

REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS NOS REGENERADORES DO ALTO-FORNO 3 DA USIMINAS *

Lucas Gonçalves Generoso¹
Carlos Alberto Dias Pereira²
Dennis Miranda Koch³
Claudiney de Freitas Oliveira⁴

Resumo

O sopro de ar quente representa uma parcela significativa da energia do processo de um alto-forno. Os regeneradores são os equipamentos responsáveis pela elevação da temperatura do ar soprado via ventaneiras. O presente trabalho aborda uma diagnose de eficiência energética realizada nos regeneradores do Alto-Forno 3 da Usiminas. Contempla uma avaliação detalhada nos parâmetros de combustão envolvidos, sendo identificados diversos pontos para melhoria da eficiência energética do processo. Assim, foi proposto um plano de trabalho objetivando explorar estas oportunidades. Os resultados obtidos garantiram uma maior estabilidade nos controles operacionais, refletindo numa melhora significativa do consumo de combustíveis e possibilitando uma redução média de 44,1 Mcal/t_{gusa}.

Palavras-chave: Alto-Forno; Regeneradores; Eficiência Energética.

REDUCING FUEL CONSUMPTION IN HOT STOVES OF USIMINAS' BLAST FURNACE #3

Abstract

The hot blast represents a significant amount of the energy necessary in the blast furnace process. The equipment responsible for raising the air temperature to be blown through the tuyeres are the hot stoves. This paper approaches a diagnosis performed in the hot stoves of Usiminas' Blast Furnace #3. It includes an evaluation of every combustion parameter involved in the process. The analysis identified several points to improve process energy efficiency. Therefore, an action plan was proposed aiming to explore these opportunities. In summary, the results ensured greater stability in the operational controls, reflecting an optimized fuel consumption which enabled an average reduction of 44,1 Mcal/t_{hot metal}.

Keywords: Blast Furnace; Hot Stove; Energy Efficiency.

¹ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produção, Gerência-Geral de Redução, Altos-Fornos, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Eletricista, Analista de Processo, Dir. Corp. Engenharia Industrial, Eficiência Energética, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro de Produção, Especialista de Processo, Especialização em Gestão Estratégica da Qualidade, Dir. Corp. Engenharia Industrial, Eficiência Energética, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Técnico Metalurgista, Assistente Técnico Industrial, Gerência Geral de Redução, Altos-Fornos, Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O alto-forno é um reator metalúrgico que tem a função de transformar as matérias-primas (sinter, minério granulado, pelota, fundentes e coque) em gusa líquido, para posterior fabricação de aço. Uma das fontes de calor desse processo é proveniente do sopro de ar aquecido em regeneradores ou *Hot Stoves* (HS). Estima-se que 20% da energia consumida no processo é fornecida pelo ar quente vindo dos regeneradores. Para uma boa performance deste equipamento, é fundamental um bom entendimento e controle dos fenômenos de origem química (combustão) e física (transferência de calor e escoamento de fluido).

Os três regeneradores do Alto-Forno 3 da Usiminas são do tipo *Cowper*, com estruturas de aço cilíndricas revestidas de refratários. Caracterizam-se por terem seu interior dividido em duas câmaras, combustão e regeneração, e um domo na parte superior (figura 1). Trabalham em ciclos alternados de combustão e ventilação com o princípio de correntes inversas, isto é, o ar frio, proveniente do soprador, percorre o caminho inverso dos gases queimados na câmara de combustão. Durante a troca do regime ventilação/combustão, o sistema fica momentaneamente com apenas um HS em combustão. A queima é feita com os gases BFG (*Blast Furnace Gas* – gás de alto-forno) e COG (*Coke Oven Gas* – gás de coqueria), por meio do ar enriquecido com oxigênio. A fumaça resultante percorre a câmara de combustão, chegando até o domo, onde o sentido do seu fluxo é invertido, e segue pela câmara de regeneração, composta por um empilhamento de tijolos refratários. Neste trajeto, os gases que saem da câmara de combustão à temperatura de chama, trocam calor com os refratários da parede, domo e empilhamento e saem para a chaminé.

Em resumo, são dois ciclos principais na operação dos regeneradores:

- 1) Ventilação: onde o ar soprado é aquecido à temperatura de sopro e
- 2) Combustão: quando os refratários dos regeneradores são aquecidos para possibilitar o ciclo de ventilação.

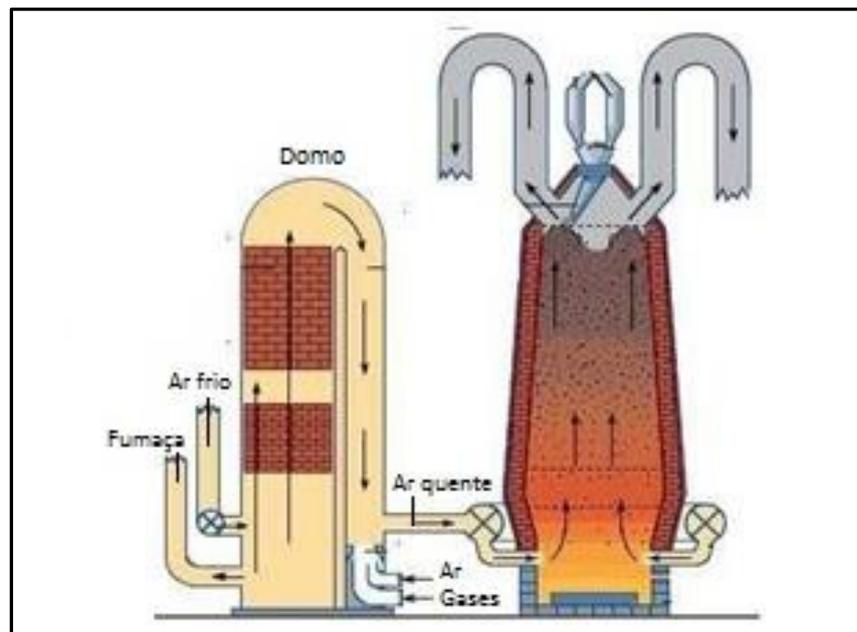


Figura 1. Desenho esquemático do processo de aquecimento de ar.

