

PROJETO *BURN LOSS* E PERDAS*

*Robson Jacinto Coelho*¹
*Neussias Inocência Henrique*²
*Yan Samuel Junqueira*³
*Luiz Afonso de Andrade*⁴
*Rodnei da Silva Rezende*⁵
*Elvis Luis Teixeira de Mello Soares*⁶
*Glauber de Sousa de Araujo*⁷
*Maicon da Silva Garcia*⁸
*Fabio Fernandes Fonseca*⁹
*Francisco Jose Goncalves Delgado*¹⁰

Resumo

A equipe da Coqueria identificou a possibilidade de reduzir o *Burn Loss*, que é a perda de material por queima durante o processo de coqueificação. Após uma série de estudos, utilizando a metodologia Seis Sigma, identificou-se oportunidades de melhorias operacionais que trariam mais eficiência, estabilidade operacional e consequente aumento na produção de coque e vapor, tais como: maior controle na admissão de ar, controle das perdas de coque e carvão, vedação dos fornos de coque e execução de paradas programadas específicas para Preservação Refratária, com foco na redução do *back log* e consequente prolongamento da vida útil das baterias de fornos de coque. A redução *Burn Loss* aumenta o rendimento coque/ carvão, com consequente redução do consumo específico de carvão e aumento na produção de coque e vapor. A implantação desse projeto permitiu a redução de 2,5 dólares por tonelada de aço produzida no *Fiscal Year* 16/17.

Palavras-chave: Coqueria *Heat Recovery*; *Burn Loss*; Coque; Seis Sigma.

BURN LOSS AND LOSSES PROJECT

Abstract

Coke's plant team identifies a possibility of reducing "Burn Loss", which represent the burn of coke during the coking process. After a series of studies, using the Six Sigma methodology, opportunities for operational improvements were identified that would bring more efficiency, operational stability and consequent increase the coke and steam production, such as: greater control of air inlet, control of losses of coke and coal, coke oven sealing and specific programmed shutdowns for Refractory Preservation, focusing on back log reduction and consequently prolonging the life of coke ovens batteries. The reduction of the "Burn Loss" increase the coke/coal yield, reduced the specific consumption of coal and increase the coke production and steam generation. The implementation of this project allowed a reduction of \$2.5 per ton of steel produced in *Fiscal Year* 16/17.

Keywords: Heat Recovery Coke Plant; Burn Loss; Coke; Six Sigma.

* *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.*

- ¹ *Engenheiro Metalúrgico, M.Sc. Engenharia de Materiais e em Engenharia de Produção, Engenheiro Especialista em Redução, Unidade Técnica da Redução, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ² *Engenheiro Químico, Engenheiro de Processo, Unidade Técnica da Redução, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ³ *Engenharia de Controle e Automação, Engenheiro de Processos Sênior, Unidade Técnica da Redução, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁴ *Master Comercio Exterior e Finanças Internacionais, Coordenador da Unidade Técnica da Coqueria, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁵ *Administrador de Empresas, Assessor de Operação, Unidade Técnica da Redução, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁶ *Técnico em Eletrotécnica, Técnico de Qualidade, Operação da Coqueria, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁷ *Administrador de Empresas, Técnico de Qualidade, Produção de Vapor e Controle Térmico, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁸ *Técnico de Mecatrônica, Técnico Refratário, Preservação Refratária, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ⁹ *Engenharia de Controle e Automação, Técnico especialista em automação, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*
- ¹⁰ *Técnico em química industrial, Técnico de Laboratório, Forno piloto de coqueificação do setor de laboratórios, thyssenkrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico - tkCSA, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

O *Burn Loss* é a queima da massa de coque inerente ao processo de coqueificação. A falta de controle pode acarretar problemas para o processo, perdas no rendimento e impactos no custo final, desta forma, quanto maior o *burn loss* maior é o custo de produção de coque e conseqüentemente maior será o custo de produção de placas de aço.

Pode-se considerar que os principais fatores que impactam no controle do *burn loss* são: imprecisão dos equipamentos de medição, queima de coque por tempo bruto acima do necessário, perdas de carvão e coque no manuseio e entradas de ar falso nas baterias.

Este projeto, desenvolvido utilizando a metodologia Seis Sigma, visa controlar variáveis de processo que possam impactar diretamente na queima indesejada do coque e desenvolver técnicas operacionais visando reduzir o *burn loss* de 8,13% para 6% a partir julho de 2017.

