

# DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA DE CONTROLE DE VAZÃO DE AR PRIMÁRIO PARA COMBUSTÃO E DE RESFRIAMENTO DAS QUEIMADORES NA SAMARCO MINERAÇÃO\*

Maycon Athayde<sup>1</sup>  
Sergio Fernando Nunes<sup>1</sup>  
Luiz Claudio da Silva<sup>2</sup>

## Resumo

A Samarco Mineração utiliza combustível gasoso para geração de energia térmica para o endurecimento pelotas de minério de *ferro*. O balanceamento térmico do forno ocorre através do controle das malhas de instrumentação que são compostas por válvulas de controle, sensores de temperatura, queimadores e sistema de suprimento de Gás Natural Industrial (GNI) para a combustão. A combustão é realizada por meio de queimadores, que são alimentados por uma mistura gasosa de GNI e Ar Atmosférico, ambos a temperatura ambiente. A função do GNI é fornecer a sua máxima capacidade energética para a produção de calor. Já o Ar atmosférico é resfriar o queimador, e estabilizar a chama dentro da câmara e ar primário de combustão. No entanto excesso de ar é fator determinante para eficiência de combustão, pois controla os produtos da queima, entre eles a temperatura. Um grande excesso de ar é indesejável, pois reduz a temperatura da chama, e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases.

**Palavras-chave:** Ar atmosférico; Combustão; Gás natural.

## DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR CONTROL OF AIR FLOW FOR IMMEDIATE FIRE AND COOLING OF BURNERS IN MINING SAMARCO

## Abstract

The Samarco uses gaseous fuel for thermal power generation for pellet induration of iron ore. Heat the oven balancing occurs through control of instrumentation that meshes consist of control valves, temperature sensors, burners and supply of Natural Gas Industrial System (GNI) for combustion. The combustion is carried out by means of burners which are powered by a gas mixture of atmospheric air and GNI, both at room temperature. The function of GNI is to provide the maximum power capacity for heat production. Since the atmospheric air, and the burner cool and stabilize the flame in the primary chamber and the combustion air. However excess air is critical for combustion efficiency factor because it controls the products of combustion, including the temperature. A large excess of air is undesirable because it reduces the flame temperature and increases the heat loss due to enthalpy of the gas.

**Keywords:** Atmospheric air; Combustion; Natural gas.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista, MSc, Eng., Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Técnico de Instrumentação, Samarco Mineração, Anchieta, ES, Brasil.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



## 1 INTRODUÇÃO

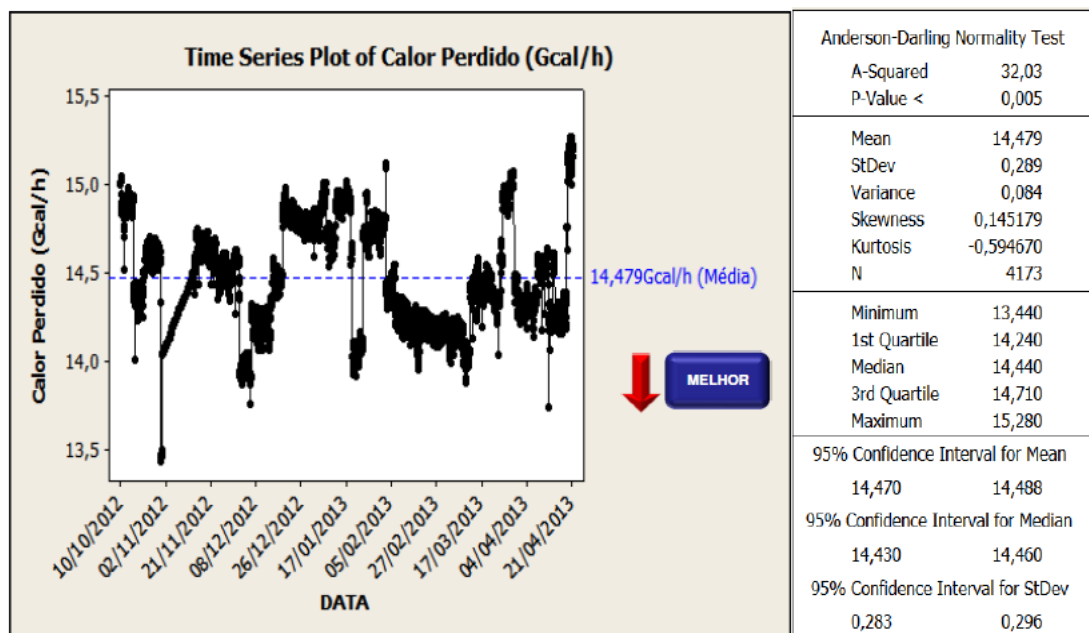
O forno de endurecimento é uma das fases do processo de pelletização, onde as pelotas de minério de ferro são submetidas a um rigoroso procedimento de tratamento térmico que garante resistência mecânica adequada para as etapas de manuseio, transporte e utilização nos reatores de redução de nossos clientes.