No atual cenário siderúrgico brasileiro, conjugado com os elevados preços de combustíveis e utilidades, a busca por práticas de eficiência energética é fator preponderante para a empresa manter-se competitiva e ambientalmente correta.

Neste contexto, foi desenvolvido um trabalho multidisciplinar de eficiência energética visando a redução do consumo de energia térmica nos três regeneradores do Alto-Forno 3 da Usiminas. Contemplou-se neste trabalho um estudo de diagnose dos equipamentos, no intuito de identificar soluções que viabilizassem a redução no consumo de combustíveis. As intervenções foram além de apenas resolver problemas pontuais, mas definir padrões e rotinas para sustentação dos resultados e segurança operacional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Diagnose de Eficiência Energética nos Regeneradores

Na Usiminas, o indicador que mede o desempenho dos regeneradores é o Mcal/t gusa, isto é, a quantidade de calor fornecido em megacaloria por tonelada de gusa produzido. Aplicando a ferramenta estatística “Carta de Controle”, figura 2, nota-se que o indicador teve oscilações significativas entre abril/2014 e fevereiro/2016. Estatisticamente, o processo é considerado instável e imprevisível, ou seja, está fora do controle estatístico.

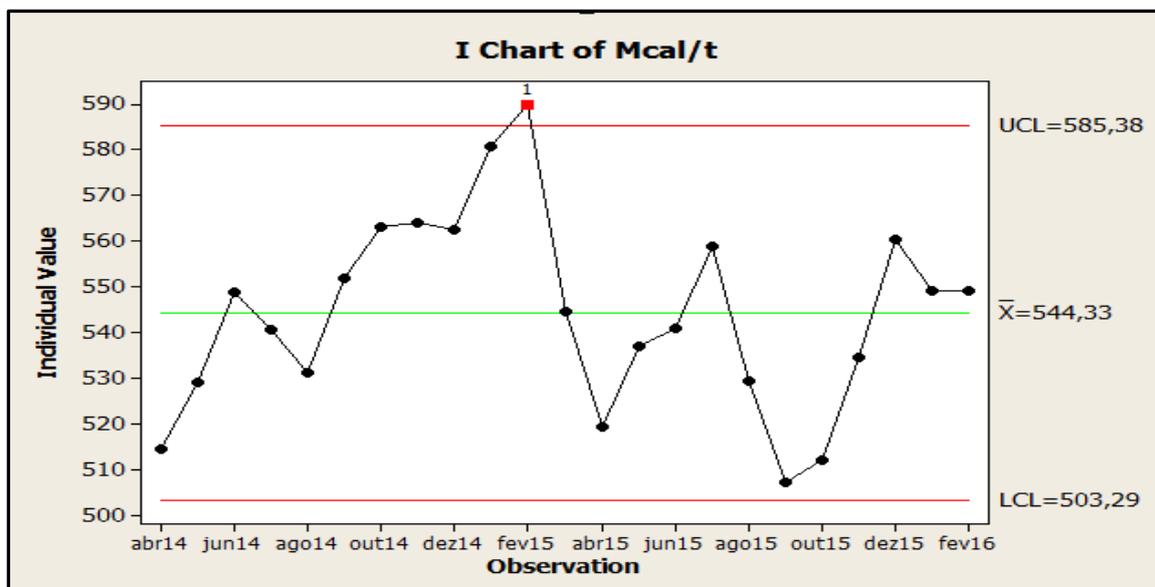


Figura 2. “Carta de Controle” do indicador Mcal/tgusa.

Em outubro/2015, foi formada uma equipe multidisciplinar a fim de otimizar a eficiência energética dos regeneradores do Alto-Forno 3. A equipe composta por profissionais da Instrumentação, Instrumentação analítica, Automação, Operação, Manutenção, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento, Gerência Técnica e Eficiência Energética, seguiu a metodologia de estudo de diagnose identificada na tabela 1. Foi realizada a diagnose no intuito de conhecer as reais condições operacionais dos regeneradores 7, 8 e 9 e identificar soluções e melhorias que viabilizassem a redução do consumo de combustíveis. Além disso, a diagnose possibilitou aprofundar o entendimento sobre o escoamento dos fluidos no interior do equipamento, avaliar as trocas térmicas e possíveis perdas de eficiência do processo, verificar a coerência das medições dos componentes da combustão, identificar o potencial de otimização do processo para estabelecer uma meta de resultado e ainda, a manutenção da estabilidade e segurança operacional.

Tabela 1. Metodologia para diagnose de eficiência energética

Diagnose dos Regeneradores	
Preparativos para diagnose	1ª Etapa
Medição	2ª Etapa
Análise dos resultados	3ª Etapa
Plano de trabalho	4ª Etapa

2.1.1 Preparativos para a diagnose

A primeira fase do trabalho consistiu no planejamento para execução das atividades a serem realizadas. É importante ressaltar que todas as normas de segurança adotadas pela Usiminas foram seguidas na execução deste projeto. Desta maneira, foi realizada uma visita técnica na área dos regeneradores do Alto-Forno 3 para identificação e preparação dos pontos de amostragem para coleta e medição dos efluentes de combustão, gases, ar de combustão e termografia, conforme figura 3.