2 PROJETO BURN LOSS E PERDAS

2.1 Descrição do processo

O processo de coqueificação em baterias de coque tipo *Heat Recovery* utiliza a matéria volátil presente no carvão como combustível para manter os fornos de coque aquecidos. O ar utilizado na combustão é succionado da atmosfera pelas entradas de ar primárias no topo dos fornos e secundárias na soleira dos fornos, em função dos fornos trabalharem com pressão negativa. Uma parte da queima que gera energia térmica para o forno, ocorre devido à queima do próprio coque produzido, denominado *Burn Loss*, que é a perda de material por queima durante o processo de coqueificação. Parte dessa queima é inerente ao processo de coqueificação em Baterias de coque do tipo *Heat Recovery* e parte é indesejada, esta queima ocorre quando uma parcela do oxigênio que entra na câmara primária do forno reage com o próprio coque e não somente com os gases liberados no processo de coqueificação.

A admissão de ar nos fornos é feita por um controle dedicado criado pelo próprio time da Coqueria chamado "PID Combustão". Porém as entradas de ar falso, que não são "controladas", contribuem para o aumento do *burn loss*. O controle tem por objetivo, somente, queimar os gases provenientes da liberação da matéria volátil. Essas entradas ocorrem pela má vedação das portas superiores e inferiores dos fornos e por entradas de ar na alvenaria refratária das câmaras primárias.

A **Figura 1** apresenta o mapa de processo do projeto *Burn Loss* e Perdas.

- **1** = o total de carvão contabilizado nas dosadoras \pm variação das torres de carvão em base seca;
- **MV(%)** = média da matéria volátil do carvão blendado do período;
- **Rendimento (%)** = (quantidade de coque produzido no período/ quantidade de carvão consumido no período em base seca) * 100.

2.2 Desenvolvimento do projeto *Burn Loss* e Perdas

Visando aumentar o conhecimento do processo e reduzir o *burn loss*, foi elaborado um plano de teste, com a finalidade de aferir o *burn loss* intrínseco ao processo de coqueificação em baterias de coque tipo *Heat Recovery* e aferir a eficiência das ações implantadas para redução *burn loss*. Os testes foram realizados conforme diagrama esquemático da **Figura 2**.

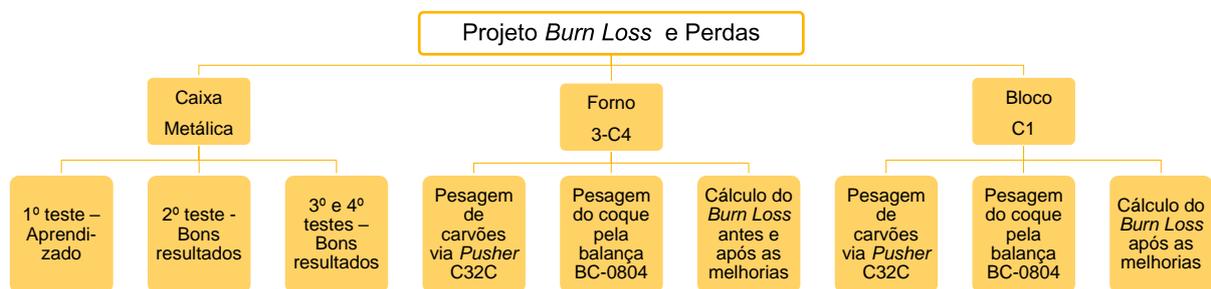


Figura 2. Diagrama esquemático para desenvolvimento do projeto *Burn Loss* e Perdas.

O diagrama esquemático da **Figura 2** nos mostra que os testes foram divididos em três etapas, a saber:

- 1ª) Realizar testes para verificar o *burn loss* intrínseco ao processo de coqueificação em baterias de coque tipo *Heat Recovery*, realizou-se testes com enformamento de uma mistura idêntica à mistura industrial, porém em uma caixa metálica. Neste teste, a mistura de carvões contida na caixa metálica foi submetida às mesmas condições operacionais da mistura industrial.
- 2ª) Realizar testes de medição da massa de carvão enformada no forno 3-C4, via balança estática instalada na Máquina Enfornadora (*Pusher*), e da medição do coque correspondente, com a medição do *burn loss* do forno;
- 3ª) Realizar testes de medição da massa de carvão enformada e da medição do coque dos fornos do Bloco C1, durante dez ciclos, buscando aferir os resultados de *burn loss* do forno teste, e verificar o impacto das melhorias propostas no tempo líquido e no rendimento térmico dos fornos.