O balanceamento térmico do forno ocorre através do controle das malhas de instrumentação que são compostas por válvulas de controle, sensores de temperatura, queimadores e sistema de suprimento de Gás Natural Industrial (GNI) para a combustão. A combustão é realizada por meio de queimadores, que são alimentados por uma mistura gasosa de GNI e ar atmosférico, ambos à temperatura ambiente. A função do GNI é fornecer a sua máxima capacidade energética para a produção de calor. Já o ar atmosférico é resfriado o queimador, e estabilizar a chama dentro da câmara e ar primário de combustão.

No entanto, excesso de ar é fator determinante para eficiência de combustão, pois controla os produtos da queima, entre eles a temperatura. Um grande excesso de ar é indesejável, pois reduz a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido à entalpia dos gases.

Com a troca do gás para o óleo o sistema de refrigeração dos queimadores passou a ter um papel secundário em relação ao óleo, onde era necessário ainda atomizar o combustível.

O ar frio injetado no forno gera perdas térmicas e aumenta o consumo energético que, por sua vez, também aumenta o consumo de gás natural. O gás natural representa 54,5% da matriz de custos com insumos para pelletização. A figura 1 mostra a variação da série temporal de um processo extremamente instável sugerindo ótimas oportunidades de melhoria. Nele podemos observar que a amplitude dos dados amostrais chegou a 12% do valor do valor médio.

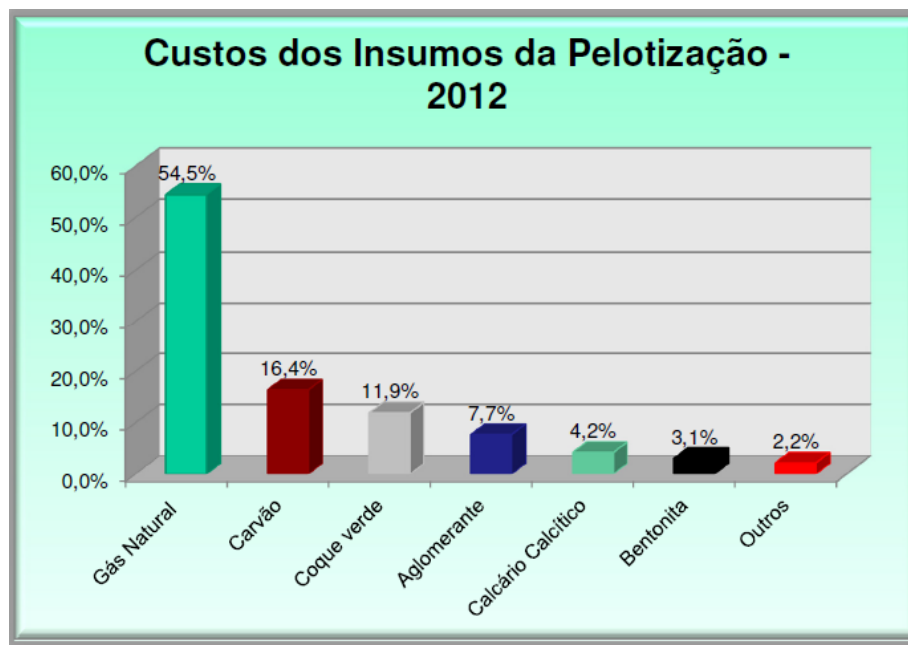


**Figura 1-** Variação do Calor perdido pelo sistema de Ar de resfriamento das camisas dos queimadores

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A matriz de custos dos insumos da pelotização no ano de 2012 mostra que 54,5% é o gás natural industrial que é utilizado para a produção de pelotas. Como mostra a Figura 2.



**Figura 2 - Custos dos Insumos da Pelotização em 2012.**

O projeto foi desenvolvido na etapa de endurecimento das pelotas. Essa etapa é composta por quatro fases: secagem ascendente, secagem descendente, queima e resfriamento. Eis a tabela 1 que explicita as expectativas e as necessidades dos clientes:

**Tabela 1 - Expectativas e necessidades dos clientes.**

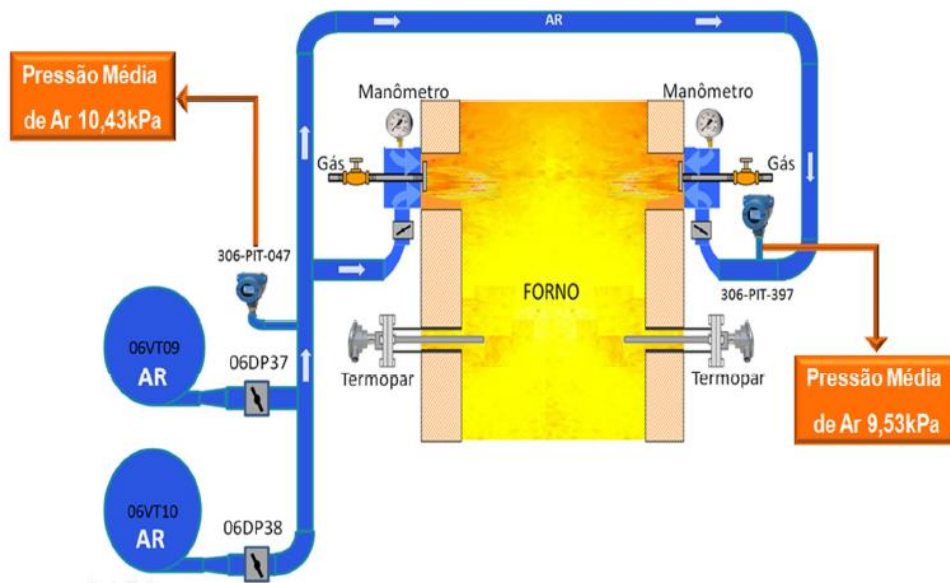
VOC (Voz do Cliente)	Questões chave
Melhorar a eficiência térmica do forno para o endurecimento das pelotas no forno.	Reduzindo perda térmicas no forno
Não impactar na resistência mecânica dos queimadores.	Controlar a temperatura na camisa do queimador.
Não Impactar na temperatura do refratário.	Controlar a temperatura na câmara de combustão.
Preservar as características da chama.	Chama centralizada.

O projeto em estudo está delimitado apenas às perdas térmicas que são provocadas pelo sistema de combustão durante a injeção de ar frio para resfriamento das camisas dos queimadores do forno da Usina 3 que é esquematizado na figura 3.

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*



### Sistema de Ar de Resfriamento das camisas dos queimadores do Forno da Usina III



**Figura 3 -** Sistema de ar de resfriamento das camisas dos queimadores.

Como não temos uma medição direta para as perdas térmicas e este indicador é em função da pressão do ar frio que é injetado no forno por meio dos ventiladores de pressurização, utilizaremos essa variável para medição do problema. Sendo assim, os cálculos das perdas térmicas apresentados ao decorrer do projeto, serão estimados através da pressão do ar frio. A origem dos dados de pressão de ar de resfriamento das camisas dos queimadores pode ser obtida através do PIMS e do sistema Supervisório de controle delta V.

## 2 OBJETIVO

Reduzir as perdas térmicas, pelo sistema de combustão, da Usina III de 14,5 Gcal/h para 13,8 Gcal/h até 31 de Janeiro de 2014.

É desejável que através da redução das perdas térmicas no forno reduza também o consumo energético do forno.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O instrumento que fornece o valor da pressão do ar de resfriamento possui um plano de manutenção e calibração periódica. Para calibração do transmissor de pressão é utilizado um manômetro digital rastreado e calibrado por um laboratório acreditado pelo INMETRO. A medição de pressão possui redundância de transmissores, na mesma linha de ar que apresenta a mesma tendência. O comportamento histórico do indicador mostra que não existe controle de pressão de ar de resfriamento.

Nota-se que os dados amostrais da pressão de ar de resfriamento das camisas dos queimadores apresentam uma média de 10,44 kPa, com desvio de 0,379. Percebe-se também que o valor máximo registrado foi de 11,42 kPa e mínimo de 9,50 kPa, sendo que não há presença de outlier e os dados não possuem uma distribuição normal.

\* *Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

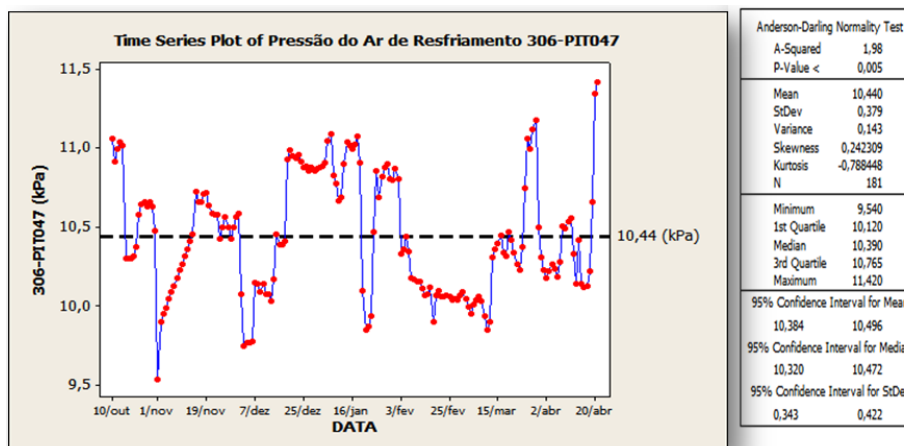


Figura 4 - Comportamento histórico do indicador do projeto.

Foi criada uma estratégia de análise para os experimentos em escala industrial que serão realizados com o objetivo de avaliar a relação entre diversos níveis de pressão de ar de resfriamento e a qualidade de chama, temperatura no refratário, temperatura na camisa do queimador e a vazão de ar de resfriamento. Foi realizado um único brainstorming com toda a equipe de projeto contemplando os dois ventiladores, uma vez que a equipe concluiu que as causas que influenciam os dois equipamentos são similares. Foram detectadas 19 causas possíveis. Após isso foi elaborado um diagrama de causa e efeito a fim de identificar as causas fundamentais que estão listadas na tabela 2.

