

CONTROLE AUTOMÁTICO DE COMBUSTÃO DAS BATERIAS DE COQUE DA CST ARCELOR BRASIL¹

Afonso Estevão Torres²

Carlos Henrique Sampaio D'Andréa³

Gustavo Henrique Marietto Gonçalves⁴

Leonardo Barbosa de Oliveira Mello³

Nilson Luiz Biccás⁵

Resumo

A Coqueria é a área responsável pela produção de coque metalúrgico para os Altos-Fornos: o coque é obtido através do aquecimento do carvão mineral em fornos verticais aquecidos pela queima de um combustível gasoso, Gás de Coqueria ou uma mistura de Gás de Coqueria com Gás de Alto-Forno. Este aquecimento ocorre de maneira indireta através da transferência do calor proveniente da queima do combustível nas câmaras de combustão pelas paredes refratárias dos fornos. A complexidade do processo em questão e a grande quantidade de energia envolvida demandam um controle apropriado do aporte de energia e das emissões geradas na Área da Coqueria. O objetivo deste trabalho é apresentar a importância do Controle Automático de Combustão para a garantia da estabilidade operacional das baterias de coque e do maior controle do tempo líquido de coqueificação. Este controle é guiado por um modelo matemático cujos parâmetros de entrada são algumas variáveis do processo e de matéria-prima e o parâmetro de saída, parâmetros de combustão. Tempo Líquido de coqueificação fora de especificação pode causar perdas de aporte térmico e, por outro lado, um aporte térmico excessivo compromete a vida útil das baterias de coque. Além disso, este trabalho apresenta a evolução do comportamento do processo de combustão como elemento importante na promoção da estabilidade operacional da planta.

Palavras-chave: Combustão; Tempo líquido de coqueificação.

AUTOMATIC COMBUSTION CONTROL OF THE CST'S COKE OVEN BATTERIES

Abstract

The coking ovens are responsible for the transformation of coal into coke. For this transformation to take place, the required energy is provided by burning coke oven gas – formed during the coking process – or of a mix of coke oven gases (COG) and blast furnace gases (BFG). The heating of coal is carried out indirectly, with the heat of the combustion gases being transferred through walls of the oven by conduction. The great complexity of the processes involved and the large quantity of heat required for transformation causes the appropriate control of emissions and inputs used in the coke plant. The objective of the automatic combustion control is to guarantee the operational stability of the coke batteries based on the control of the coking time. This control is guided by a mathematical model which inputs are process variables and raw materials parameters; outputs are combustion parameters. Coking time out of specification can cause lack of thermal input, or, on the other hand, extreme thermal input to the battery, with reduction of useful life of the ovens. Therefore, this paper will present the evolution of the performance of the burning process, providing a stability of the coking time.

Key words: Combustion; Net coking time.