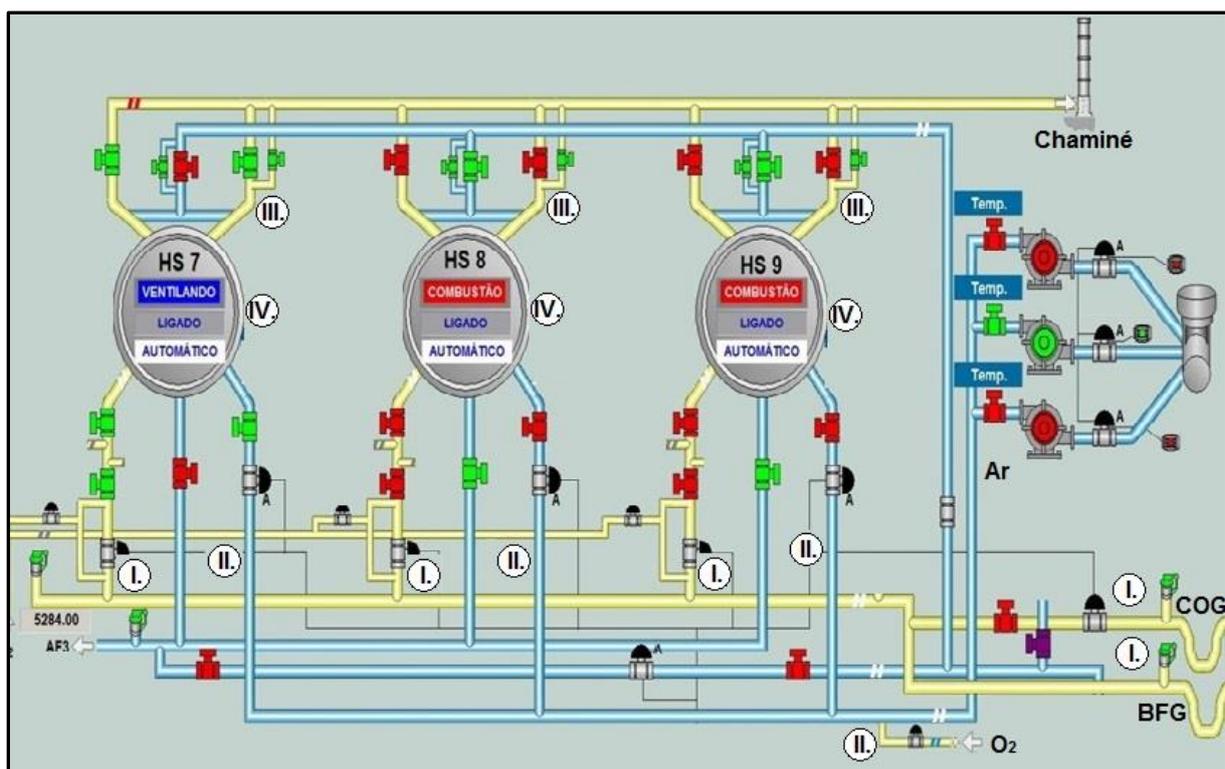


Figura 3. Plano de amostragem para a diagnose.

Para facilitar a coleta de dados, cada etapa foi dividida em 4 itens, identificados na figura 3:

- I. Diagnose na Estação de Mistura dos Gases Combustíveis BFG e COG;
- II. Diagnose na Estação de Injeção de Oxigênio para Enriquecimento do Ar de Combustão;
- III. Diagnose do Sistema de Combustão;
- IV. Termografia na Carcaça dos Regeneradores.

2.1.2 Medição

Para realizar a etapa de medição, foi necessária a criação e adequação de tomadas para coleta dos componentes da combustão. Os equipamentos *Testo* e *Labview* foram utilizados para leitura instantânea e arquivamento das informações. Além disso, foi utilizado o módulo *PI Processbook* do PIMS para criação e monitoramento de outras variáveis envolvidas no processo (*tags*). Por exemplo, pressão de ar para combustão, relação de BFG e COG, relação ar e gás misto (GM), etc.

No intuito de garantir assertividade das amostragens, todos os instrumentos e malhas de medição e controle foram anteriormente aferidos.

I. Diagnose na Estação de Mistura dos Gases Combustíveis BFG e COG

A Estação de Mistura tem como objetivo mixar os gases siderúrgicos BFG e COG a fim de produzir uma mistura gasosa homogênea que atenda às especificações de combustão nos regeneradores, como temperatura de chama, entalpia dos efluentes, radiação luminosa e gasosa, entre outros. Sendo assim, é esperado que na entrada dos queimadores de cada regenerador, o gás combustível apresente características físico-químicas similares, de maneira a não comprometer a qualidade da combustão ou gerar perdas térmicas pelo aumento do fluxo de elementos inertes. Desta forma, foram feitas coletas dos gases BFG e COG, individuais e mistos, em todos os pontos representados por "I" na figura 3.

Os gases foram coletados em um sistema de amostragem padrão (figura 4) e enviados ao Laboratório de Química Analítica do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas para análise cromatográfica, visando obtenção do poder calorífico e densidade. Para maior representatividade nas amostragens, foram coletadas três amostras de cada ponto indicado.



(a) Bombas de sucção

(b) Manômetro

(c) Ampolas de vidro.

Figura 4. Sistema de amostragem padrão dos gases.

II. Diagnose na Estação de Injeção de Oxigênio para Enriquecimento do Ar de Combustão

O emprego da técnica de enriquecimento de oxigênio ou *oxygen enriched combustion* (OEC), em processos de combustão, garante, entre outros benefícios, a elevação da eficiência do processo, ao reduzir a presença de inertes que absorvem e carregam energia desencadeada no processo termoquímico, através dos efluentes da combustão [1]. No entanto, considerando esta técnica nos regeneradores do Alto-Forno 3, algumas premissas devem ser satisfeitas:

1. Homogeneização minimamente aceitável entre ar e oxigênio para garantir estabilidade da combustão [2].
2. Garantia da assertividade das medições e do sistema de controle.

Desta forma, para a diagnose, foi projetada uma sonda de 1.200 mm de comprimento e 0,5" de secção circular, conforme figura 5, para medição do oxigênio enriquecido no ar. As medições foram feitas nos pontos representados por "II" na figura 3. De forma planejada e controlada, oscilou-se o valor de enriquecimento do ar de combustão de maneira a possibilitar a medição das alterações, via analisadores portáteis de efluente.

