

## REDUÇÃO DA VARIAÇÃO DA TAXA DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO NOS ALTOS FORNOS DA TERNIUM BR \*

*Alan José Santos De Almeida<sup>1</sup>*

*Deilton de Oliveira<sup>2</sup>*

*Diogo Costa<sup>3</sup>*

*Geovane Viturino da Silva<sup>4</sup>*

*Marco Antônio dos Reis<sup>5</sup>*

*Paulo Eduardo Marcelino<sup>6</sup>*

*Rafael Aires<sup>7</sup>*

### Resumo

A utilização de coque como combustível em Altos Fornos é necessária, apesar das restrições ambientais e dos custos envolvidos. Para diminuir a quantidade de coque utilizado no processo, são adotadas medidas como a injeção de hidrocarbonetos, dentre os quais, o carvão pulverizado, que é comprovadamente um bom substituinte parcial do coque carregado nos Altos Fornos. A injeção de carvão pulverizado (pulverized coal injection - PCI) propicia um maior retorno econômico, quando utilizado no processo de fabricação do ferro-gusa, pois permite uma maior capacidade da taxa de injeção ao se comparar com o emprego de óleos, gases e outros substituintes. No processo da injeção de carvão, conforme o objetivo do presente trabalho, se faz necessária uma baixa variabilidade (relação da taxa de carvão real com o *set point* pedido). A utilização da metodologia (Six Sigma) foi de fundamental importância para as principais ações adotadas, e trouxeram como principais resultados, estabilidade nos processos de moagem e injeção, bem como a redução do desvio da taxa de injeção de 16% para 10%, gerando uma economia para a Ternium BR.

**Palavras-chave:** PCI; Hidrocarbonetos; Ferro Gusa; Injeção de carvão; Variabilidade.

### REDUCTION OF THE VARIATION IN THE RATE OF PULVERIZED COAL INJECTION IN THE TERNIUM BR'S BLAST FURNACES

### Abstract

The use of coke as fuel in Blast Furnaces is necessary, despite the environmental constraints and the costs involved. To reduce the amount of coke used in the process, measures such as the injection of hydrocarbons are adopted, among which, the pulverized coal, which is proven a good partial substitute of coke loaded in the Blast Furnaces. Pulverized coal injection (PCI) provides a greater economic return, when used in the manufacturing process of pig iron, which allows a greater capacity of the injection rate when comparing with the use of oils, gases and other substituents. In the process of coal injection, according to the objective of the present work, it is necessary a low variability (ratio of the actual coal rate with the requested set point). The use of the methodology (Six Sigma) was of fundamental importance for the main actions adopted, and brought as main results, stability in the grinding and injection processes, as well as the reduction of the deviation of the injection rate from 16% to 10%, generating an economy for Ternium BR.

**Keywords:** Pulverized coal injection; Coal Rate; Deviation.

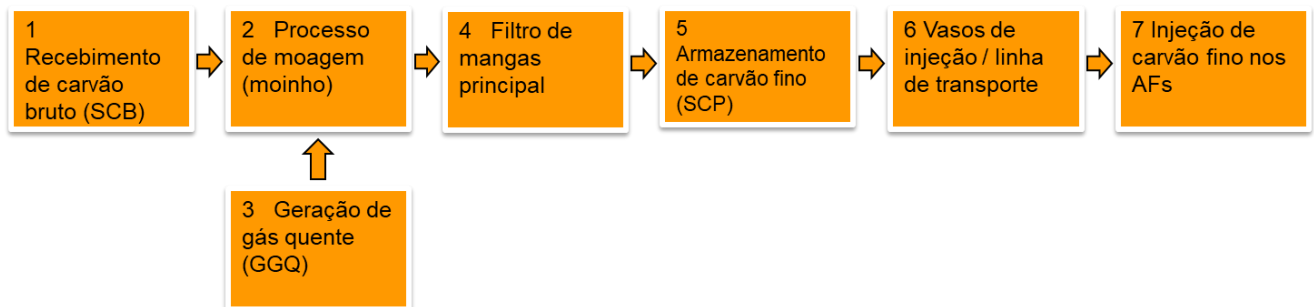
<sup>1</sup> *Licenciatura em Computação Assessor de Processos, Unidade Técnica dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

- <sup>2</sup> *Engenheiro de Automação, Engenheiro Especialista de Automação, Manutenção dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>3</sup> *Técnico em Mecânica, Técnico Especialista de Mecânica, Manutenção dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Engenheiro Metalúrgico, Coordenador Unidade Técnica Alto Forno e Sinterização, Unidade Técnica da Redução, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil*
- <sup>5</sup> *Gestão de Produção, Coordenador de recebimento de matérias primas, Operação dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Técnico em Metalurgia, técnico especialista de operação, Operação dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>7</sup> *Engenheiro Químico, Engenheiro de Processo, Unidade Técnica dos Altos Fornos, Ternium Brasil Ltda., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

O Alto Forno é um processo contínuo de produção de ferro-gusa, com temperatura em torno de 1500 °C a partir do minério de ferro, e outros insumos como o carvão mineral. Isso é possível ao se fazer uma corrente de gás quente passar contra a carga que é constituída por camadas de carga metálica e coque. O carbono presente no coque tem dois objetivos: Combinar-se com o oxigênio do minério de forma a liberar o ferro metálico, gerar calor para as reações químicas em alta temperatura (o que possibilita a redução do minério de ferro em ferro-gusa).