Os testes do forno 3-C4 e dos fornos do Bloco C1 foram realizados sem e com melhorias, entre elas a projeção de massa refratária para garantir a estanqueidade dos fornos de coque.

2.3 *Burn Loss* intrínseco ao processo de coqueificação

Com o objetivo de medir o *burn loss* intrínseco ao processo de coqueificação em baterias de coque do tipo *Heat Recovery* adotou-se a metodologia da Caixa Metálica. Neste teste, a mistura de carvões contida na caixa foi submetida às

mesmas condições operacionais da mistura industrial. O teste consistiu em especificar e confeccionar uma caixa metálica de aço inox, conforme **Figura 4 – a**, com vários furos em todas as faces, com exceção da base, com a finalidade de permitir que os gases oriundos da queima durante o processo de coqueificação fossem liberados. Após a confecção da caixa, foi coletada uma amostra da mistura de carvões industrial, após a mistura foi então compactada na prensa piloto do laboratório e posteriormente os blocos gerados na compactação foram acondicionados dentro da caixa metálica, conforme ilustrado na **Figura 4 – b**. Finalizada a etapa de acondicionamento da mistura de carvão dentro da caixa metálica, a mesma foi então transportada para a Bateria C, onde foi colocada com o auxílio de um guindaste dentro da bandeja da máquina enfornadora em posição pré-estabelecida, conforme ilustrado pela **Figura 4 – c e d**.



Figura 4. a) Caixa metálica; b) Blocos de carvão acondicionados na caixa metálica; c) Abertura da massa para acondicionar a caixa metálica; d) Posicionamento da caixa metálica dentro da bandeja da máquina enfornadora.

Após o enforamento e transcorrido todo o processo de coqueificação, realizou-se desenforamento da caixa metálica conforme padrão operacional, e logo após a extinção do coque a caixa metálica foi retirada do meio da massa de coque com auxílio de uma empilhadeira (*Sky Track*) e enviada ao laboratório, por um caminhão *Munk*, para caracterização, conforme ilustrado pela **Figura 5**.



Figura 5. a) Retirada do meio da massa de coque com auxílio de uma empilhadeira (*Sky Track*); b) Transporte da caixa metálica por um caminhão *Munk*; c) Caixa metálica aberta no laboratório evidenciando a formação de coque.

2.4 Burn Loss do forno 3-C4 e dos fornos do Bloco C1

Para medição do *burn loss* do forno 3-C4 e dos fornos do Bloco C1, realizou-se testes de pesagem da massa de carvão enforada via balança estática instalada na máquina enfornadora, pesagem dos fornos correspondentes, após a coqueificação e

a caracterização do carvão e do coque com base em ensaios laboratoriais, e posteriormente calculava-se o *burn loss* dos fornos. Os testes dos fornos do Bloco C1 foram realizados durante dez ciclos, buscando aferir os resultados de *burn loss* do forno teste, e verificar o impacto das melhorias propostas no tempo líquido e no rendimento térmico dos fornos. A pesagem de carvão e de coque foi realizada seguindo o fluxograma de processo apresentado na **Figura 6**.