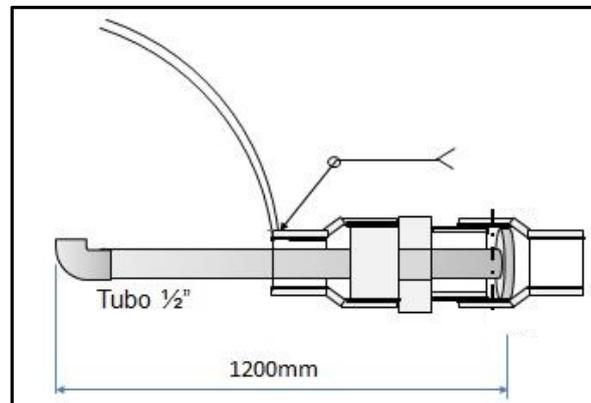


Figura 5. Sonda projetada para medições na estação de enriquecimento de ar para combustão.

III. Diagnose do Sistema de Combustão

Para avaliar a eficiência do sistema de combustão é fundamental conhecer os valores dos efluentes, monóxido de carbono (CO) e oxigênio (O₂), presentes na fumaça. Sabe-se que excesso de CO nos efluentes indica perda de eficiência por combustão incompleta e redução da temperatura de chama [3]. Por outro lado, excesso de O₂ também representa perda de eficiência pela redução da temperatura de chama devido maior participação de gás inerte (N₂) presente no ar de combustão [4].

Para análise no sistema de combustão dos regeneradores foram inspecionadas as câmaras de combustão de cada HS através de videoscopias. Além disso, foram utilizados analisadores portáteis e transmissores de pressão para acompanhamento instantâneo dos efluentes da fumaça nos pontos representados por "III" na figura 3. Os dados coletados foram confrontados com os dados dos analisadores fixos existentes no equipamento.

IV. Termografia na Carcaça dos Regeneradores

A termografia é um método avançado de teste não destrutivo. O uso de um conjunto de instrumentos sensíveis à radiação infravermelha permite visualizar o perfil térmico e medir as variações de calor emitido pelas diversas regiões da superfície de um corpo sem a necessidade de contato físico com o mesmo. A termografia foi realizada com o intuito de identificar *hot spots*, estimar a perda térmica pela carcaça dos regeneradores e alimentar o balanço de massa e energia. Esta análise foi realizada individualmente nos regeneradores que estão representados por "IV" na figura 3.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Resultados da Diagnose

I. Diagnose na Estação de Mistura dos Gases Combustíveis BFG e COG

Os resultados encontrados foram comparados aos parâmetros utilizados no processo via cromatógrafo (BFG) e calorímetro (COG), sendo avaliados os motivos dos desvios entre eles. Os resultados coletados nos pontos “I” indicaram homogeneidade na mistura dos gases BFG e COG, não havendo necessidade de intervenção. No entanto, o poder calorífico inferior (PCI) do BFG e COG apresentaram uma diferença média de 6% e 1,5%, respectivamente, conforme figura 6. Isto pode gerar um efeito em cascata, causando oscilações na temperatura de chama e dificultando o controle operacional.

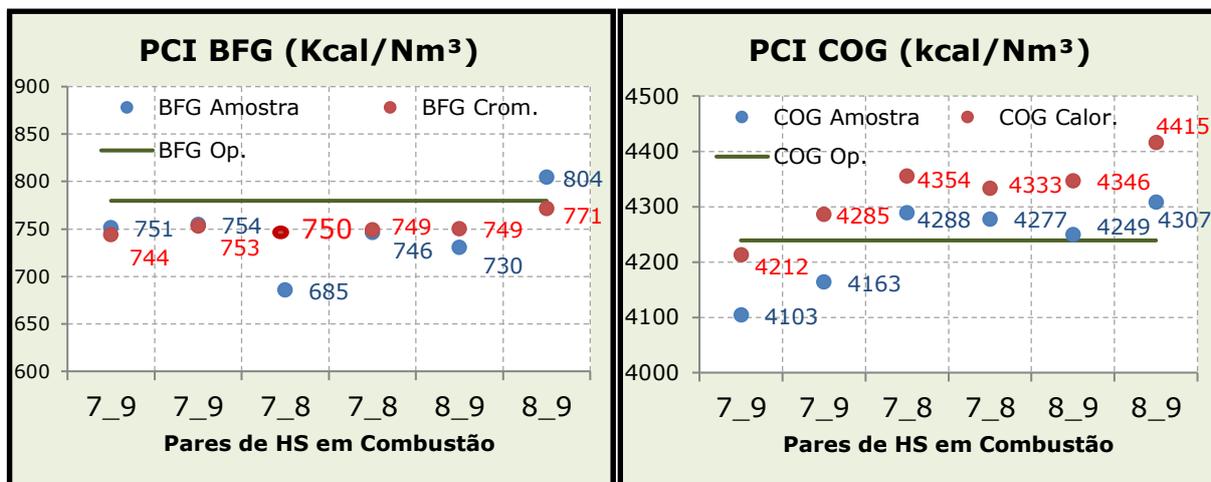


Figura 6. Diferenças encontradas no poder calorífico do BFG e COG.

Outro ponto que merece atenção é a diferença encontrada entre a densidade do BFG, COG e GM amostrados durante a diagnose e utilizados no processo, que chegou a 5%, 9% e 13%, respectivamente. Esta diferença afeta diretamente o controle do poder calorífico do gás e mostra a necessidade da inserção da função de compensação da densidade na medição das vazões. Além disso, foram encontradas variações na pressão de BFG e instabilidade no controle da válvula de COG, criando divergências entre o valor objetivado e medido para a relação BFG/COG.

II. Diagnose na Estação de Injeção de Oxigênio para Enriquecimento do Ar de Combustão

Quanto ao sistema de enriquecimento de ar para combustão, foi observada uma pequena variação de 0,2% entre valor objetivado e o medido de O₂. Um ponto de muita atenção identificado nesta etapa foram as oscilações nos momentos de troca do regime ventilação/combustão dos regeneradores. Existe um atraso no ajuste de válvulas que atrapalha o controle do enriquecimento do ar. Por exemplo, na figura 7 é apresentada a demora no ajuste do O₂ para enriquecimento do ar, resultando em maior o enriquecimento no início da troca e menor no final, fazendo variar a temperatura de chama adiabática.