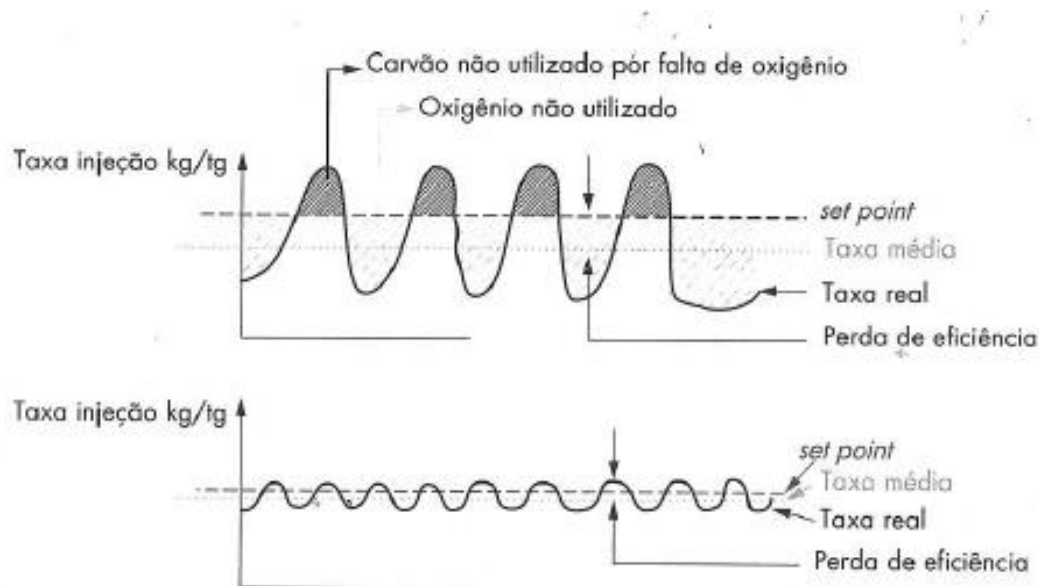
A utilização de coque em Altos Fornos é necessária, apesar das restrições ambientais e dos custos envolvidos. Para diminuir a quantidade de coque utilizado no processo, são adotadas medidas como a injeção de hidrocarbonetos, dentre os quais o processo de injeção de carvão pulverizado (pulverized coal injection - PCI), substituindo parcialmente o coque carregado pelo topo do Alto Forno e aliviando os equipamentos do carregamento. A injeção de carvão pulverizado (PCI), tem seu início na moagem de carvão. De acordo com o fluxograma, representado na Figura 1, o carvão bruto é armazenado no silo de carvão bruto, esse material é transportado deste silo para o interior do moinho, com o auxílio do gás oriundo do gerador de gás quente, este carvão é levado para o filtro de mangas principal, onde ocorre a separação de gás e pó (carvão fino). Após esse processo, o carvão fino é armazenado no silo de carvão fino. Que a partir daí segue para os vasos de injeção para ser injetado nos Altos Fornos. O carvão pulverizado propicia um maior retorno econômico, quando utilizado no processo de fabricação do ferro-gusa, pois permite a maior capacidade da taxa de injeção ao se comparar com o emprego de óleos, gases e outros hidrocarbonetos. O que resulta no aumento da produção e melhora das condições ambientais e econômicas do processo siderúrgico do setor de produção do coque (coqueria) e dos altos-fornos como um todo.



**Figura 1.** Fluxograma adaptado da planta de moagem e injeção

É de vital importância para o processo dos Altos Fornos, dentre outros fatores, um baixo desvio da injeção de carvão, pois há uma melhora na eficiência de queima, gerando maior permeabilidade no interior do forno. Conforme a figura 2, quando o desvio é positivo, ocorre a sobra de carvão, sendo conduzido para o ciclone (coletor de pó) e lavador de gases, sem queima efetiva de acordo com situação de processo com problemas. Quando o desvio é negativo, ocorre a falta de carvão e o oxigênio que sobra é desviado para o gás de alto-forno, o que reduz o seu rendimento energético, conhecido como rendimento de CO.

Na obra de Birk Medvedev (1997) são tratados o controle e a estabilidade da vazão de carvão, o controle da pressão de injeção e a avaliação dos vazamentos. Conforme relatado, o comportamento dos vazamentos não é uma ciência exata, sendo um fenômeno aleatório e caótico, e, portanto, de modelagem impraticável, pois não segue uma lei clara de funcionamento. Portanto, para que as ações recomendadas nesta obra sejam efetivas, é necessário que não haja qualquer tipo de vazamento das válvulas do carregamento e alívio do vaso de injeção.