¹ *Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

² *Engenheiro Especialista da Divisão de Engenharia de Automação*

³ *Engenheiro Especialista da Divisão de Controle Técnico da Área de Gusa*

⁴ *Engenheiro Especialista da Divisão de Coqueria*

⁵ *Supervisor de Controle Térmico e PVU da Seção de Coqueria*

1 INTRODUÇÃO

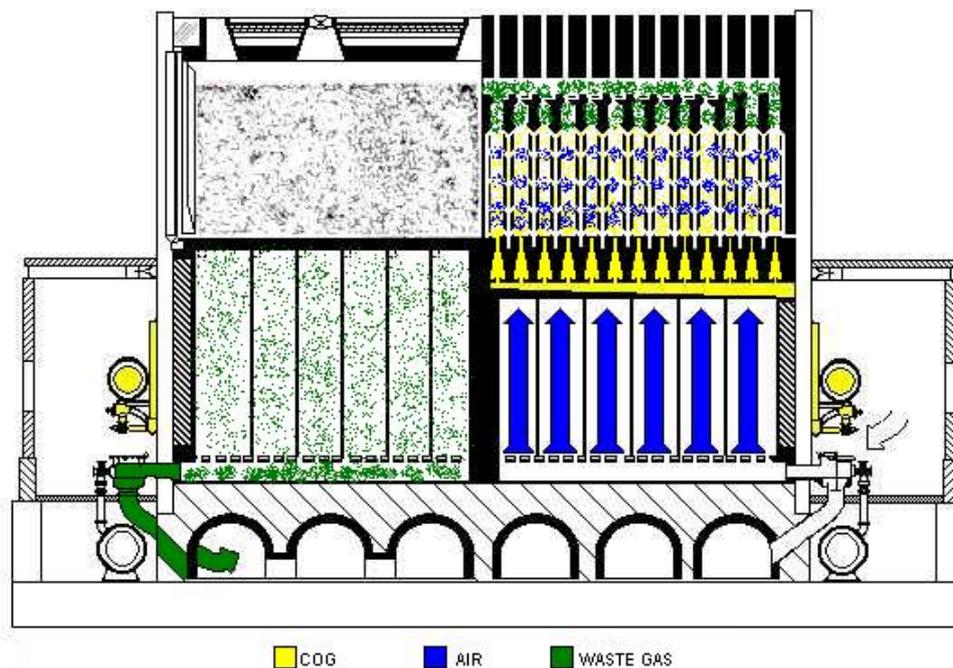
A Coqueria da CST ARCELOR BRASIL opera de maneira contínua desde 1983 é composta por 3 baterias de fornos (na qual cada bateria possui 49 fornos), pela planta de Tratamento de Gás – gás COG bruto oriundo do processo de coqueificação do carvão mineral – e uma planta de Apagamento a Seco – CDQ – composto por 5 unidades. O projeto das baterias da CST ARCELOR é do modelo “Carl Still Half-Divided”. A Tabela 1 apresenta as principais características dos fornos de coque:

Tabela 1 – Principais Características dos Fornos de Coque da CST Arcelor Brasil

Característica	Unidade	Valor
Comprimento	mm	15.200
Altura	mm	6.500
Largura Média	mm	420
Volume Útil	m ³	39,5
Consumo de Carvão (2006)	Mt/ano	2,3
Produção de Coque (2006)	Mt/ano	1,8
Índice Operacional	%	150

Fonte: Manual de Operação

Cada parede de aquecimento é composta por 32 câmaras de combustão – 15 no Lado Coque e 17 no Lado Máquina – interligadas por um canal de gás (fumos), este proveniente da queima do combustível nas câmaras. As baterias podem utilizar como combustível o Gás de Coqueria COG ou o Gás Misto MG (10% COG e 90% BFG – Gás de Alto Forno). O combustível é então queimado em ciclos alternados de 20 minutos em cada “lado”. A Figura 1 ilustra este processo.



Fonte: Manual de Operação

Figura 1 – Esquema do processo de combustão das baterias Carl Still Half-Divided

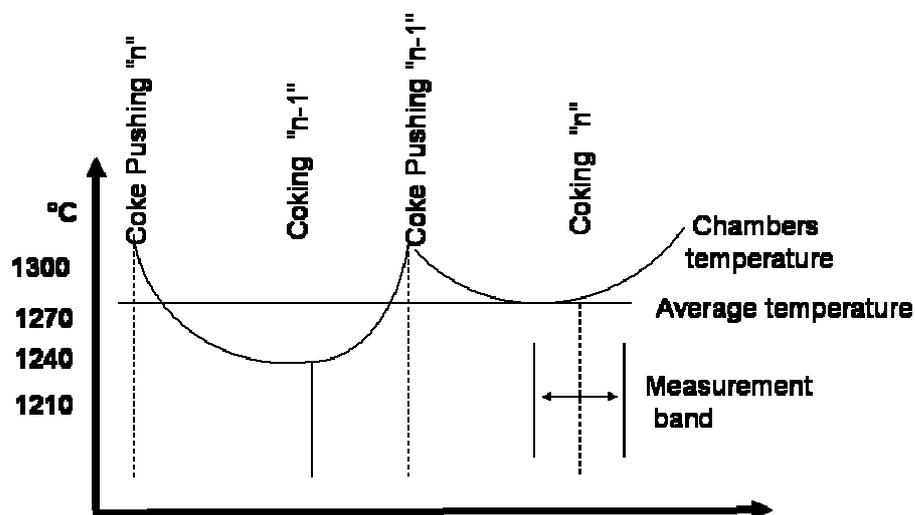
De acordo com a Figura 1, supondo que o lado de queima é o Lado Coque, o ar é admitido através nas caixas de ar e é pré-aquecido nos regeneradores; já o gás, considerando o COG, é admitido diretamente em cada uma das 32 câmaras, onde ocorre efetivamente a queima, através de um duto denominado canal de gás. Os fumos desta combustão são conduzidos ao outro lado da bateria, neste caso o Lado Máquina, aquecem as demais paredes que não estão em combustão, atravessam os regeneradores, atravessam os canais de fumaça e chegam à atmosfera através das chaminés. Este ciclo garante o aquecimento de ambos os lados das baterias dentro de parâmetros pré-estabelecidos.

