

APLICAÇÃO DE CONTROLE AVANÇADO NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO CARBONO FIXO EM FUNÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DAS PELOTAS PROCESSADAS EM FORNOS DE PELOTIZAÇÃO*

Priscilla Messias Pereira¹
Alex Dalapicola Veronez²
Leandro Resinentti Zanon³
Wellington Bonelar dos Santos⁴
Maurício do Santos Rocha Junior⁵
Renato Batista Faria Junior⁶
Rodolfo Ribeiro de Souza⁷

Resumo

O processo de pelletização permite que insumos sejam adicionados à mistura resultando em um melhor controle das características físicas, químicas e metalúrgicas desejadas à pelota. O antracito é incorporado como insumo das pelotas como forma alternativa de combustível, tornando a queima mais homogênea, "de dentro para fora", beneficiando à resistência física das pelotas queimadas e visando reduzir o custo com gás natural durante a etapa de queima. Porém a quantidade de antracito não deve exceder um valor ótimo, podendo causar efeito contrário a qualidade física das pelotas. Daí a necessidade de controle apurado da dosagem desse insumo. Sendo a qualidade física e o custo pontos importantes para que a comercialização de pelotas seja satisfatória, o presente trabalho apresenta a implementação de um controle utilizando sistema de controle avançado que aplique, utilizando regressão linear de dados históricos, a relação ótima entre a dosagem de antracito e minério (respeitando a qualidade física das pelotas durante o processamento em fornos de pelletização). Com a implementação do controle, é possível ajustar a dosagem de antracito de forma automática, medido em percentual de carbono fixo na mistura, quando o processo se mostra capaz, reduzindo assim a consumo específico de gás natural.

Palavras-chave: Carbono fixo; Pelotização; Compressão; Sistema de controle avançado.

APPLICATION OF ADVANCED CONTROL IN THE PROCESS OF OPTIMIZATION OF FIXED CARBON IN FUNCTION OF THE PHYSICAL QUALITY OF PELLETS PROCESSED IN PELLETIZING FURNACES

Abstract

The pelletizing process allows inputs to be added to the mixture resulting in better control of the physical, chemical and metallurgical characteristics desired by the pellet. Anthracite is incorporated as input of the pellets as an alternative form of fuel, making the burning more homogeneous, "from the inside out", benefiting the physical resistance of the burned pellets and aiming to reduce the cost of natural gas during the stage of hardening. However, the amount of anthracite should not exceed an optimum value, which may cause an adverse effect on the physical quality of the pellets. Hence, it is very important an accurate control of the coal dosage. Based on that, the present study presents the implementation of a control using advanced control system that applies, using linear regression of historical data, the optimum relationship between anthracite and ore (respecting the physical quality of the pellets during processing in pelletizing furnaces). After the implementation of this control, it was possible to adjust the anthracite dosage automatically, measured in percentage of fixed carbon in the mixture, when the process is able, thus reducing the specific consumption of natural gas.

Keywords: Fixed carbon; Pelletizing; Compression; Advanced control system.

¹ Eng. de Minas, Mestre, Engenheira de processos, Unidade Técnica Pelotização, Vale, Vitória, ES, Brasil.

² Técnico em Automação Industrial, Técnico Especializado de Processo II, Unidade Técnica Pelotização, Vale, ES, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro, Unidade Técnica Pelotização, VALE, Vitória, ES, Brasil.

⁴ Técnico em metalurgia, ETFES – Escola técnica federal do ES, Técnico especializado em produção, Unidade Técnica Pelotização, Vale, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

⁵ Eng. Elétrica, Analista de Automação, Unidade Técnica Pelotização, Vale, Nova Lima, MG, Brasil.

⁶ Graduando em Engenharia Elétrica, Estagiário/Análise de Processo, Unidade Técnica Pelotização, Vale, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil.