**Figura 2.** Ilustração do desvio da injeção de carvão [2]

A vazão de carvão injetada para a queima nas ventaneiras tem que ser a mais constante possível para assegurar a estabilidade da cinética das reações de combustão, preservando seu equilíbrio estequiométrico da bolsa de ar (Raceway) dos altos-fornos.

Quando se injetam taxas elevadas de carvão (>180 kg/t), sua distribuição uniforme nas ventaneiras e a variabilidade da vazão influenciam na estabilidade do processo do alto-forno porque cada desvio do set-point da taxa de injeção significa uma redução na taxa de substituição, ou seja, parte do carvão ou oxigênio injetado não é queimado.

Dentre os efeitos causados pela variabilidade da injeção de carvão destacam-se:

- Aumento na geração de pó no topo do alto-forno;
- Elevação no FR devido instabilidade do processo do alto-forno (queima indevida);
- Aumento no custo final da produção;
- Piora na eficiência de combustão;
- Piora do controle do nível térmico.

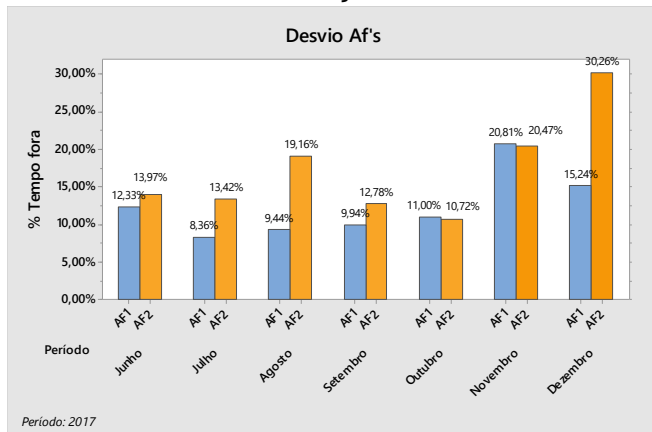
Abaixo, segue a tabela 1, que representa a característica do carvão fino. Está de acordo com os parâmetros utilizados nas moagens da Ternium BR.

**Tabela 1.** Característica típica do carvão fino

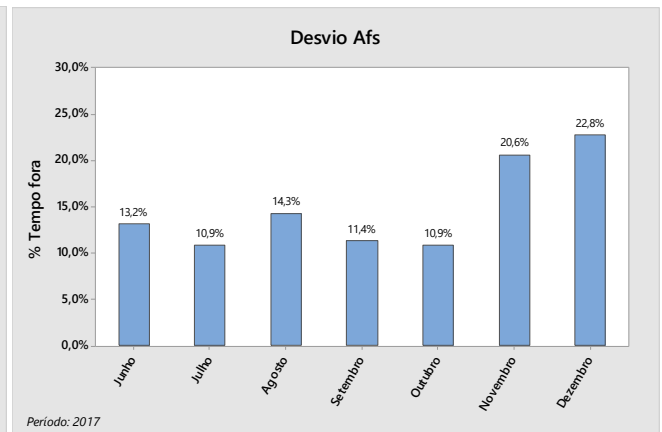
| Granulometria  | Umidade | Temperatura Saída - moinho | Cinzas | Matéria volátil |
|----------------|---------|----------------------------|--------|-----------------|
| 100 % < 0,5 mm | 0,9%    | 97 °C                      | 10,2 % | 20,9 %          |
| 80% < 0,09 mm  |         |                            |        |                 |

### 1.1 Desvio Histórico da injeção dos Altos Fornos

Conforme ilustrado abaixo nas figuras 3 e 4 encontra-se a variação do carvão (taxa de injeção real em relação ao *set point*). Sendo possível observar a alta variação de carvão durante a avaliação. Período observado no ano de 2017.



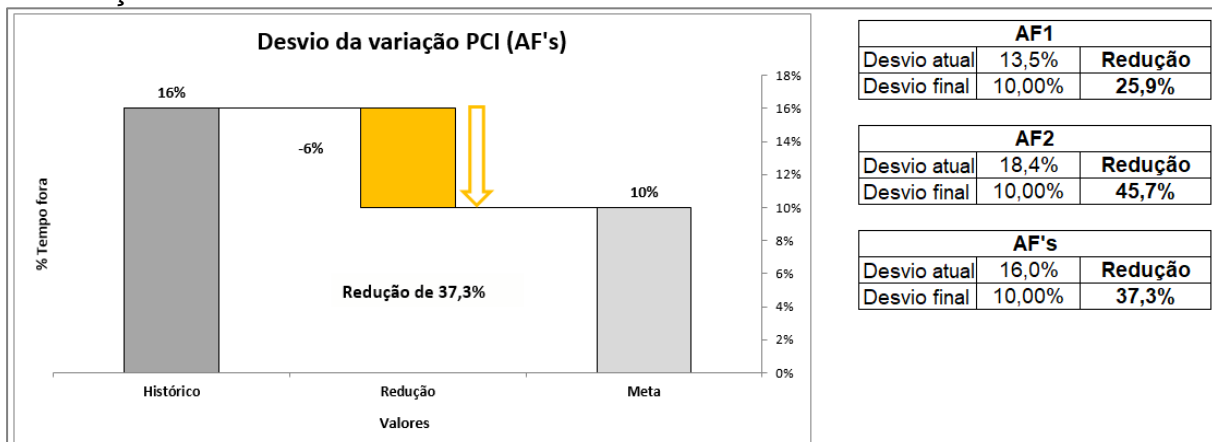
**Figura 3.** Média de desvio por AF AFs