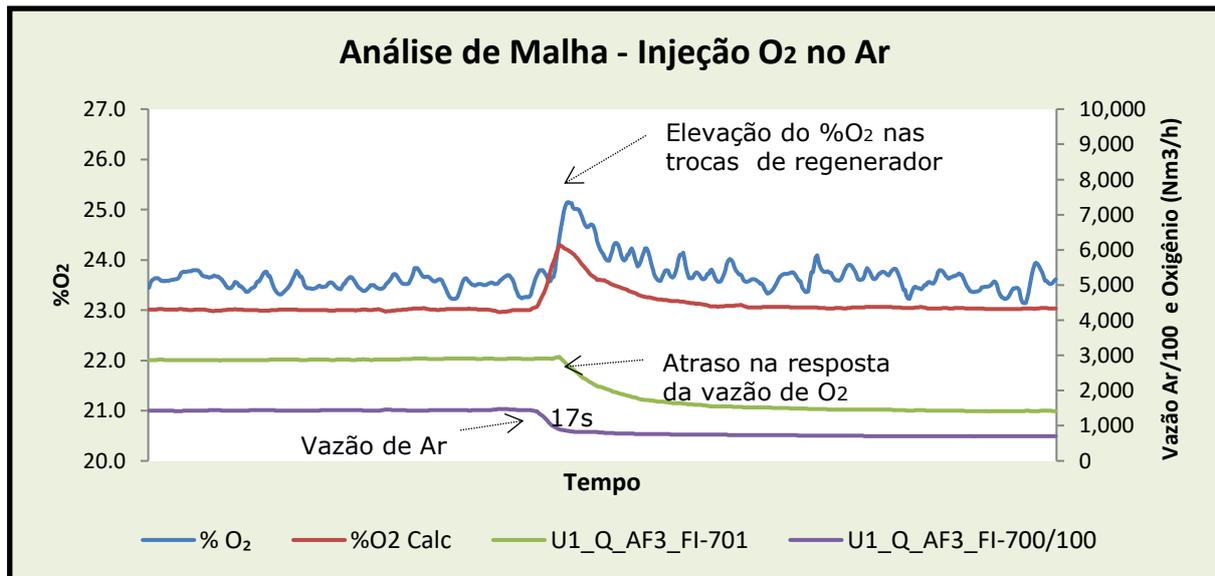


Figura 7. Atraso no sincronismo das válvulas de injeção de O₂ para enriquecimento.

III. Diagnose do Sistema de Combustão

As análises dos efluentes da combustão mostraram teores de CO e O₂ fora das faixas consideradas normais para combustão industrial, cuja referência aproximadamente 1% para O₂ e menor que 2.000 ppm para CO [5]. Algumas medições indicaram valores entre 0,0% a 0,2% de O₂ e 40.000 ppm de CO. Em outras palavras, havia excesso de combustível evidenciando uma combustão incompleta, conforme mostrado para o HS8 na figura 8.

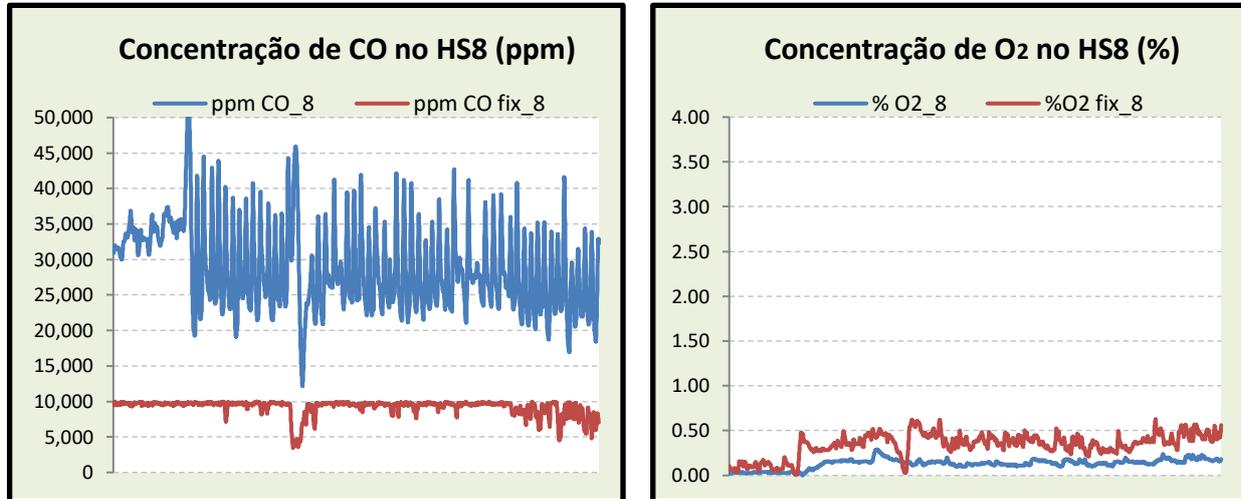


Figura 8. Concentrações de CO (ppm) e O₂ (%) nos efluentes do HS8.

Um ponto de destaque foi a instabilidade encontrada no controle das válvulas individuais de vazão de ar e gás que impactam diretamente na eficiência do sistema de combustão.

Além dos problemas identificados acima, foi evidenciado também uma divergência considerável entre os valores dos efluentes (CO e O₂) medidos no analisador fixo, utilizado no processo, e o portátil, utilizado nesta diagnose, conforme figura 8. Suspeita-se que os atuais pontos de coleta dos analisadores fixos estejam recebendo influência dos efluentes da combustão de outro regenerador, devido sua proximidade ao canal de fumaça, comum aos outros regeneradores.

IV. Termografia na Carcaça dos Regeneradores

A termografia indicou, conforme figura 9, que as maiores temperaturas concentraram em regiões pontuais, nas junções entre o corpo e o domo do regenerador, aceitáveis para este tipo de equipamento.