⁷ Ensino médio, Assistente administrativo, Unidade Técnica Pelotização, Vale, Vitória, ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

Durante operação das usinas de pelletização de tubarão em Vitória-ES, o setpoint de dosagem de antracito é definido pelo engenheiro de processos e alterado manualmente pelo técnico de sala de controle de acordo com a análise feita. Durante um projeto de melhoria contínua de redução do consumo específico de gás natural em duas usinas Vale, uma das causas levantadas foi o tempo elevado para análise e alteração dessa dosagem de antracito, tanto em momentos estáveis do processo, quando redução em momentos críticos de qualidade física. Portanto uma equipe foi formada para solução do problema utilizando a metodologia do PDCA.

Este trabalho tem por objetivo a criação e implementação de um controle avançado que faça a avaliação e aplicação automática da relação ótima entre a dosagem de antracito e minério de ferro respeitando a qualidade física das pelotas durante o processamento em fornos de pelletização. Buscou-se com o trabalho a melhoria da qualidade física das pelotas queimadas e a redução de custos com gás natural, realizando a inversão da matriz energética de gás por combustível sólido.

1.2 Revisão da literatura

Conceitualmente, a pelletização consiste na mistura úmida de finos de minério de ferro concentrados na fração menor que 0,149mm com quantidades pré-definidas de aglomerante, óxidos básicos, e energéticos, seguida de rolamento em disco ou tambor, que pela ação da tensão superficial de capilaridade, promove a formação de um aglomerado esférico de tamanho entre 8 e 18mm, as pelotas, que depois de submetidas a um tratamento térmico específico, apresentam elevada resistência mecânica ao manuseio, e propriedades metalúrgicas superiores, quando submetidas ao processo de redução [1].

As pelotas de minério de ferro são aglomerados de finos de minério de ferro, e é uma importante matéria-prima na produção de aço em alto-forno e fornos de redução direta. Os fornos de pelletização, como o de grelha móvel, são utilizados no processo de endurecimento das pelotas, onde o objetivo é aumentar a resistência mecânica da pelota para que a mesma resista ao manuseio nos processos de estocagem e transporte [2] O processo de pelletização permite que insumos sejam adicionados à mistura resultando em um melhor controle das características físicas, químicas e metalúrgicas desejadas à pelota. A adição desses insumos (combustível sólido, fundente e agente aglomerante), também tem o intuito de otimizar a produção e reduzir o consumo de combustível na etapa de queima.

As principais finalidades da utilização desses insumos ao pellet feed, são:

Carvão mineral (antracito): introdução de energia térmica ao processo para o endurecimento da pelota, proporcionando uma perfeita distribuição de calor no interior da mesma, durante a etapa de queima. Isso favorece a cinética das reações de sinterização das partículas de minério entre si e formação de fases escoriçadas, contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como aumento de produtividade do processo. Adicionalmente, proporciona, ainda, significativa redução do consumo de óleo combustível ou gás natural do forno. A dosagem de carvão, normalmente varia de 13 a 17 kg/tonelada de pelotas produzidas em misturas para o processamento de minérios hematíticos. No caso de minérios

magnetíticos, a dosagem depende do tipo de forno utilizado para a queima das pelotas [1];

Fundente (calcário): fornece o óxido de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) necessário ao processo de endurecimento da pelota. O CaO é fundamental no processo físico-químico de formação de compostos que irão favorecer a geração de uma ganga ácida a temperaturas mais baixas fortalecendo a ligação entre os grãos de minério. O MgO atuará melhorando as propriedades das pelotas durante o processo de redução, pela formação de gangas com ponto de fusão mais elevados. Sua utilização é desejada para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas as etapas subsequentes [3].

Agente aglomerante (bentonita, aglomerante orgânico e cal hidratada): Tanto a bentonita, o aglomerante orgânico, normalmente a base de carboximetilcelulose ou poliacrilamida, quanto a cal hidratada, hoje empregada em menor escala devido aos riscos inerentes da hidratação, são utilizados como aglomerantes durante a etapa de formação das pelotas cruas nos discos de pelotamento ou tambores. Com a sua utilização, procura-se promover a aglomeração a frio das partículas de minério de ferro, facilitando o pelotamento, bem como a otimização da resistência a seco e a úmido das pelotas cruas. Essa resistência é de extrema importância para garantir que as pelotas ainda cruas resistam ao manuseio e transporte nas correias transportadoras até o forno e durante a etapa de secagem que ocorre durante a queima. Recomenda-se que a resistência seja superior a 1,5 kg/pelota para as pelotas cruas úmidas e superior a 5 kg/pelota para a pelota crua seca [1].