**Figura 4.** Média do desvio dos AFs

### 1.2 Meta do projeto

Redução de 37,1% na variação de carvão (considerando os dois AF's) obtendo 6% de redução do total da variação existente, conforme ilustrado na figura 5. A tabela ao lado, evidencia o desvio de forma separada por Alto Forno e o potencial de redução.



**Figura 5.** Análise da meta do projeto.

### 1.3 Relação baixo desvio x redução de FR

Em conformidade com as figuras 06 e 07, é possível observar que, ao passo em que se alcança menores desvios na injeção de carvão, também se torna possível a redução do CR e FR.

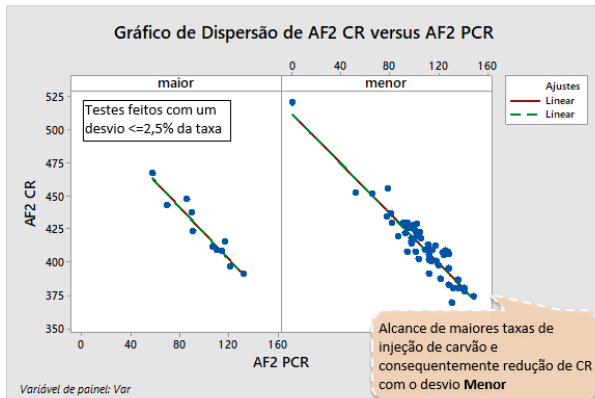


Figura 6. Baixo desvio x redução de CR

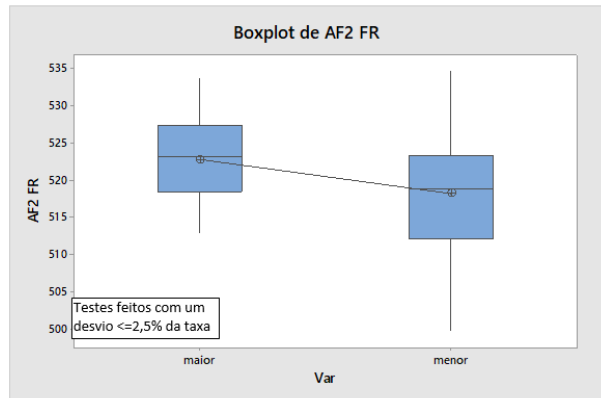


Figura 7. Boxplot de FR x desvio de PCI

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Estratificação da alta variação

A medição é realizada através de (*tags online*) retiradas do sistema de nível 1 dos Altos Fornos no PCI (Injeção de carvão pulverizado).

Foi criada uma tela no sistema de automação dos altos fornos (BF CALC), que se trata de um software próprio da Ternium BR, conforme figura 8 abaixo, para então ser disponibilizado para a operação realizar a coleta de dados diariamente. A ideia deste indicador é coletar os motivos que levam o desvio da injeção de carvão ter aumento, violando seus limites permitidos.

O indicador tem como meta 2,5% de desvio e os pontos fora serão levantados e analisados (desvio >2,5% nos limites, inferior e superior).



Figura 8. Acompanhamento da operação via sistema BF CALC



Houve também a criação de uma tela de verificação no sistema de nível 1 dos Altos Fornos, conforme ilustrado abaixo na figura 9.

Com esta tela, é possível validar a métrica de controle (gráfico com coleta automática dos dados de 4 e 4 horas) para cada tipo de controle de injeção, Fifo, Filter e Cabloc.

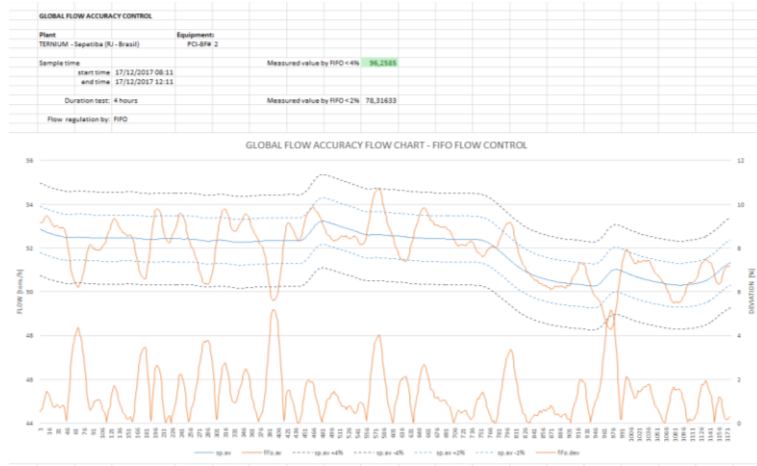


Figura 9. Tela de controle no sistema de nível 1 dos Altos Fornos

## 2.2 Identificação dos problemas

Durante um estudo de pesquisa da equipe de PCI junto ao fabricante, foram constatados alguns problemas na planta que influenciam na variabilidade da injeção de carvão. Dentre os quais se destacam:

### 2.2.1 Posicionadores das válvulas de controle dos vasos de injeção

De acordo com a figura 10, estratificada abaixo, foi percebida uma dificuldade de alcance do valor setado para o valor real.