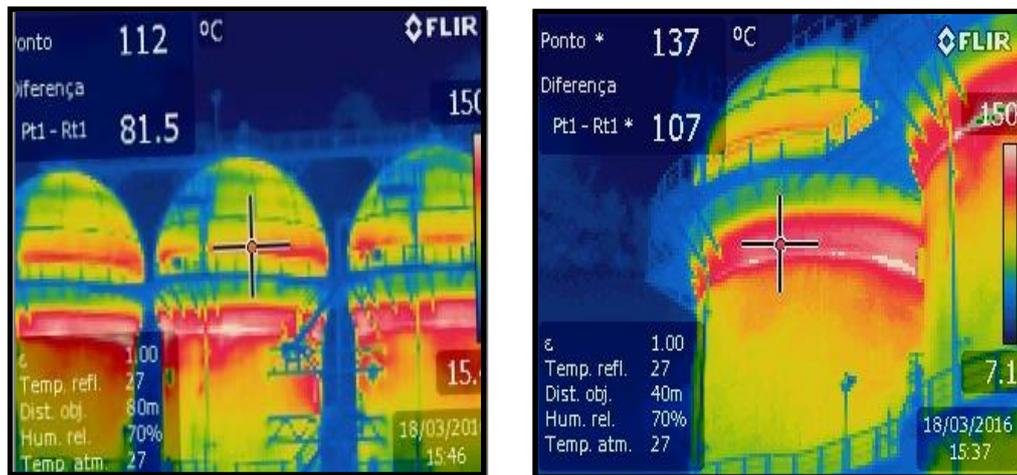


Figura 9. Termografia realizada nos regeneradores.

3.2 Plano de Trabalho e Resultados

De posse das informações levantadas no processo de diagnose, foi possível elaborar um plano de ação para mitigar ou corrigir as deficiências energéticas encontradas no sistema. O plano de ação foi desenvolvido no mês de março/2016, sendo as principais ações:

- implementar uma função para correção automática e em tempo real do PCI de BFG e COG;
- inserir uma função para calcular a densidade e compensar a vazão de BFG;
- ajustar o PID e atuador da válvula controladora de vazão de COG;
- inserir uma função para calcular a densidade e compensar a vazão de COG;
- avaliar a assertividade do controle de pressão do BFG;
- inserir compensação de temperatura na medição de vazão do ar de combustão;
- fazer sintonia da malha de controle do Sistema de Injeção de O₂;
- implantar uma função para o ajuste automático da relação ar/gás através do controle por “duplo limite cruzado”;
- ajustar a combustão dos regeneradores para faixas aceitáveis de CO e O₂ nos efluentes;
- desenvolver uma lógica *feedforward* para garantir eficiência durante as trocas ventilação/combustão;
- implementar um sistema para controle dinâmico da combustão;
- aferir analisadores de fumaça (CO e O₂) fixos;
- desenvolver uma interface para controle dinâmico da combustão.

Ao implantar as ações propostas foi possível notar uma melhora consistente na qualidade da combustão e eficiência do processo. Como observado na figura 10, as intervenções realizadas garantiram maior estabilidade nas medições de vazões de ar e gás, o que permite melhor controle das relações BFG/COG e ar/gás.

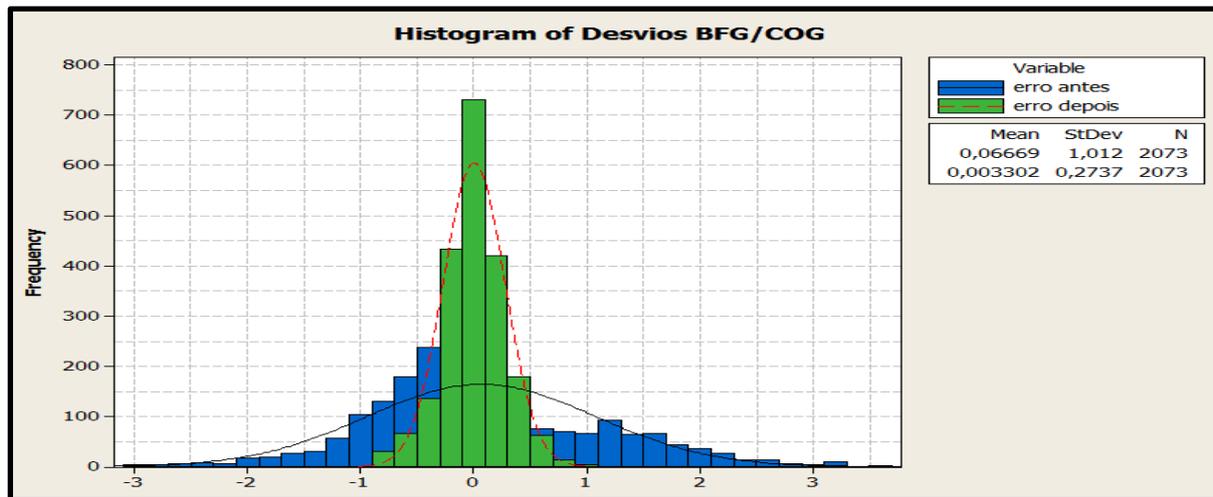


Figura 10. Melhoria no controle da relação BFG/COG

É importante ressaltar que os ajustes aplicados permitiram maior assertividade na medição do poder calorífico objetivado para o gás misto, menor perda por combustão incompleta e ainda, menor oscilação da temperatura de chama. Um bom exemplo pode ser verificado na figura 11, a qual ilustra o reflexo da aplicação da lógica *feedforward*. Esta lógica prevê as trocas ventilação/combustão dos regeneradores, condicionando o sistema a atuar antecipadamente no controle das válvulas, mantendo a estequiometria de combustão.