Tabela 2 - Causas fundamentais que influenciam na variação da pressão de Ar.

X'S	CAUSAS
X1	Falta de treinamento
X2	Erro de indicação da pressão na tela do operador
X3	Falta de padronização para o controle do Ar
X4	Metodologia desconhecida
X5	Temperatura do Ar
X6	Ventiladores super dimensionados
X7	Falta de controle dos dampers dos Vts 06VT009 e 06VT010
X8	Ventiladores sem controle de velocidade
X9	Filtros de ar dos ventiladores fora de especificação
X10	Instrumentos de controle descalibrados
X11	Temperatura da camisa do Queimador
X12	Temperatura do Refratário
X13	Temperatura da Chama
X14	Qualidade da chama
X15	Especificação técnica do queimador
X16	Delta P no transporte do ar muito alto
X17	Emissão de Nox, CO, CO2
X18	Falta indicação local
X19	Erro de indicação no manômetro

Através do GUT foi possível encontrar os X's vitais que tem influência significativa sobre o problema. Os X's com suas relevâncias são mostrados na tabela 3. Nesta etapa conseguimos identificar que as 6 causas mais relevantes, podem ser consideradas causas raízes.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.


**Tabela 3 - Causas raízes com suas relevâncias**

Entradas	Causas	Gravidade	Urgência	Tendência	Prioridade
X3	Falta de padronização para o controle do Ar	4	5	4	80
X7	Falta de controle dos dampers dos Vts 06VT009 e 06VT010	4	5	4	80
X10	Instrumentos de controle descalibrados	4	5	4	80
X1	Falta de treinamento	4	4	4	64
X15	Especificação técnica do queimador	4	4	4	64
X4	Metodologia desconhecida	4	3	4	48
X8	Ventiladores sem controle de velocidade	3	3	5	45
X6	Ventiladores super dimensionados	3	3	3	27
X9	Filtros de ar dos ventiladores fora de especificação	3	3	3	27
X11	Temperatura da camisa do Queimador	3	3	3	27
X19	Erro de indicação no manômetro	3	3	3	27
X2	Erro de indicação da pressão na tela do operador	3	3	3	27
X16	Delta P no transporte do ar muito alto	3	2	3	18
X12	Temperatura do Refratário	3	2	3	18
X13	Temperatura da Chama	3	2	3	18
X14	Qualidade da chama	2	3	3	18
X5	Temperatura do Ar	3	2	2	12
X17	Emissão de Nox, CO, CO2	3	2	2	12
X18	Falta indicação local	2	2	1	4

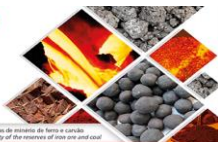
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através dos experimentos industriais foi possível analisar qual é a pressão ideal para ser utilizada no resfriamento das camisas dos queimadores sem causar impactos na qualidade da chama e na temperatura os refratários das câmaras de combustão. A principal ação a ser estabelecida é o controle da abertura dos dampers é suficiente para o alcance das metas. As ações listadas pela equipe são suficientes para o alcance das metas. A tabela 4 mostra se as causas potenciais podem ser confirmadas como causas raízes.

**Tabela 4 - Confirmação das causas raízes.**

Ref.	Hipótese	Análise – teste realizado	Resultado			Causa raiz?	Comentários
			Significância verificada	Sem evidência	Não significante		
1	Teste de temperatura na camisa do queimador.	Teste de Regressão	X			Pressão de Ar	O valor da pressão de ar esta diretamente ligada com a variação de temperatura das camisas dos queimadores.
2	Teste de temperatura sup. Câmara de combustão.	Teste de Regressão	X			Pressão de Ar	O valor da pressão de ar esta diretamente ligada com a variação de temperatura da parte superior das câmaras de combustão.
3	Teste de temperatura inf. Câmara de combustão.	Teste de Regressão	X			Pressão de Ar	O valor da pressão de ar esta diretamente ligada com a variação de temperatura da parte inferior das câmaras de combustão.
4	Teste de qualidade da chama	Qualitativo	X			Pressão de Ar	O valor da pressão de ar esta diretamente ligada com a variação da qualidade de chama.
5	Controle dos Dampers do 06VT09 e 06VT10	Teste de correlação	X			Vazão e pressão de ar	Foi confirmada a curva de vazão dos ventiladores através da variação da posição do damper, pressão e vazão medido através de medidor portátil PITOT

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



A avaliação feita em conjunto com engenheiros do forno através dos experimentos e dados levantados indica que as medidas não irão provocar nenhum efeito correlato. A tabela 5 mostra o plano de ação.

