automação e controle de sistemas de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

MOURÃO, Marcelo Breda (Coord). **Introdução a Siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007. 428 p.

NOMURA, Shinichiro; CALLCOTT, Thomas G.. Maximum rates of pulverized coal injection in ironmaking blast furnaces. **ISIJ Internacional**, [s. l], v. 51, p. 1033-1043, 2011.

RIZZO, E.M.S. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. São Paulo: ABM, 2009. 135p. Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos: conhecimentos básicos.

Ruixuan Zhang, Shusen Cheng, Changsheng Guo. **Detection Method for Pulverized Coal Injection and Particles in the Tuyere Raceway Using Image Processing**, ISIJ International, 2018, Volume 58, Issue 2, Pages 244-252, Released on J-STAGE February 17,

2018, Advance online publication December 07, 2017, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-433>.

SHEN, Yansong; YU, Aibing. Characterization of Coal Burnout in the Raceway of an Ironmaking Blast Furnace. **Steel Research International**, [s.l.], v. 86, n. 6, p. 604-611, 28 jan. 2015.

Stefan Puttinger, Hugo Stocker, **Improving Blast Furnace Raceway Blockage Detection. Part 1: Classification of Blockage Events and Processing Framework**, ISIJ International, 2019, Volume 59, Issue 3, Pages 466-473, Released on J-STAGE March 19, 2019, Advance online publication December 19, 2018, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-530>.

Tatsuro Ariyama, Michitaka Sato, Taihei Nouchi, Koichi Takahashi, **Evolution of Blast Furnace Process toward Reductant Flexibility and Carbon Dioxide Mitigation in Steel Works**, ISIJ International, 2016, Volume 56, Issue 10, Pages 1681-1696, Released on J-STAGE October 15, 2016, Advance online publication August 25, 2016, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-210>.

Ulysses Forastieri de Matos; João Felipe Araújo Carneiro de Abreu; Silvio Pessoa Ferraz; Ramon Moreira Lemos; Fabiano de Souza Moreira; Mateus Paresqui Basaro. **Co-injeção de gás natural e carvão em altos-fornos**, p. 5470-5477. In: 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2014. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/co-injeo-de-gs-natural-e-carvo-em-altos-fornos>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

VIANA FILHO, Olney Amorim. **Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em altos-fornos de alta produtividade**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/1843/MAPO-7RCHR7>>. Acesso em: 08 jun. 2023.

VIEIRA, C. B. **Notas de aulas de MET 129** – Versão I. Ouro Preto, MG, 2021.

VIEIRA, David Hebert. **Avaliação de parâmetros operacionais que influenciam a taxa de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos a carvão vegetal**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2012. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1623M.PDF>>. Acesso em: 25 jun. 2023.

YALLICO, Yovanna Gisela Palomares. **Reatividade comparativa de coque, carvão mineral, carvão vegetal e coque verde de petróleo**. 2011. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011. Disponível em:< <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=19428@1>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

Yutao Wang, Pu Huang, Gang Yang, **A Visual PCI Blockage Detection in Blast Furnace Raceway**, ISIJ International, 2020, Volume 60, Issue 3, Pages 519-527, Released on J-STAGE March 14, 2020, Advance online publication October 29, 2019, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-367>.

Yutao, R.; CHENG, S.; GUO, C. Detection Method for Pulverized Coal Injection and Particles in the Tuyere Raceway Using Image Processing. **ISIJ International**, v. 58, n. 2, p. 244–252, 2018.