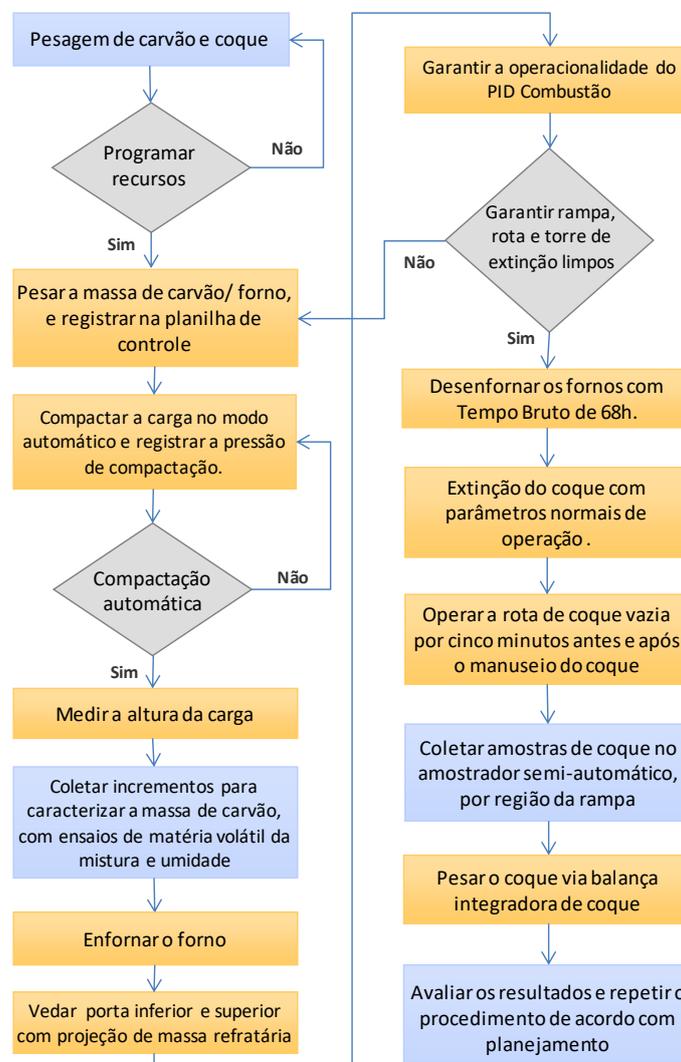


Figura 6. Fluxograma de pesagem de carvão e coque.

As melhorias implantadas com o objetivo de reduzir o impacto no resultado do *burn loss*, no tempo líquido de coqueificação e no rendimento térmico dos fornos foram:

- Realizar a vedação das portas inferiores e superiores (Lado Máquina - LM e Lado Coque - LC) com manta e projeção de massa refratária no dia do enfornamento, conforme ilustrado na **Figura 7 - a e b**;
- Realizar vedação nas janelas de inspeção da soleira dos fornos, conforme ilustrado na **Figura 7 - c**;
- Realizar a vedação completa no perímetro dos *Downcomers*, que são os canais verticais responsáveis em interligar a parte superior do forno à soleira;
- Realizar a vedação das entradas de ar falso no *header* (válvula primária), conforme ilustrado na **Figura 7 - d**;

- Realizar limpeza das válvulas com ar comprimido, para permitir um fluxo de ar contínuo nas válvulas primárias e secundárias;
- Realizar reparo das válvulas primárias e secundárias, de acordo com a inspeção do Controle Térmico;
- Operacionalidade da lógica do PID Combustão das válvulas;
- Realizar reparo dos termopares, de acordo com a inspeção do Controle Térmico;
- Realizar descarbonização periódica nos fornos durante o processo de coqueificação;
- Realizar compactação automática em todos os fornos do teste;
- Adotar altura de carga de carga mínima de 900 mm;
- Controlar a sucção das caldeiras em $-200 \text{ Pa} \pm 20 \text{ Pa}$.



Figura 7. a) Vedação das portas superiores e inferiores com projeção de massa refratária; b) Vista dos fornos após a projeção de massa refratária; c) Vedação das janelas de visitas com manta de fibra cerâmica; d) Vedação das válvulas primárias.

Os testes no forno 3-C4 e nos fornos do Bloco C1 foram realizados sem e com melhorias, sendo a projeção de massa refratária a principal melhoria que visava garantir a estanqueidade dos fornos de coque.

3 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resultados dos testes

A **Tabela I** apresenta os resultados dos testes do *burn boss* intrínseco ao processo de coqueificação e do *burn loss* do forno 3-C4 e dos fornos do Bloco C1 e o tratamento estatístico dos dados.

Tabela I. Resultados do *Burn Loss* dos testes.

Condições do teste	Forno/ Bloco	Amostra	Rendimento (%)	<i>Burn Loss</i> (%)
<i>Burn Loss</i> intrínseco - Caixa metálica	C1	n = 3	77,26	2,98
Teste do forno, sem melhorias	3-C4	n = 18	71,06	8,71
Teste do forno, com melhorias	3-C4	n = 18	72,67	6,43
Teste do bloco, com melhorias (10 ciclos)	C1	n = 64	74,29	5,98

O *Burn Loss* (BL) de 2,98% é o BL intrínseco ao processo de coqueificação via baterias de coque do tipo *Heat Recovery* da tkCSA.