**Tabela 5 - Plano de ação**

Causas Prioritárias (X's)	WHAT Atividade (o quê?)	WHY Objetivo (por quê?)	HOW Procedimento (como?)	WHO Responsável (quem?)	WHERE Local (onde?)	WHEN Prazo (quando?)
Falta de controle dos Dampers dos VT's 06VT009 e 06VT010	Instalar placa de controle nos Dampers	Para possibilitar o controle de abertura dos Dampers	Requisitando placa junto ao suprimentos e programando instalação na parada de usina	Luiz Claudio	06VT09 06VT10	31/11/2013 Concluído
Instrumentos de controle descalibrados	Calibrar transmissor	Para assegurar a confiabilidade das medições	Calibrando o transmissor de acordo com o plano de calibração	Luiz Claudio	Ventiladores 06VT09 06VT10	31/10/2013 Concluído
Falta de padronização para o controle do Ar	Criar procedimento com as padronizações das pressões de ar de resfriamento das camisas dos queimadores	Para que todos os envolvidos executem a tarefa de controle de ar de forma padronizada	Escrever o procedimento e padronização para o controle de ar de resfriamento das camisas dos queimadores	Luiz Claudio	GEU	31/12/2013 Concluído
Falta de treinamento	Treinar todos os técnicos de sala de controle da pelotização da Usina III	Para capacitar os envolvidos nos novos procedimentos criados	Após a criação do procedimento e padronização realizar treinamento interno com as partes envolvidas.	Luiz Claudio	Sala de Reuniões GEU	31/12/2013 Concluído
Erro de indicação de pressão na tela do operador	Calibrar malha de controle de pressão	Para garantir identificação correta da variável medida	Calibrando o transmissor de acordo com o plano de calibração	Luiz Claudio	Ventiladores 06VT09 06VT10 e Automação	15/12/2013 Concluído
Alterar a e Especificação técnica do queimador	Pressurizar a camisa do queimador sob alta pressão e baixar vazão	Reduzir a vazão de Ar de resfriamento da camisa e garantir a integridade mecânica do queimador	Modificar a camisa do queimador	Emerson Caus	Forno 3	10/09/2013 Cancelada

A ação de “pressurizar a camisa do queimador sob alta pressão e baixar vazão” foi cancelada uma vez que os testes não mostraram benefícios para a combustão. As demais ações foram executadas.

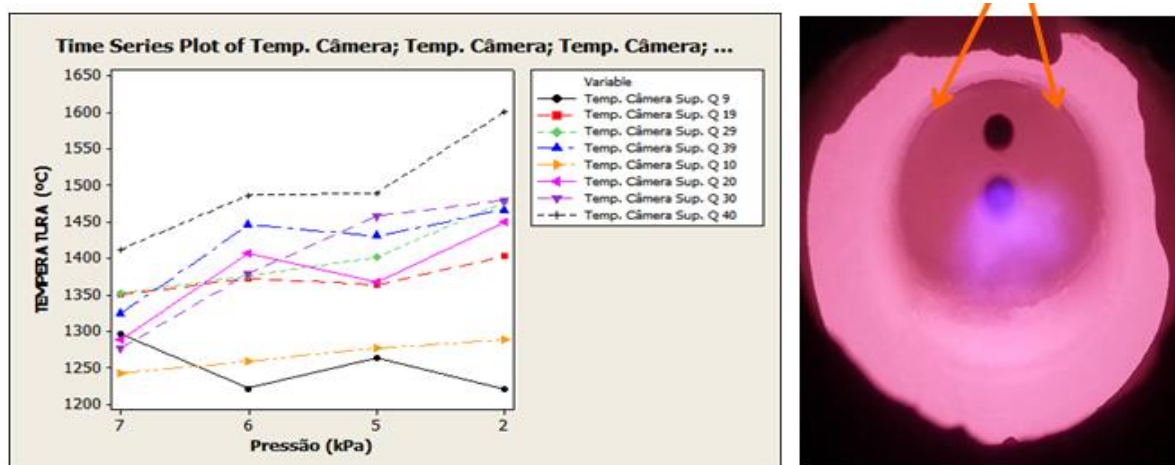
A figura 5 ilustra a mudança na camisa do queimador que resultou em má qualidade da chama. Devido a isso a ação foi cancelada.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



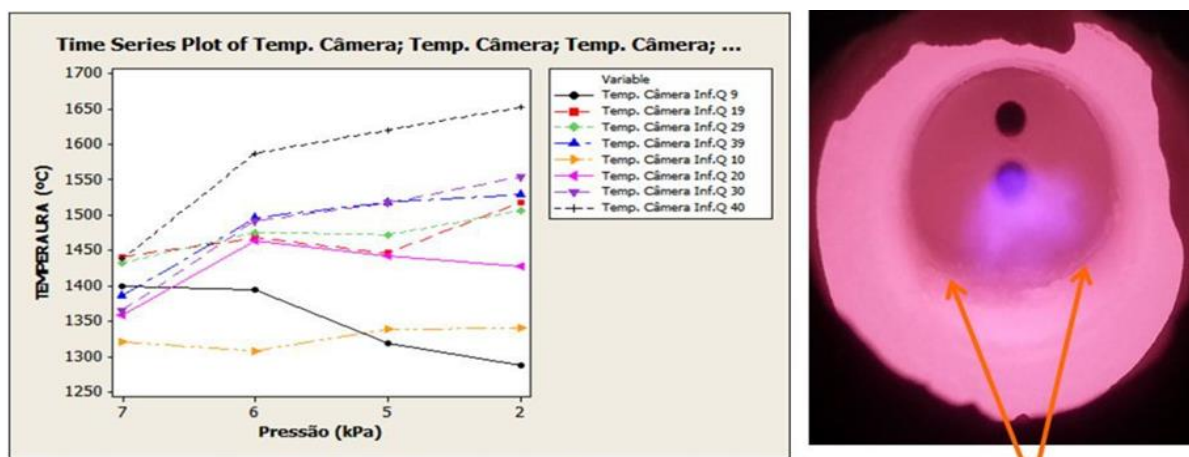
**Figura 5 -** Mudança na camisa do queimador resultando em má qualidade da chama.