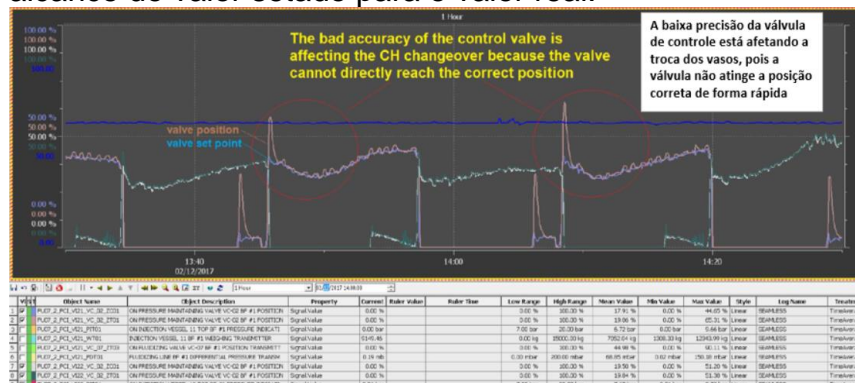


Figura 10. Controle incorreto das válvulas de manutenção da pressão dos vasos de injeção

## 2.2.2 Posicionadores das válvulas de controle dos vasos de injeção

A figura 11 (abaixo) relata uma flutuação no controle da fluidização, o que dificulta o controle. Com essa flutuação, o transporte do carvão pela linha de transporte se torna mais difícil, contribuindo assim para um maior desvio da injeção de carvão.

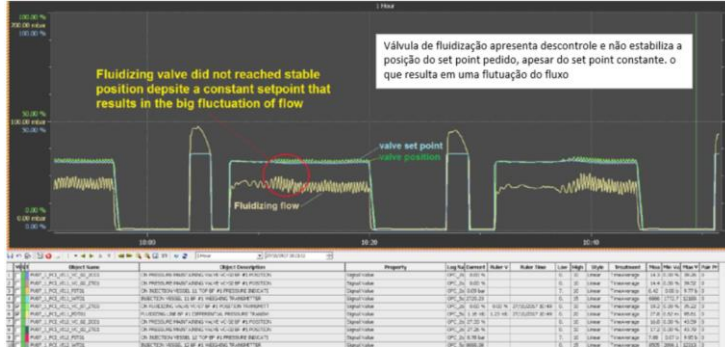


Figura 11. Controle incorreto das válvulas de fluidização

## 2.3 Mapeamento do processo

Com o mapeamento do processo (Figura 12.) Durante o detalhamento das entradas e saídas do processo, é possível identificar todas as possíveis causas dos problemas.

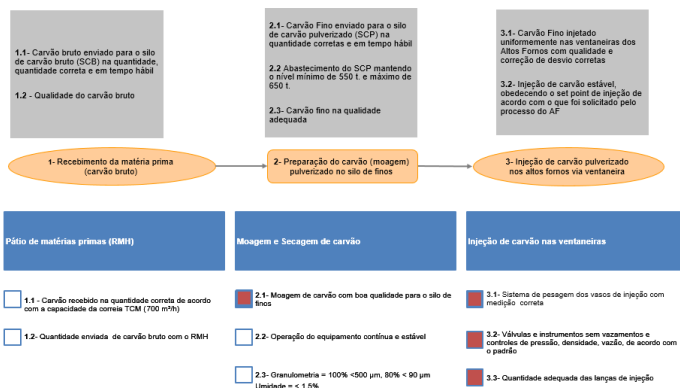


Figura 12. Mapa de processo

## 2.4 Qualificação da importância das causas potenciais prioritárias

Testes realizados para comprovar com fatos e dados a relação entre as causas e o efeito (resultado/indicador). **ANOVA** – Figura 13.

A figura 10 retrata a relação entre o desvio e a taxa de injeção. Conforme o aumento da taxa de injeção (>23t/h), se torna mais fácil o controle na linha de transporte.