Carvão é o nome dado a diversas rochas sedimentares passíveis de uso como combustível é constituído de um material heterogêneo originado de restos vegetais depositados em águas rasas, protegidos da ação do oxigênio do ar. Com o passar do tempo, esse material (tecido lenhoso, celulose, esporos, géis, algas etc.) sofre parcial decomposição e ação de bactérias, seguindo-se a influência da pressão exercida pelo peso do material que vai sendo depositado (pressão litostática) e do calor. A heterogeneidade na composição do carvão é um marco bastante característico dessa rocha, apresentando variações relevantes com relação às propriedades físicas e químicas. Esse fato é inerente principalmente às fontes de origem (tipos de plantas), e localidade e a idade na qual se encontram os depósitos, que podem apresentar grande diversidade. Quimicamente, o carvão consiste de uma mistura não uniforme de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre entre outros elementos [4].

Do ponto de vista químico, os carvões caracterizam-se pelo alto teor de carbono, normalmente 55% a 95%. De acordo com esse teor, têm-se, dos tipos menos ricos para os mais ricos em carbono: turfa, linhito, hulha (ou carvão betuminoso) e antracito. Um grau de pureza ainda maior que o do antracito seria o da grafita, mas ela não é combustível. Esses tipos de carvão constituem a série dos carvões e traduzem o grau de evolução (*rank*) do processo de transformação da matéria vegetal, ou seja, o grau de carbonificação. Além do *rank*, é também importante, na classificação dos carvões, o *grade*, que é a relação entre a matéria orgânica e a matéria inorgânica na camada. A turfa pode ter de 55% a 60% de carbono; o linhito, de 67% a 78%; a hulha, de 80% a 90%; e o antracito, 96%. O teor de água é alto nas turfás (75%), mas muito menor nos demais carvões (8% a 10%) [5].

O poder calorífico, propriedade fundamental, é inferior a 4.000 kcal (quilocalorias) nos linhitos e turfas, e entre 7.000 e 8.650 kcal nos demais carvões. A turfa tem a característica de permitir claramente a identificação dos restos vegetais.

Assim como uma rocha ígnea é composta de minerais, o carvão é uma rocha sedimentar composta de litótipos e macerais. Os principais litótipos, identificáveis macroscopicamente, são vitrênio, clarênio, durênio e fusênio, que se alternam na forma de lâminas na camada de carvão. O vitrênio forma finos leitões que terminam em forma de cunha. É o litótipo mais liso e mais brilhante. Forma lâminas normalmente de 3 mm a 5 mm de espessura. O clarênio é menos brilhante que o vitrênio e mostra-se finamente estriado. O durênio ocorre em leitões mais esparsos e tem aparência fosca, com superfície rugosa. É, às vezes, muito rico em esporos. O fusênio é fosco, fibroso, friável, semelhante ao carvão vegetal e é o único litótipo que suja as mãos (no carvão vegetal, todo ele suja as mãos [5]).

Os processos que convertem a matéria orgânica em combustíveis, através de diferentes estágios consecutivos, são chamados carbonificação. À medida que a turfa vai sendo soterrada, sua constituição físico-química vai mudando. O teor de carbono vai progressivamente aumentando, enquanto os voláteis (H₂O, CO, H₂, CH₄, ...) vão diminuindo. Desta maneira, a matéria orgânica vai passando pelos distintos estágios de carbonificação ou “rank”. A série evolutiva da matéria orgânica pode ser dividida em quatro partes: turfa, linhito, hulha e antracito. A turfa e o linhito são considerados sedimentos, enquanto a hulha e o antracito são considerados rochas. Porém, somente a hulha é chamada de carvão. Quanto mais próximo do antracito estiver o carvão, maior será o seu “rank” [6]

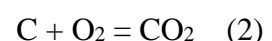
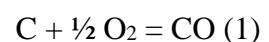
O antracito passou a ser utilizado nos processos de pelotização com o objetivo de reduzir o consumo de combustível (gás natural) nos fornos, combinado com o efeito de se obter uma melhor distribuição de temperatura no interior das pelotas mostrado na figura 1.[7].