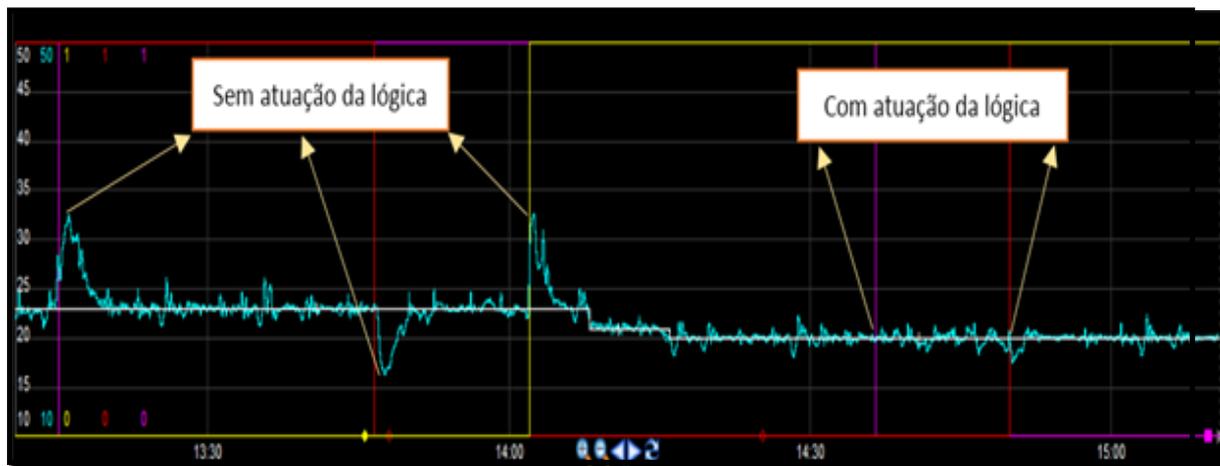


Figura 11. Atuação da lógica *feedforward* na relação BFG/COG durante as trocas.

Além disso, foi desenvolvida uma nova interface via PIMs que representou uma grande evolução no que se diz respeito ao controle de combustão nos regeneradores, pois sugere parâmetros para ajuste da combustão considerando as condições reais de operação. Em outras palavras, a interface permite ao operador enxergar todas as variáveis da combustão de forma rápida e dinâmica, gerar gráficos para avaliar suas tendências e assim, fazer correções preventivas no processo. A figura 12 ilustra a tela da interface disponibilizada para operação em novembro/2016.

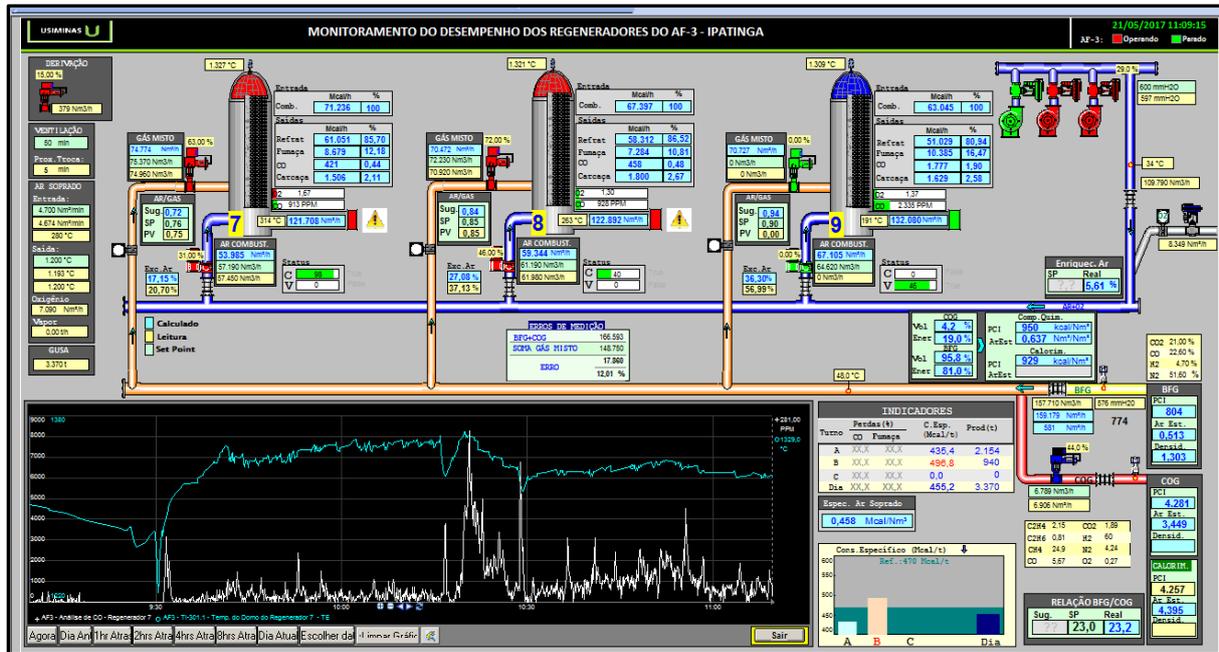


Figura 12. Interface desenvolvida para controle dinâmico dos regeneradores.

A figura 13 mostra uma *bridge* na qual foi quantificado o impacto de cada ação no indicador de eficiência do processo, Mcal/t_{gusa}. Tendo como referência o mês de março/2016, observa-se uma redução de 42,6 Mcal/t_{gusa} já atingida no mês de agosto/2016.