Os experimentos industriais foram realizados em 8 queimadores e foram distribuídos entre o início, meio e fim da zona de queima. Observa-se uma tendência positiva na evolução da temperatura da parte superior da câmara de combustão dos queimadores analisados conforme a figura 6.



**Figura 6 -** Pontos de medição e gráfico de temperatura x pressão

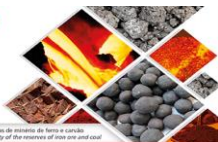
Observa-se uma tendência também positiva na evolução da temperatura da parte inferior da câmara de combustão dos queimadores analisados conforme a figura 7.



**Figura 7 -** Pontos de medição e gráfico de temperatura x pressão.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.





Observa-se uma tendência positiva na evolução da temperatura na camisa dos queimadores analisados. Conforme Figura 8.

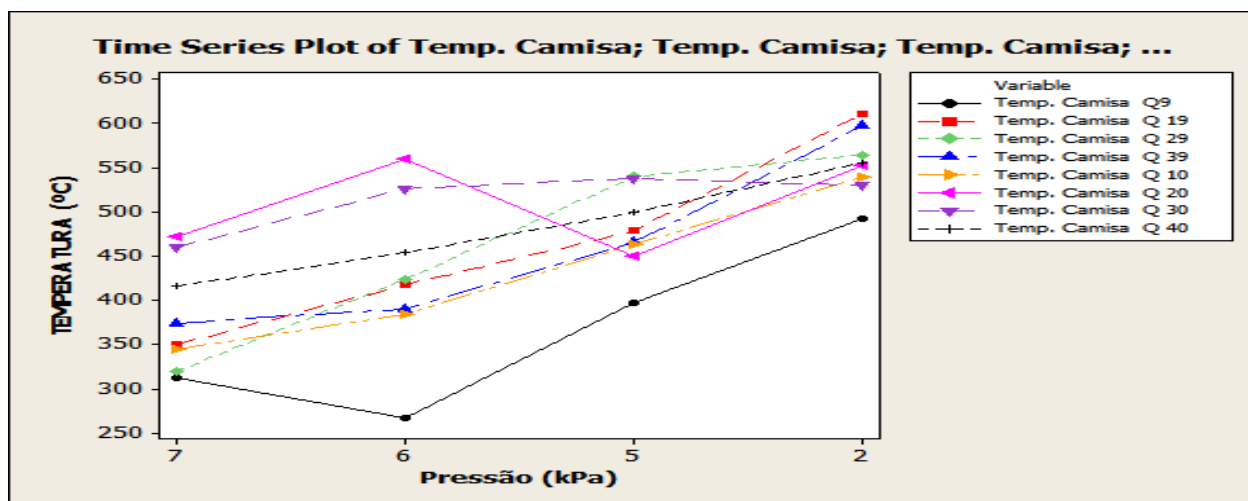


Figura 8 - Temperatura x pressão da camisa do queimador.

A qualidade da chama piora à medida que reduzimos a pressão de ar de resfriamento das camisas. Para a temperatura do refratário da parte superior e inferior e para a camisa a pressão tem uma relação direta, ou seja, à medida que reduzimos a pressão do ar, a temperatura aumenta. Esse efeito é ilustrado na figura 9.

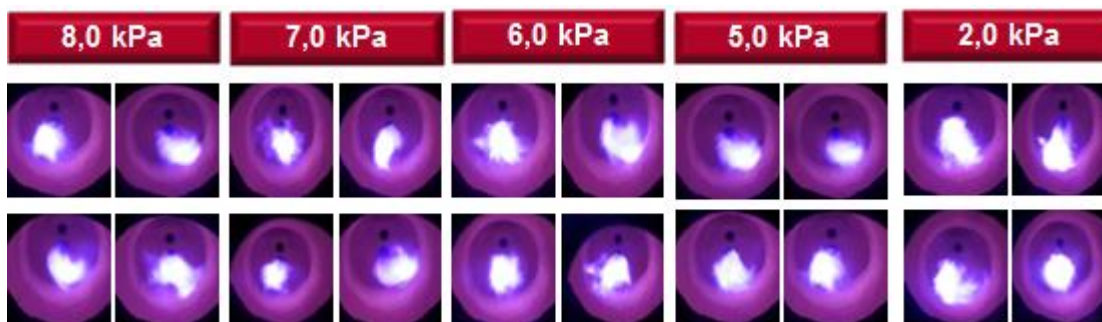


Figura 9 - Fotografias ilustrando a qualidade da chama.