Em função dos resultados apresentados no forno teste (3-C4), realizado sem e com melhorias, que mostrou um potencial de redução de aproximadamente 2,28% no *burn loss*, e em função dos impactos positivos observados no processo de coqueificação, decidiu-se realizar o teste, com a implantação das melhorias em

todos os fornos do Bloco C1, durante dez ciclos, com objetivo de confirmar os resultados alcançados no forno teste e verificar o impacto rendimento térmico dos fornos e no rendimento das caldeiras. O resultado médio do *burn loss* de 5,98% dos fornos do Bloco C1 confirmaram as expectativas iniciais de redução de aproximadamente 2% no *burn loss*, verificou-se também: a redução da temperatura média do coletor, o ganho térmico dos fornos, a estabilização na sucção da Caldeira C1 e a redução de 3,8 horas no tempo líquido de coqueificação dos fornos.

Para análises estatísticas considerou-se o Limite Inferior de Especificação (LIE) para o projeto *Burn Loss* e Perdas = 2,98% e o Limite Superior de Especificação - LSE o resultado médio do *Fiscal Year* 15/16 de 8,13%. A **Figura 8** nos mostra a avaliação da capacidade do processo, considerando os testes com e sem melhorias.

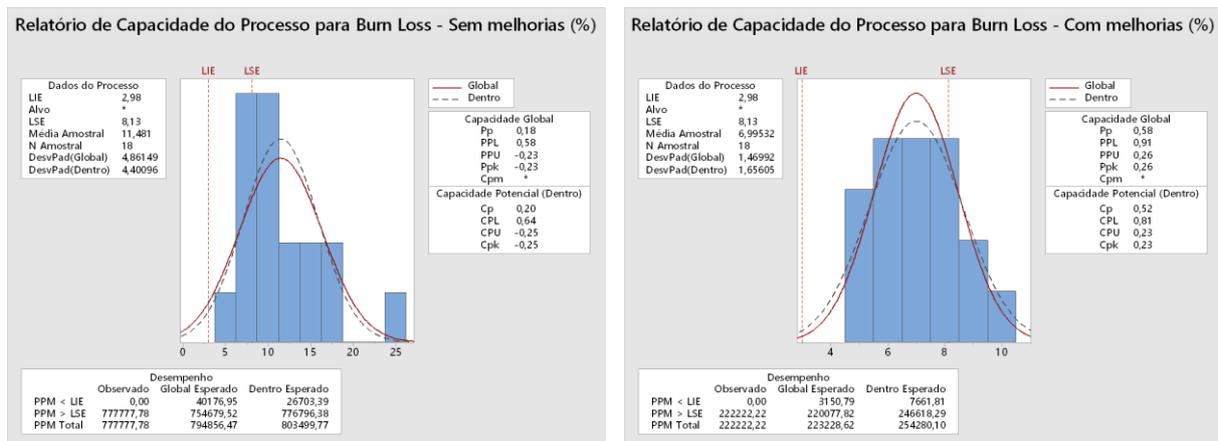


Figura 8. Análise de capacidade do processo *Burn Loss*.

Com base na análise de capacidade do processo, pode-se dizer:

- **Burn Loss - sem melhorias**, observa-se o Cp e Cpk muito baixo de 0,20 e -0,25 respectivamente, indicando a baixa capacidade do processo. O Cpk = -0,25 representa 75% da curva fora da especificação;
- **Burn Loss - com melhorias**, observa-se o Cp e Cpk 0,52 e 0,23 respectivamente, indicando que as melhorias adotadas para os testes contribuíram para aumentar a capacidade do processo.

A **Figura 9** mostra o tratamento estatístico dos resultados do *burn loss* dos fornos do Bloco C1, com melhorias. O teste de normalidade de dados do *burn loss* dos fornos do Bloco C1 nos mostra que os dados seguem uma distribuição normal, pois o p-valor > 0,05.