Figura 1. Transferência de calor do fluxo gasoso para o leito de pelotas na zona de queima. [1].

As partículas finas de antracito distribuídas no interior das pelotas, ao atingirem a temperatura de reação (Reações 1 e 2), entram em combustão gerando calor do interior para as extremidades das pelotas [3].

- Combustão do Antracito (500 - 800°C):



A relação entre a adição de antracito e o aumento da produtividade é direta, mas existe um limitante que é a resistência mecânica das pelotas hematíticas a partir de certas dosagens. Essa relação é demonstrada na figura 2. No caso de pelotas de hematita, a resistência à compressão aumenta até dosagens próximas a 0,5 % carbono fixo, a qual passa decrescer a partir deste ponto, sendo ainda satisfatória acima de 1,5 % carbono fixo.

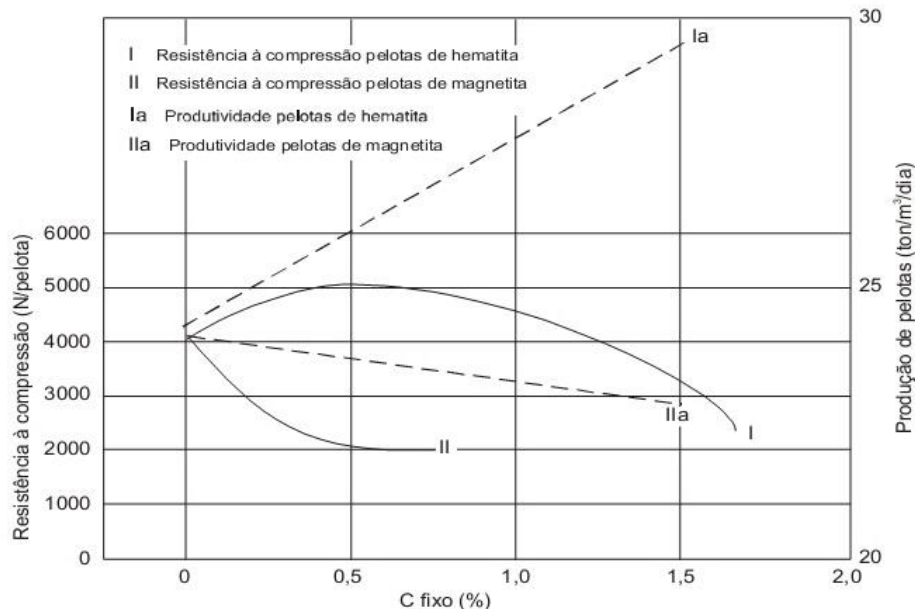


Figura 2. Influência da adição de antracito na resistência à compressão e na produtividade de fornos do tipo grelha móvel [2].

A influência na resistência à compressão, devido à adição de antracito, pode ser explicada pela redução parcial da hematita em magnetita com subsequente reoxidação incompleta da magnetita para hematita. Para adições ainda mais elevadas, pode resultar em uma redução adicional, favorecendo a formação da wustita a qual, dentro do tempo disponível, não se reoxida e forma fayalita ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$), com a sílica presente [2].

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

A base de dados para o trabalho foi coletada no sistema “GPVPE” da Cia Vale SA, onde os dados de laboratório são armazenados, e foram utilizados três meses dos resultados industriais de % carbono fixo na mistura e compressão de uma usina de pelotização de Tubarão.

Os testes para obtenção desses resultados foram realizados da seguinte forma:

- O ensaio de resistência à compressão a frio tem como objetivo avaliar a qualidade física das pelotas queimadas simulando o seu manuseio desde a estocagem até o recebimento pelo cliente. Esse ensaio foi realizado de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4700: 2018 (Determinação da Resistência à Compressão). Para a determinação da resistência à compressão utiliza-se uma amostra de 120 pelotas de cada faixa (faixa menor: $-12,5\text{mm} +10,0\text{mm}$), as quais são avaliadas separadamente. As

pelotas foram ensaiadas individualmente e colocadas sobre uma base, onde um pistão aplica uma força compressiva uniaxial até a ruptura da mesma, para isso foi utilizado uma máquina de compressão. O resultado final é expresso em decanewton (daN) de acordo com o valor médio obtido dos ensaios.