Percebe-se que não existe variação significativa na qualidade da chama entre 5,0 e 8,0 kPa. Abaixo de 5,0 kPa a qualidade da chama piora a medida que reduzimos a pressão de ar de resfriamento das camisas. Na figura 10 é ilustrado esse efeito.

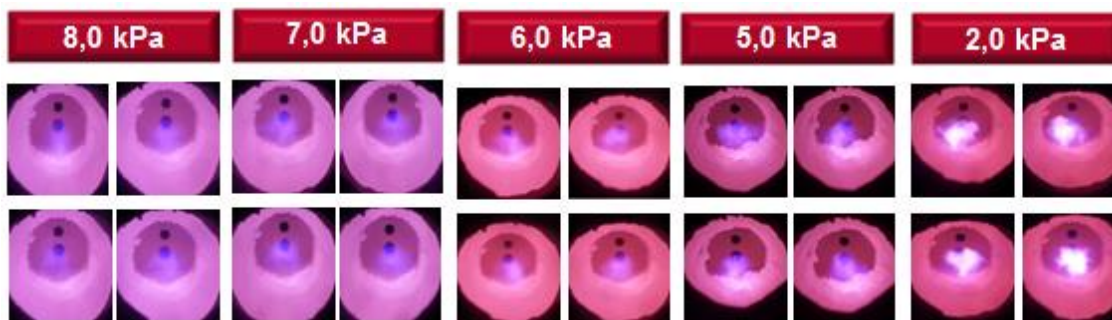
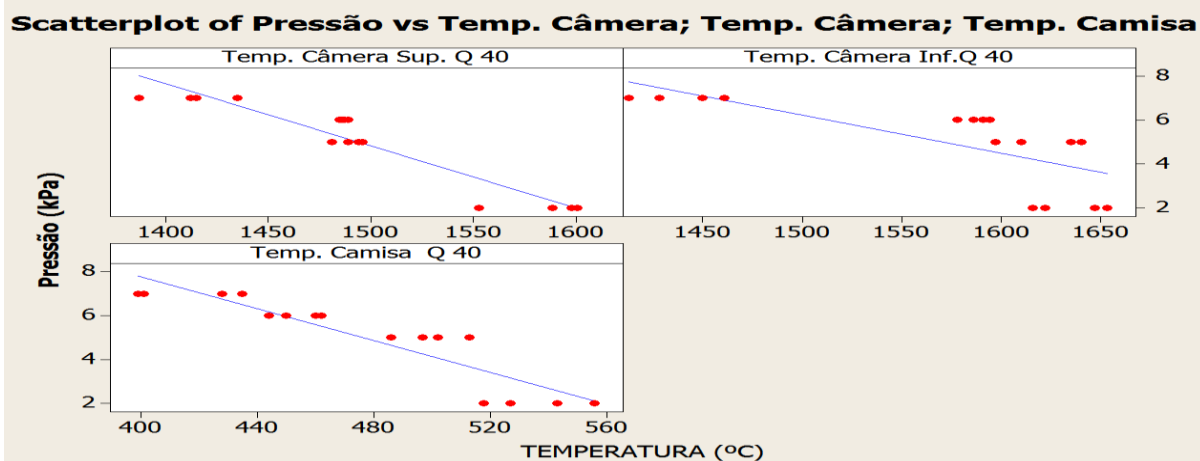


Figura 10 - Fotografias ilustrando a qualidade da chama.

Para a temperatura do refratário da parte superior e inferior a pressão tem uma relação direta, assim como para a temperatura da camisa como podemos ver na Figura 11.

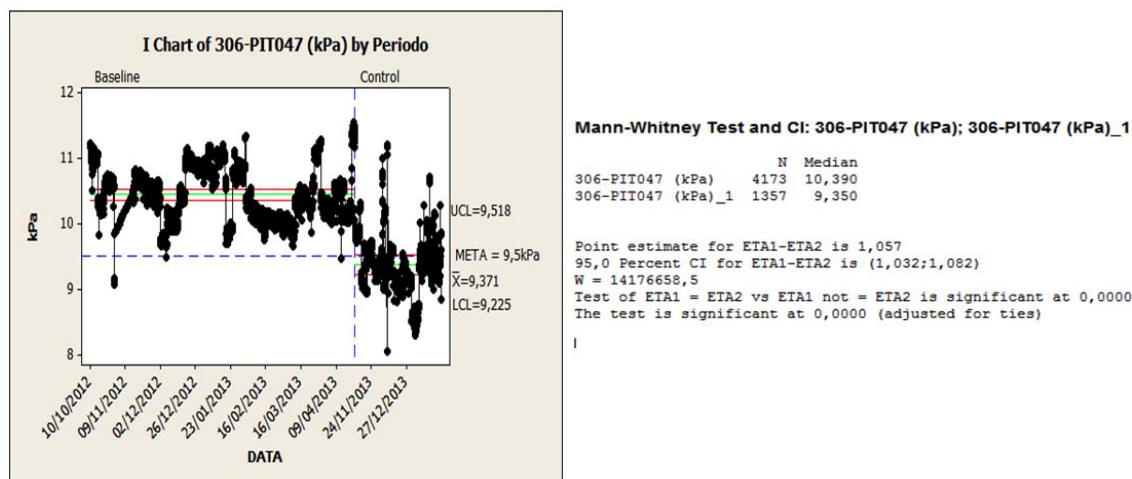
\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