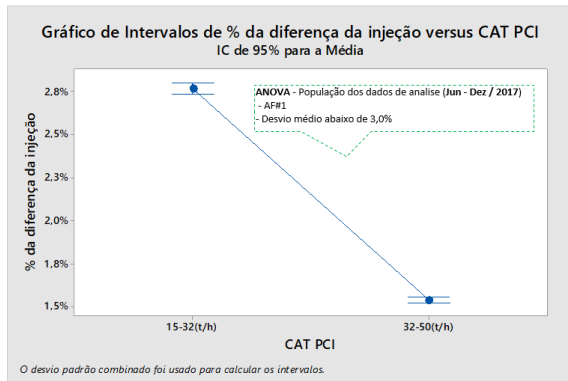


Figura 13. Relação entre o desvio e a taxa de injeção

## 2.5 Ações realizadas para a redução da variação da injeção de carvão

2.5.1 Criação da carta de controle no sistema BF CALC (acompanhamento operacional online) – Figura 14.

A carta de controle, que coleta dados online do sistema de automação, é capaz de auxiliar o operador nas tomadas de decisão para a regularização do desvio da injeção de carvão.



Figura 14. Carta de controle – sistema BF CALC

2.5.2 Melhora no controle de lanças de injeção de carvão (aumento da disponibilidade de lanças) – Figura 15. Com a mudança na filosofia de controle de lanças, obteve-se um significativo aumento da disponibilidade das lanças para a injeção de carvão.

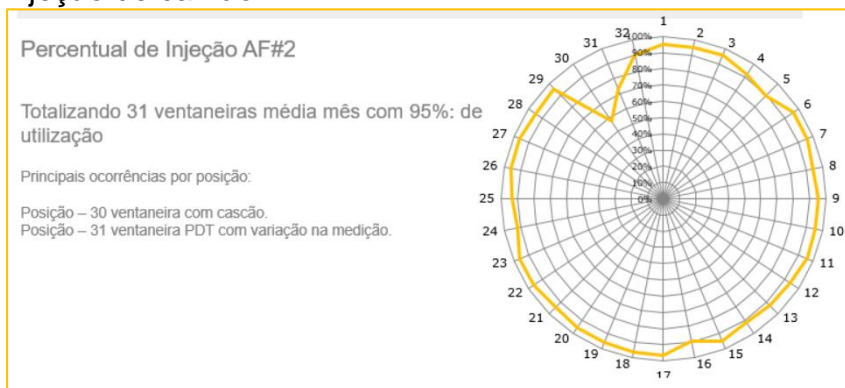
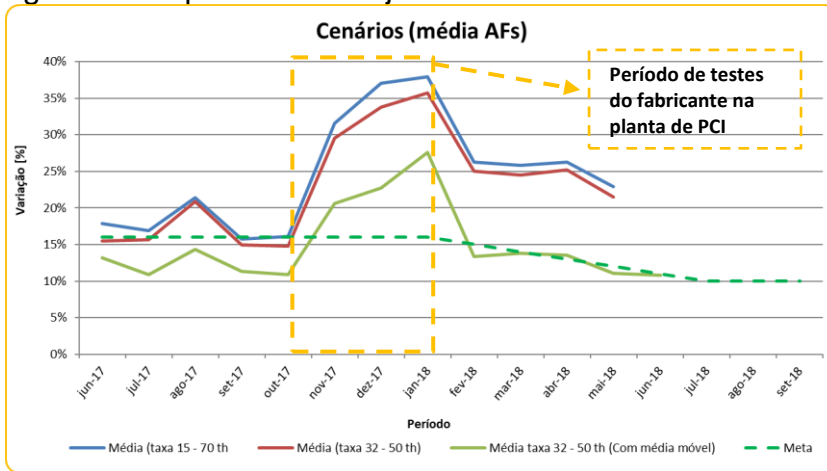


Figura 15. Controle de lanças de injeção de carvão

### 2.5.3 Utilização do cálculo com média móvel.

Com o cálculo acrescentando a média móvel, é possível identificar o momento exato em que a variação começa a aumentar, conforme a figura 16, auxiliando a equipe e agilizando o processo de ajuste do desvio.



**Figura 16.** Adequação dos cálculos utilizando a média móvel para melhor percepção da elevação da variação da injeção.

### 2.5.4 Equação da variabilidade da injeção de carvão

Conforme ilustrado na figura 17, a equação da variação é composta pelos seguintes dados:

2.5.4.1 – Taxa real ajustada

2.5.4.2 – Set point

2.5.3.3 – Contadores

|    | A                | B     | C        | D     | H                        | I      | J  | L             |
|----|------------------|-------|----------|-------|--------------------------|--------|----|---------------|
| 1  | Data             | Real  | Real / a | SP    | % da diferença da injeçã | Contad | AF | Desvio Padrão |
| 2  | 20/06/2017 18:57 | 44,01 | 42,94    | 43,89 | 2,2%                     | 0      | 1  | 0,025         |
| 3  | 20/06/2017 18:58 | 43,88 | 43,33    | 43,76 | 1,0%                     | 0      | 1  |               |
| 4  | 20/06/2017 18:58 | 43,66 | 43,76    | 43,73 | 0,1%                     | 0      | 1  |               |
| 5  | 20/06/2017 19:00 | 43,69 | 43,80    | 43,74 | 0,1%                     | 0      | 1  |               |
| 6  | 20/06/2017 19:01 | 43,66 | 43,78    | 43,83 | 0,1%                     | 0      | 1  |               |
| 7  | 20/06/2017 19:02 | 44,06 | 43,79    | 43,96 | 0,4%                     | 0      | 1  |               |
| 8  | 20/06/2017 19:03 | 43,72 | 43,76    | 43,99 |                          |        |    |               |
| 9  | 20/06/2017 19:04 | 43,86 | 43,80    | 43,82 |                          |        |    |               |
| 10 | 20/06/2017 19:05 | 43,98 | 43,86    | 43,67 | 0,4%                     | 0      | 1  |               |
| 11 | 20/06/2017 19:06 | 43,25 | 43,77    | 43,78 | 0,0%                     | 0      | 1  |               |
| 12 | 20/06/2017 19:07 | 42,85 | 43,53    | 43,91 | 0,9%                     | 0      | 1  |               |
| 13 | 20/06/2017 19:08 | 42,51 | 43,29    | 43,74 | 1,0%                     | 0      | 1  |               |
| 14 | 20/06/2017 19:09 | 43,56 | 43,23    | 43,85 | 1,4%                     | 0      | 1  |               |
| 15 | 20/06/2017 19:10 | 43,70 | 43,18    | 43,77 | 1,4%                     | 0      | 1  |               |
| 16 | 20/06/2017 19:11 | 44,05 | 43,34    | 43,88 | 1,3%                     | 0      | 1  |               |
| 17 | 20/06/2017 19:12 | 43,32 | 43,43    | 43,75 | 0,7%                     | 0      | 1  |               |
| 18 | 20/06/2017 19:13 | 43,67 | 43,66    | 43,93 | 0,6%                     | 0      | 1  |               |

Desvio padrão = 2,5%

#### Observações:

- \* O Cálculo é feito com média móvel (média dos 5 últimos resultados) da taxa real;
- \* Os dados são coletados a cada 1 minuto. Extraídos do nível 1 dos Altos Fornos

**Figura 17.** Equação da variação da injeção

2.5.5 Adicionadas às ações supracitadas, ainda se destacam:

2.5.5.1 - Elevação do conhecimento técnico operacional;

2.5.5.2 - Aumento da disponibilidade das moagens;

2.5.5.3 - Solicitação de compra de novas tecnologias para melhora no controle;

2.5.5.4 - Troca dos fluidizadores dos vasos de injeção;

2.5.5.5 - Melhora no controle de acompanhamento da qualidade do carvão

fino;

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Resultados obtidos com a conclusão do projeto:

Após o cumprimento das etapas do projeto, obtiveram-se excelentes resultados, quanto à uma maior disponibilidade de moagens, maior disponibilidade de lanças para injeção, elevação do conhecimento técnico-operacional, entre outros pontos. O que resultou na redução da variabilidade da injeção de carvão de ambos os Altos Fornos.

Tendo como exemplo do resultado do projeto, o Alto Forno 2, obteve o alcance abaixo da meta estipulada, conforme ilustrado abaixo na figura 18.

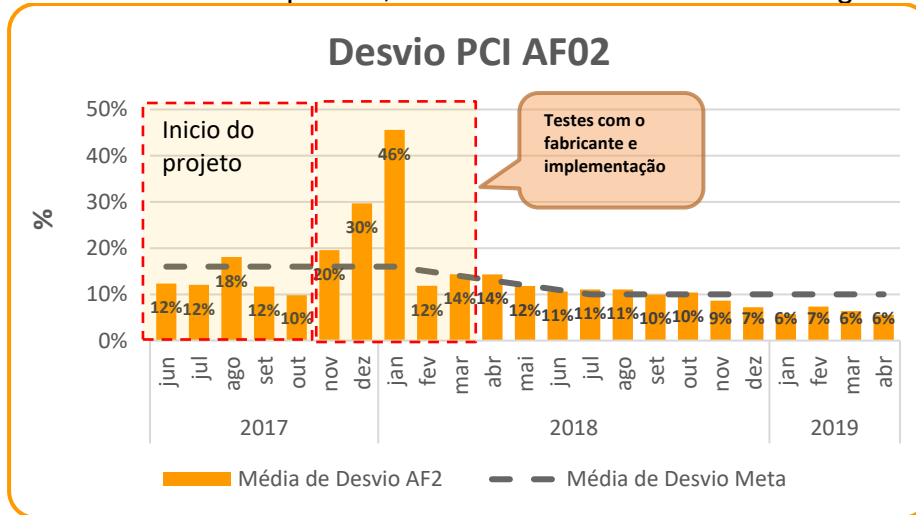


Figura 18. Desvio do Alto Forno 2 (set point em relação a taxa real de injeção)

#### 3.2 Criação do KPI de acompanhamento online para a operação do PCI.

Com a criação do KPI de desvio de injeção, conforme ilustrado na figura 19, o operador pode realizar o acompanhamento online. Sendo possível o ajuste imediato, caso haja algum problema. Desvio no período avaliado = **3,20%**