- O % de carbono fixo é obtido da seguinte forma: a mistura coletada no processo é secada, pesada, colocada em cadinhos de porcelana e enviado para a mufla, onde foi submetido a 900°C durante 7 minutos para cálculo do % de voláteis e 750°C durante 8 horas para cálculo do % de cinzas. Encontrados os valores de % de voláteis e % de cinzas o valor do % de carbono fixo é calculado utilizando a fórmula da figura 3.

$$\% \text{Carbono_Fixo} = 100 - (\% \text{Cinzas} + \% \text{Materia_Volátil})$$

Figura 3. Equação para cálculo do % carbono fixo na mistura

Levando em consideração a correlação entre a quantidade de antracito dosada na mistura e a compressão das pelotas queimadas, utilizando o software Minitab versão 18, foi entrada uma regressão linear dos dados obtidos por meios dos ensaios (figura 4). Uma vez encontrada a melhor curva que determina o % de carbono fixo nas pelotas versus compressão foi levado para o sistema de controle avançado.

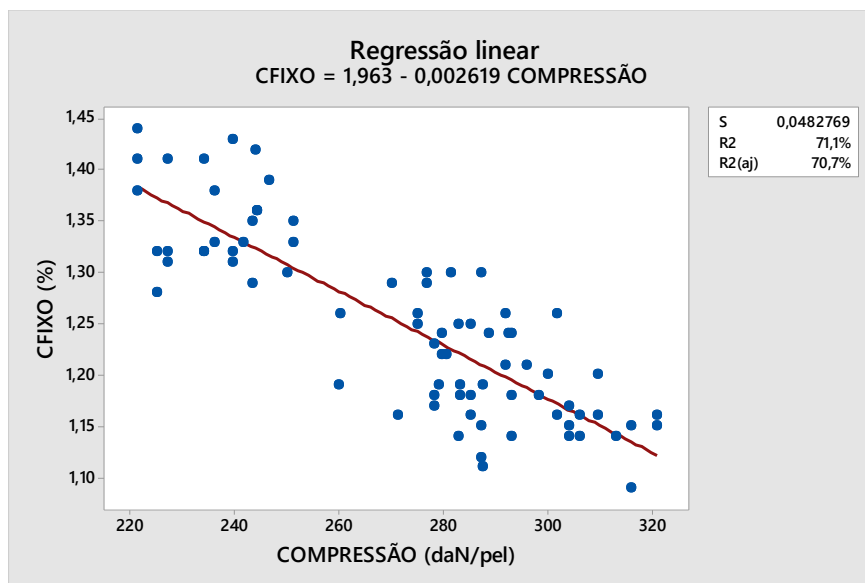


Figura 4. Regressão linear entre carbono fixo de compressão

O sistema especialista utilizado no trabalho foi o OCS (Optimizing Control System) da Metso minerals.

No Controle foram declaradas todas as variáveis necessárias. As principais variáveis são:

- Compressão laboratório;
- Carbono fixo laboratório;
- Setpoint do operador;
- Habilita Controle;
- Carbono fixo target.
- Nível dos tanques de homogeneizadores

Em seguida foram programadas regras para trabalhar as variáveis, adotando uma organização conforme sua função sendo:

- Inicialização

Nesta etapa foram inicializadas todas as variáveis internas utilizadas no controle e foi estabelecido um link de comunicação entre o sistema especialista e o sistema de controle da planta CLP (controlador lógico programável). Foi criada um “watchdog” com a finalidade de monitorar a comunicação e quando necessário proteger os controle regulatório, que nessa caso foi definido que o CLP desabilita o controle avançado em falha de Comunicação.

- Validação de variáveis de controle

O sistema especialista valida, utilizando limites e critérios de comunicação as variáveis que serão utilizadas para controle.