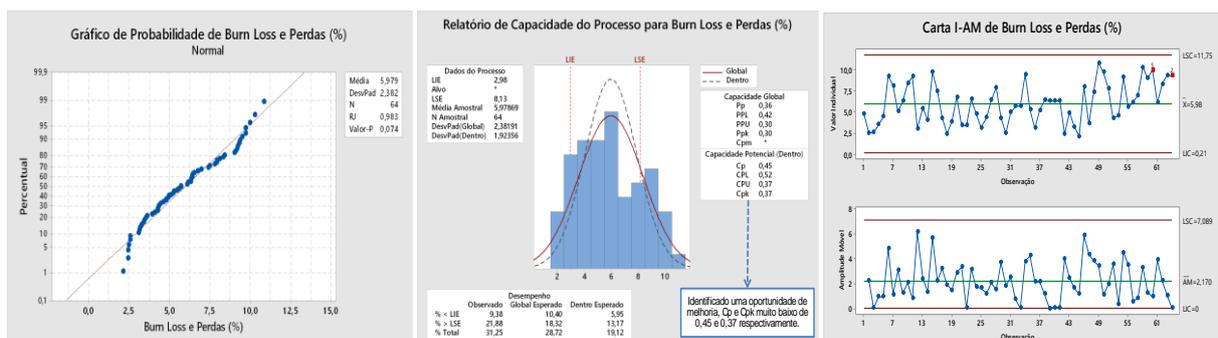


Figura 9. Análise de capacidade do processo *Burn Loss*.

O teste de normalidade de dados do *burn loss* dos fornos do Bloco C1 nos mostra que os dados seguem uma distribuição normal, com p-valor $> 0,05$. A análise de capacidade do processo apresenta C_p e C_{pk} de 0,45 e 0,37 respectivamente. Quando alteramos o LSE para 6%, que é a meta do projeto, isso nos indica o quanto o projeto entregará como melhoria. Neste caso como o $C_{pk} = 0$, isso nos indica que teríamos que aumentar em 50% o rendimento do processo para atingir a meta proposta. A carta de controle nos mostra uma variação dos pontos entre os limites de especificação, desta forma, pode-se dizer que o processo está sob controle. Porém, deve-se ressaltar que houve uma tendência nos resultados finais de deslocamento acima da média.

3.2 Implantação e Plano de Controle do Projeto *Burn Loss* e Perdas

A partir da análise criteriosa dos resultados dos testes, onde se aferiu o *burn loss* intrínseco ao processo de coqueificação em baterias de coque tipo *Heat Recovery* e a eficiência das ações implantadas para redução *burn loss*, e da análise de custo benefício, com ganhos apurados pelo Programa *Ultimate Performance* da tkCSA, decidiu-se pela implantação do projeto. O projeto de projeção de massa refratária nas portas inferiores e superiores e as melhorias de processo foram implantados em março 2017.

Como estratégia de controle, elaborou-se um Plano de Controle para garantir o ajuste sistêmico das ações implantadas, com a definição de KPI's (*Key Performance Indicator*) adequados que garantissem a sustentabilidade do projeto.

A **Figura 10** apresenta a evolução do Indicador do Projeto (KPI): *Burn Loss* e Perdas, onde se observa o impacto das melhorias implantadas neste KPI, principalmente nos meses de abril e maio de 2017, com *Burn Loss* de 6,04% e 5,95% respectivamente, ou seja, a meta do projeto foi alcançada com três meses de antecedência.