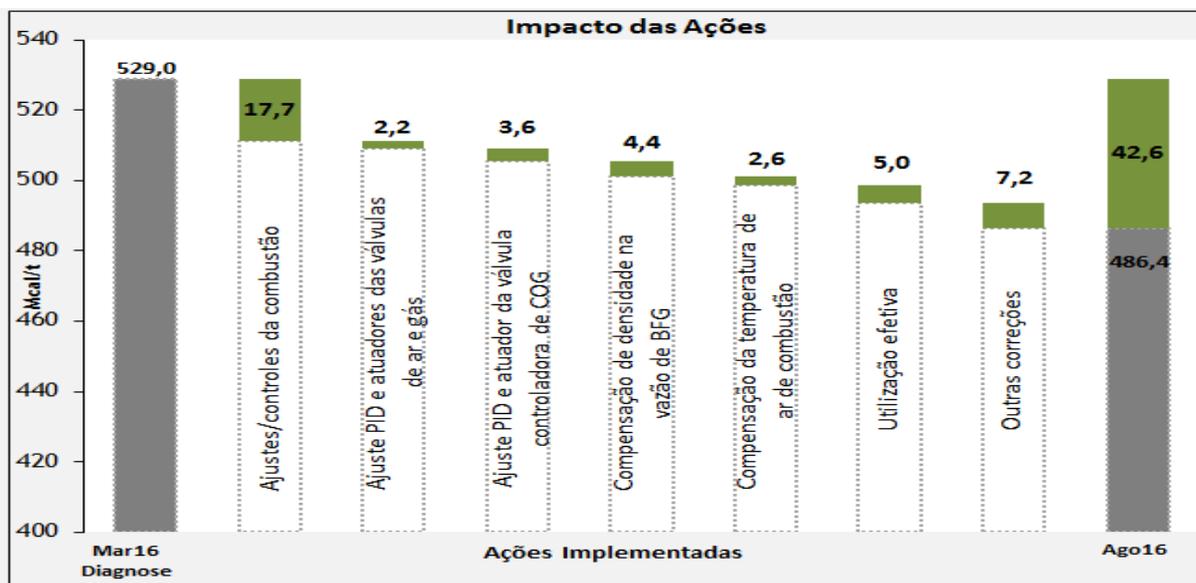


Figura 13. Bridge de impacto das ações no Mcal/t_{gusa}.

A figura 14 mostra a tendência do indicador antes e depois da execução deste trabalho. É possível notar que a média do indicador reduziu 44,1 Mcal/t_{gusa} e, além disso, houve a redução do desvio padrão, indicando maior controle estatístico do processo. Isso resulta numa melhora da eficiência energética dos regeneradores e reflete diretamente em redução de combustíveis para a Usiminas. Vale ressaltar que no período em questão não houve mudanças significativas no volume de produção do Alto-Forno 3.

* Contribuição técnica ao 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 5º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil.

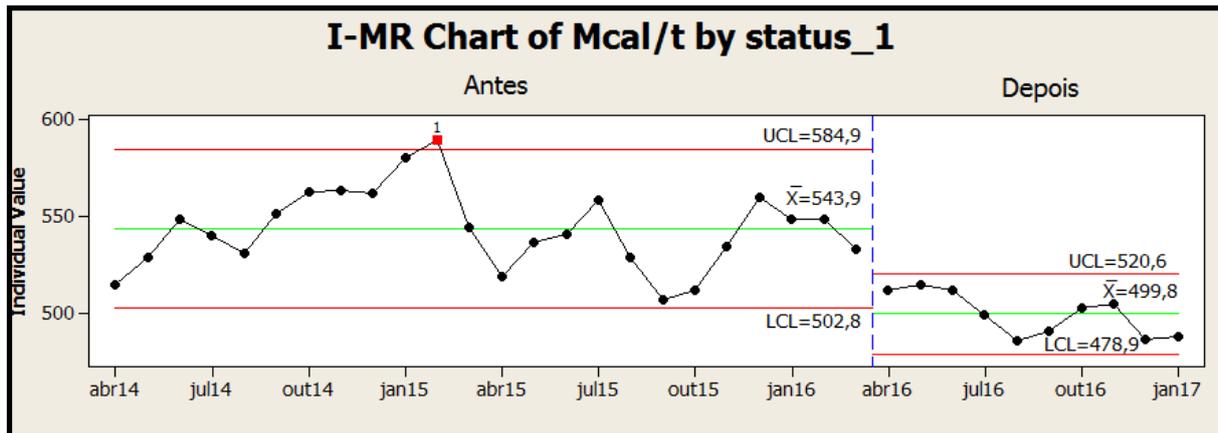


Figura 14. Redução da média e desvio padrão do Mcal/t_{gusa} após a conclusão do estudo.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi desenvolvido um estudo de diagnose nos regeneradores do Alto-Forno 3 da Usiminas, entre outubro/2015 e abril/2016, visando a redução do consumo de combustíveis. Os resultados deste estudo foram fundamentais para o conhecimento das reais condições operacionais destes equipamentos. De posse dessas informações, foi possível desenvolver um conjunto de soluções, objetivando, de uma forma geral, otimizar a eficiência energética do processo em termos de economia de combustíveis. As intervenções propostas atacaram os principais pontos de deficiência identificados, como por exemplo, variações no poder calorífico e densidade dos gases BFG e COG, oscilações nas válvulas controladoras de COG, imprecisão no controle de pressão de BFG, desajustes nas relações BFG/COG e ar/gás, combustão incompleta, falta de confiabilidade nos analisadores de CO e O₂ da fumaça, etc. A expectativa de redução de combustíveis foi atendida com êxito, aumentando a competitividade da Usiminas no mercado siderúrgico, sem a necessidade de investimentos complementares.

Além disso, o maior controle dos parâmetros de combustão dos regeneradores garantiu maior estabilidade operacional.

Contudo, no intuito de otimizar ainda mais a eficiência da matriz energética da Usiminas, pretende-se replicar este trabalho para os Altos-Fornos 1 e 2. Os trabalhos deverão seguir a mesma metodologia da diagnose aplicada, considerando a diferença de alguns aspectos operacionais específicos de cada alto-forno.

REFERÊNCIAS

1. GARRÉTON, D. S. O. Aerodynamics and steady state combustion chamber and furnaces. ECOFTAC Bulletin, p. 29-38, 1994.
2. INCROPERA, P. I.; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Editora LTC, 2011.
3. CARVALHO, A.J; MCQUAY, M.Q. Princípios de Combustão Aplicada. Florianópolis. Editora UFSC, 2007.
4. YAVERBAUM, L. Energy Saving by Increasing Boiler Efficiency. Park Ridge, N.J: Noyes Data Corp., 1979.
5. GARCIA, R. Combustíveis e Combustão Industrial. Editora Interciência, 2002.