O critério de comunicação provido pelo protocolo de comunicação OPC classifica a qualidade de comunicação em GOOD, BAD, ERROR, INVALID ADDRESS, NOT CONNECTED e UNCERTAIN. A validação por efeito da comunicação entre sistemas ocorre somente se a variável estiver no estado GOOD.

- Análise do estado atual do controle (Smart alarms)

Esta etapa do controle tem como objetivo avaliar se a malha de controle está apta para controlar e ao mesmo tempo habilitada pelo operador. Definidos os tempos de espera e regras para verificação de novo resultado do laboratório para que seja considerado valor “novo” e entrar na média.

- Controle

O objetivo da inclusão de uma regra que manipule o SP(setpoint) do Cfixo relacionado com o resultado médio de compressão é aproveitar momentos de qualidade acima da meta para redução do consumo de gás natural. A equação para cálculo do novo setpoint que será aplicado é: $SP\ Cfixo: ((m\acute{e}dia\ de\ carbono\ fixo - 300) * 0,002) + SP\ Cfixo$

- Aplicação dos setpoints

Nesta etapa o sistema lê os valores atuais dos atuadores e incrementa a saída de acordo com o valor gerado no cálculo do controle. Foram criados limites de processo para a aplicação do setpoint calculado:

- Limite inferior de controle = 1,20
- Limite superior de controle = 1,30

O controle irá aumentar o SP de CFIX somente se todas as alternativas abaixo forem verdadeiras:

- Quando o tempo decorrido de alterações de fatores anteriores estiver terminado;
- Quando o valor de Compressão for atualizado e tiver erro absoluto menor que 2x o erro aceitável
- Quando o SP calculado for maior que o atual

O controle irá diminuir o SP de CFIX somente se todas as alternativas abaixo forem verdadeiras:

- Quando o tempo decorrido de alterações de fatores anteriores estiver terminado;
- Quando o valor de compressão for atualizado
- Quando o SP calculado for maior que o atual

- Avaliação de informações

Nesta etapa foram enviadas informações do novo setpoint de % carbono fixo aplicado para o sistema Process information manager system (PIMS), para fins de estatística e documentação, conforme figura 5.



Figura 5. Tela do PIMS mostrando o registro do setpoint aplicado pelo OCS.

2.2 Resultados e Discussão

Conforme demonstrado na figura 6, o boxplot mostra a elevação do carbono fixo dosado na mistura antes de depois da atuação do controle criado. Houve uma elevação de 7,76% de carbono fixo na mistura. A elevação da variabilidade é função das alterações mais frequentes de setpoint, estamos realizando alterações mais frequentes no processo, porém com base em resultados recentes e de forma automática. Com a atuação do controle foi possível notar a elevação dos resultados de compressão (figura 7) demonstrando os ganhos em relação a qualidade física das pelotas queimadas.

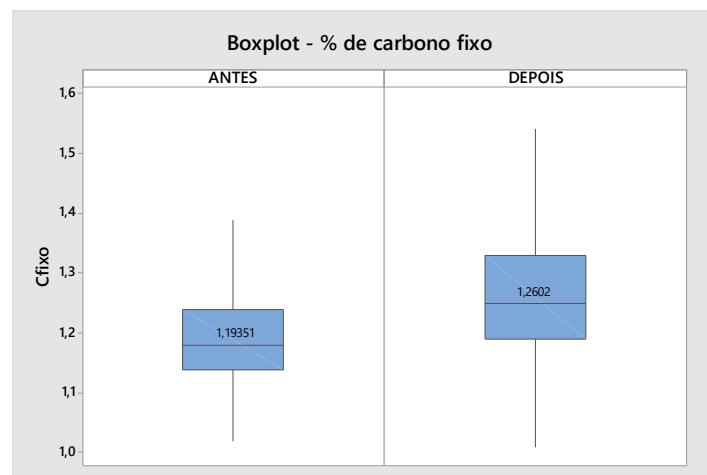


Figura 6. Boxplot do % de carbono fixo na mistura.