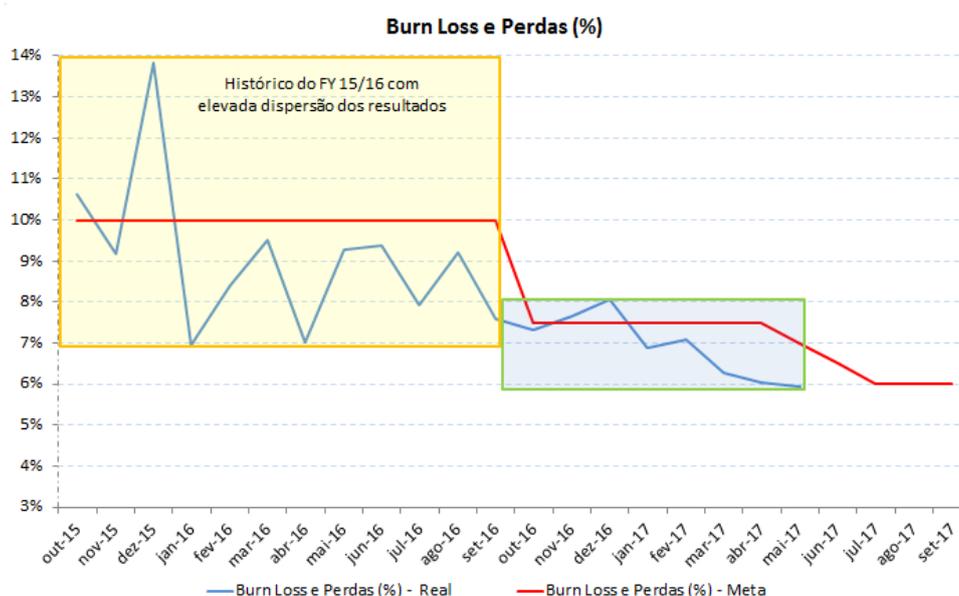


Figura 10. Evolução do indicador do projeto: *Burn Loss* e Perdas (%).

A Análise de Capacidade do Tempo Líquido (TL), **Figura 11**, nos mostra um Cpk de -0,55 para os dados históricos e um Cpk de 0,67 para os dados de abril e maio de 2017, indicando que as melhorias implantadas contribuíram para aumentar a capacidade do processo. Observa-se também uma redução significativa no tempo líquido de coqueificação dos fornos, passando em média de um TL = 67,57 horas, com desvio padrão de 1,59 horas, para um TL = 64,51 horas, com desvio padrão de 1,21 horas, com uma redução de 3,06 horas no tempo líquido de coqueificação, ou seja, confirmando os resultados dos testes e sendo compatível com os novos volumes de produção planejados para o FY 17/18, de 1,726 Mt/a.

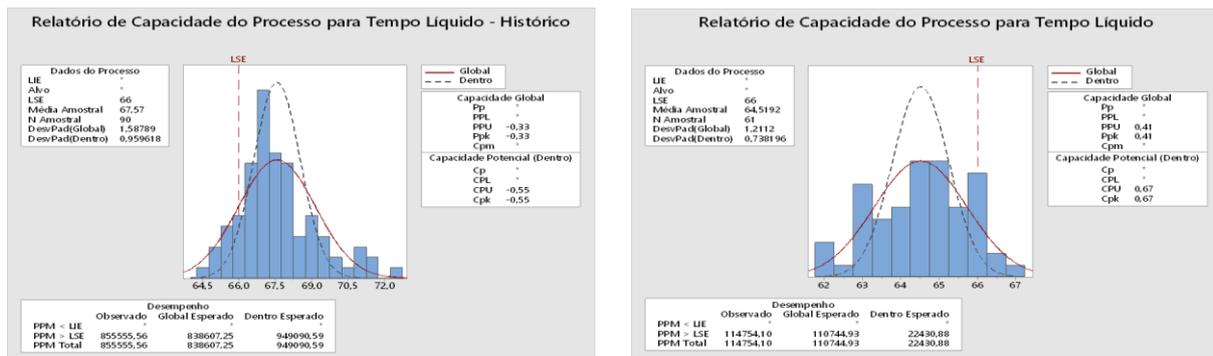


Figura 11. Análise de capacidade do Tempo Líquido de Coqueificação.

A **Figura 12** mostra uma foto antes e após a implantação das ações para redução do *Burn Loss*.