**Figura 11 - Temperatura da câmara x pressão.**

Com as ações realizadas no improve, foi possível alcançar a meta específica. A planilha nos mostra a média de pressão proposta e a média ponderada da pressão atingida por cada ventilador.

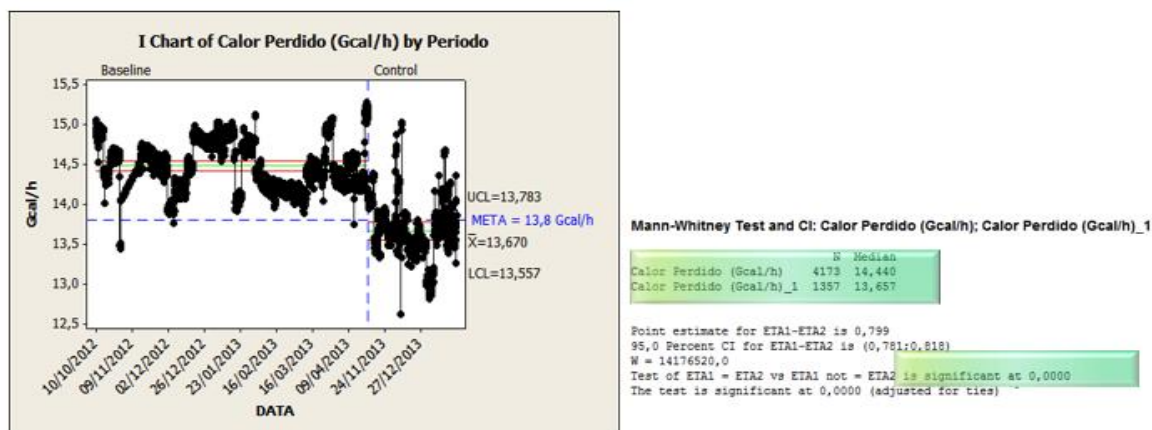
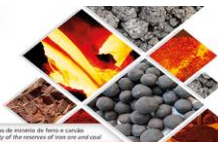
Na figura 12 podemos verificar a redução no valor médio de pressão de ar de resfriamento das camisas dos queimadores. Para confirmar a mudança no patamar de pressão foi utilizado o teste estatístico de comparação das amostras do baseline e do control.



**Figura 12 - Comparação das amostras do baseline e do control**

Na figura 13 podemos verificar a redução no valor médio do calor perdido pelo sistema de combustão. Para confirmar a mudança no patamar de calor perdido foi utilizado o teste estático de comparação das amostras do baseline e do control.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.



**Figura 13 - Comparação das amostras do baseline e do control.**

## 5 CONCLUSÃO

Foi criada uma lógica de abertura dos Dampers dos ventiladores de pressurização 06VT09 e 06VT10 para controlar a pressão de ar de resfriamento das camisas. A lógica de controle de pressão do ar de resfriamento das camisas dos queimadores segue de forma que o damper do ventilador que estiver em operação controle automaticamente a pressão corrigindo qualquer variação do processo instantaneamente independente da ação do operador. Além disso, foi estabelecido um procedimento para controle da pressão do ar de resfriamento das camisas, contendo os parâmetros críticos de ajuste. Foi criado no PIMS um sistema de monitoramento do indicador através de telas que indicam os valores da pressão de ar de resfriamento das camisas bem como o volume de ar injetado ao forno através do sistema de combustão. Com bases nesses valores é possível calcular a perda de calor provocada pelo sistema. O OCAP orienta o Técnico de sala de controle quanto às ações a serem tomadas caso haja algum desvio do indicador. O projeto de redução das perdas térmicas foi realizado no forno da Usina 3 e poderá ser replicado para as usinas 1 e 2 com potenciais de ganho do mesmo patamar.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Athayde M, Tavares RP, Nunes SF, Fonseca CM. Avaliação da distribuição de gases em forno de pelotização da Samarco Mineração através de CFD e validação experimental. In: 43<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 14<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro & 1<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2013; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2013.
- 2 Athayde M, Tavares RP, Fonseca CM, Nunes SF, Costa CM, Cotta SVCL. Industrial Flow Distribution Improvement based on CFD Analysis in a Pelletizing Furnace at Samarco. In: 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas & 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro & 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro; 2014; Belo Horizonte, Brasil. São Paulo: ABM; 2014.

\* Contribuição técnica ao 44<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 15 a 18 de setembro de 2014, Belo Horizonte, MG, Brasil.