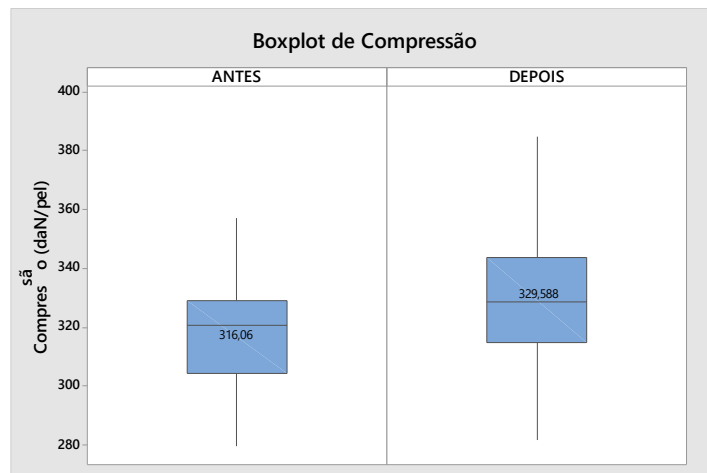


Figura 7. Boxplot dos resultados de compressão das pelotas queimadas.

Os valores capturados com o controle ligado estão demonstrados nas tabelas 1 e 2, e é possível notar a elevação da dosagem de antracito e uma redução do consumo de gás natural. Com a ajuda de curvas teóricas de relação antracito versus gás natural, foi possível calcular o ganho financeiro anualizado do trabalho conforme, conforme tabela 3.

Tabela 1. Consumo específico de gás natural (Nm³/t)

Antes	Depois	Redução
10,66	10,15	0,51

Tabela 2. Consumo específico antracito (Kg/t)

Antes	Depois	Aumento
16,34	17,53	1,19

Tabela 3. Retorno financeiro do trabalho

Ano/usina	R\$1.166.556
-----------	---------------------

Após a implementação do controle é possível notar forte utilização por parte da equipe das operações (figura 8). Isso demonstra que os valores aplicados estão coerentes com as definições de rotina.

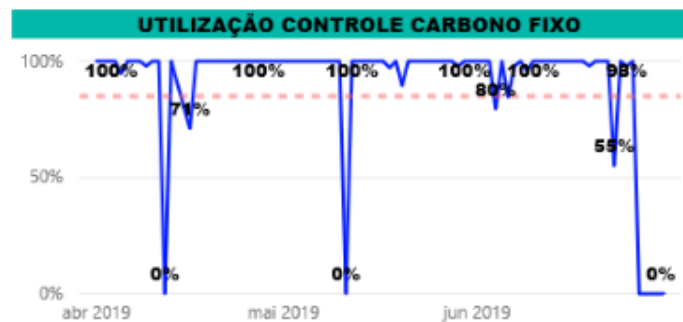


Figura 8. Acompanhamento de utilização do controle

3 CONCLUSÃO

Com a aplicação do controle avançado houve elevação da média de % de carbono fixo na mistura do processo de pelletização durante momentos de estabilidade operacional garantindo assim segurança operacional e respeitando todos os limites configurados. Isso significa que a lógica de controle implementada faz com que o setpoint calculado com a equação encontrada só seja aplicado quando o processo está estável.

A partir da metodologia estabelecida no presente trabalho e das variáveis testadas verificou-se ganhos em qualidade física do produto e ganhos financeiros na pelletização com redução de consumo específico de gás natural por meio da alteração automática do setpoint de % carbono fixo.

REFERÊNCIAS

- 1 Tratamento de Minérios – 5ª Edição/Ed. Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina Alves França - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

- 2 MEYER, K. - Pelletizing of Iron Ores - Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1980.
- 3 FONSECA, M.C. Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta. 2004. (126 f). Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Materiais) - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- 4 ELLIOTT, M. A. Chemistry of Coal Utilization – second supplementary volume, Committee on Chemistry of Coal, 1981.
- 5 Site da CPRM, Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Carvao-Mineral-2558.html>. [acesso em 19 jun. 2019]
- 6 OSÓRIO, E., Utilização de Carvões da Jazida de Chico-Lomã para a Produção de Coque, Porto Alegre, 1997. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materias – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- 7 COSTA, R. V.; Otimização da resistência à compressão de pelotas de minério de ferro para redução direta pela aplicação de projeto robusto. 2008. (113f).