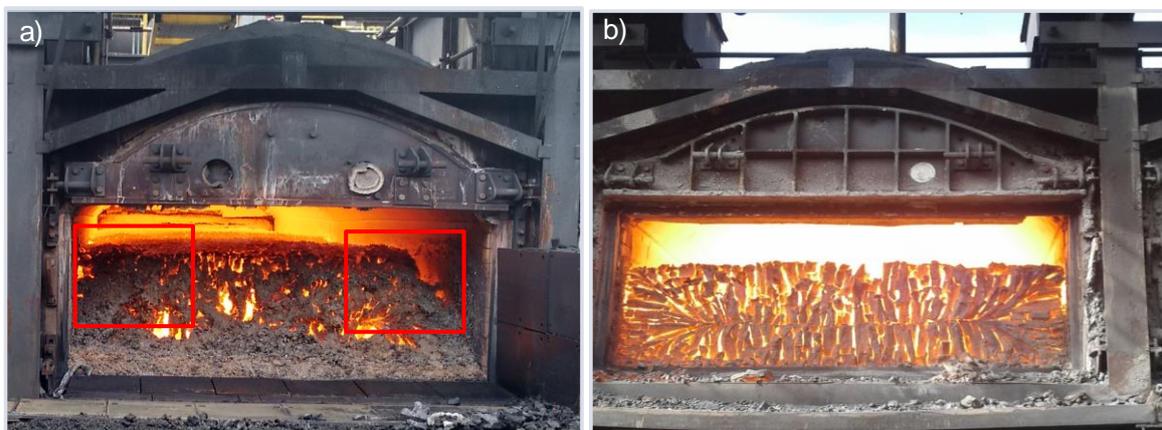


Figura 12. a) Forno antes da implantação das melhorias de processo; b) Forno após implantação das melhorias de processo.

Outros benefícios, ainda não quantificados, advindos da implantação das melhorias propostas são:

- prolongamento da vida útil da estrutura metálica dos fornos e portas, em função da redução da incidência de chamas sob estas estruturas;
- redução do acúmulo de resíduo nas portas inferiores, contribuindo para o prolongamento da vida útil das portas;
- equalização da temperatura ao longo dos coletores de gases, o que contribuirá para adotarmos uma mesma carga por forno para todos os fornos da Coqueria da tkCSA;
- redução das emissões visíveis no topo, após vedação das portas e válvulas primárias com massa refratária.

4 CONCLUSÃO

O trabalho bem estruturado e que utiliza a metodologia adequada traz resultados mais expressivos para empresa. Desta forma, deve-se buscar o desenvolvimento de trabalhos sempre de forma estruturada, com a delimitação adequada do problema através da elaboração de um mapa de raciocínio, com a definição de metas tangíveis e com estruturação de planos de ação e planos de controle que permitam alcançar os resultados estabelecidos.

O *Burn Loss* intrínseco ao processo de coqueificação em baterias de coque tipo Heat Recovery da tkCSA é de 2,98%.

O *Burn Loss* do Bloco C1, com melhorias, considerando uma amostra de 64 resultados foi em média de 5,98%.

Observou-se a partir da implantação do projeto uma redução significativa no Tempo Líquido (TL) dos fornos, passando em média de um TL = 67,57 h, com desvio padrão de 1,59 h, para um TL = 64,51h, com desvio padrão de 1,21 h, com uma redução de 3,06 h no TL, o que certamente contribui para uma maior estabilidade do processo e conseqüente aumento na produção de coque e vapor.

A meta do projeto era que o indicador *Burn Loss* e Perdas (%) atingisse o valor de 6% a partir julho de 2017, no entanto, esta meta foi atingida no mês de abril de 2017, com três meses de antecedência.

A análise de custo benefício mostrou que o Projeto *Burn Loss* e Perdas tem um potencial de economia de 10,3 MUSD/ a, sendo o valor acumulado no FY 16/17, apurado pelo Programa *Ultimate Performance* da tkCSA, de 2,5 USD/ t de aço produzido.

REFERÊNCIAS

- 1 Coelho, Robson Jacinto. **Modelos de previsão de qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno piloto de coqueificação da CST**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2003.
- 2 Silva, J.E.; Oliveira, A.F. **Evolução do uso de carvões “soft” e “steam coal” na coqueria Heat Recovery e impactos na qualidade do coque e no custo da mistura**. 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2015, Rio de Janeiro – RJ.
- 3 Junqueira, Y.S.F.; Coelho, R.J.; Henrique, N.I.; *at all*. **Stamping Charger com automatismo” - Compactação da massa de carvões - Estudo teórico e análise prática na tkCSA**. 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2014, Belo Horizonte, MG.
- 4 Junqueira, Y.S.F.; Henrique, N.I.; Coelho, R.J.; Henrique, N.I.; *at all*. **PID Combustão – Um melhor controle para queima dos gases em coqueria Heat Recovery**. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2016, Rio de Janeiro, RJ.
- 5 Henrique, N.I.; Coelho, R.J.; Junqueira, Y.S.F.; *at all*. **Reparo a quente nos coletores de gases de combustão, através da projeção de massa refratária com vídeo monitoramento**. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2016, Rio de Janeiro, RJ.