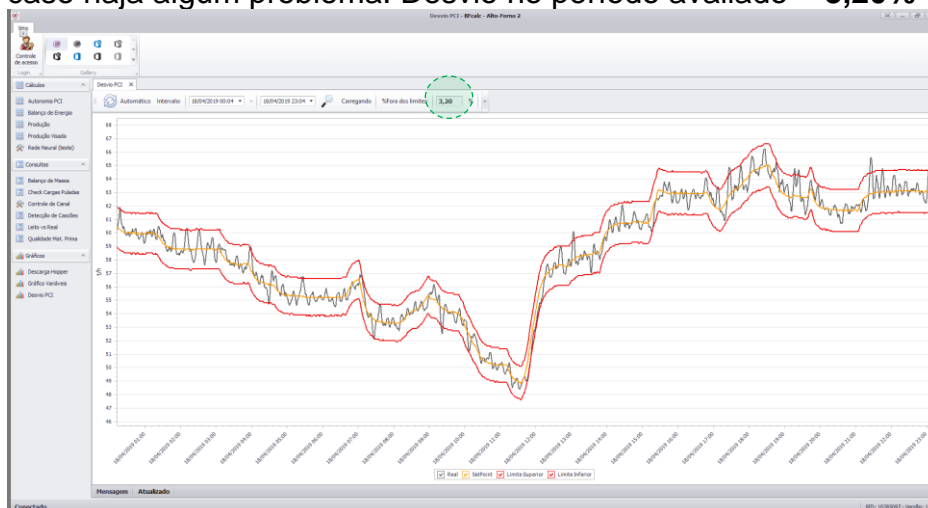
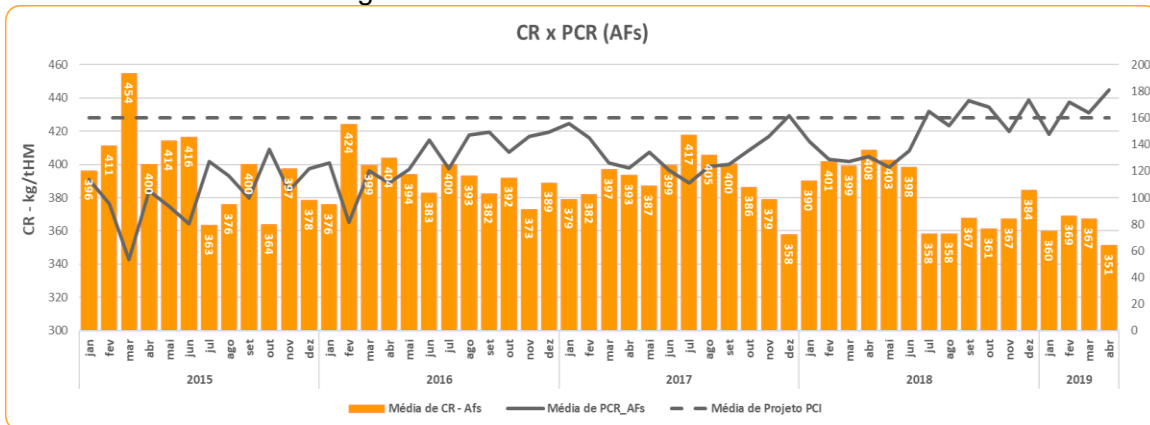


Figura 19. KPI de acompanhamento operacional online. (Desvio da injeção de carvão)

### 3.3 Evolução PCR x CR (Histórico) – Média AF's.

A Ternium Brasil Ltda. vem alcançando, ao longo dos anos, uma evolução, no que tange à redução de custos com combustíveis, bem como melhores resultados na produção do ferro gusa. Com o sucesso do projeto citado neste trabalho, foi possível o alcance de melhores resultados na planta de PCI, que vem mantendo valores acima da capacidade de projeto, a elevação do PCR, tendo como resultante uma redução no Coque Rate dos Altos-Fornos, conforme estratificado na figura 20.



**Figura 20.** Evolução PCR x CR (Recorde alcançado em Abril/19) **CR=351 kg /tHM e PCR=181 kg/tHM**

## 4 CONCLUSÃO

O grande aprendizado alcançado durante as etapas do projeto, bem como os bons resultados obtidos ao final do mesmo, trouxe grande experiência às equipes de engenharia, operação e manutenção. Além de auxiliar na redução de custo do produto final para a Ternium Brasil Ltda.

Com a conclusão do projeto, foi possível alcançar o recorde de PCR e CR, obtidos no mês de abril/2019 (média dos dois AF's)

- CR = 351 kg/tHM
- PCR = 181 kg/tHM

## REFERÊNCIAS

- 1 Manual de operação do PCI. Ternium Brasil, revisão 01, 2012
- 2 N. Ricardo Motta. Sistemas de injeção de materiais pulverizados em Altos-Fornos e Aciarias, 2016
- 3 V. Mauro Fernandes. Efeito do tipo de carvão injetado nas ventaneiras do Alto-Forno no consumo de combustíveis (Fuel-Rate), 2007