2 MÉTODOS E MATERIAIS

2.1 Controle da Variabilidade do Processo

Somente é possível alcançar a estabilidade operacional em uma bateria de coque através de práticas que garantam o controle das variações através, por exemplo, de: cumprimento da programação de enforamento e desenforamento, manutenção adequada do “encharque” térmico e do perfil de temperatura ao logo das paredes conforme especificação do fabricante e disponibilidade/confiabilidade das máquinas-móveis (Máquinas Desenforadora, Guias de Coque, Carros de Carregamento e Locomotivas) dentro dos padrões.

A temperatura das câmaras de combustão deve ser mantida e controlada de modo a preservar a vida útil das paredes refratárias e produzir coque dentro dos parâmetros de qualidade pré-estabelecidos. Esta temperatura não é constante ao longo do ciclo de coqueificação de cada forno em função da seqüência operacional seguida por cada forno. A Figura 2 ilustra esta variação em um forno “n”.



Fonte: Manual de Operação

Figura 2 – Variações de temperatura ao longo de um ciclo de coqueificação genérico

Para que a variabilidade do processo pudesse ser controlada, foi criado um indicador para medir os desvios operacionais de maneira simples e de fácil interpretação. Este indicador é denominado *Índice de Acerto - IA*.

O IA é calculado da seguinte maneira:

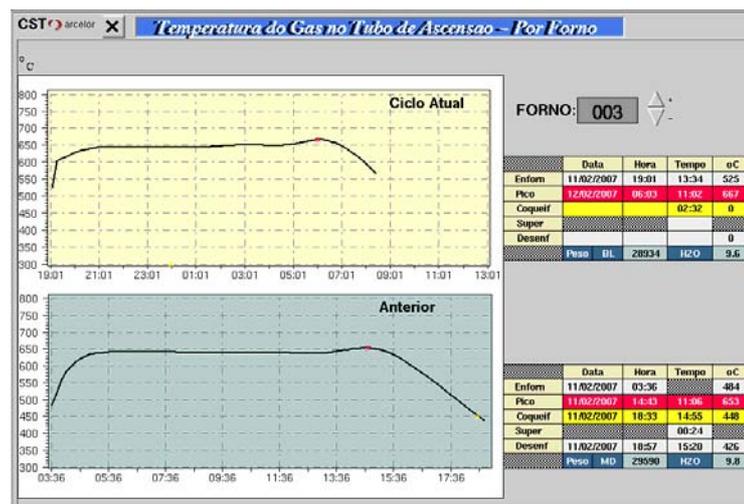
$$IA = \frac{\text{Nº de desenforamentos dentro do horário programado}}{\text{Nº total de desenforamentos}} \times 100$$

Para o Conjunto Térmico #01, a tolerância para o horário programado é de 15 minutos e para o Conjunto Térmico #02, 10 minutos (considerando um Índice Operacional de 150%). Fornos fora de escala, isto é, fora da seqüência operacional programada, e fornos em manutenção programada são desconsiderados no cálculo. Atualmente, a meta diária do IA é de 97,50%. O cumprimento do IA dentro da meta especificada garante a manutenção do encharque térmico “ótimo” para as Baterias.

2.2 Conceito do Controle Automático de Combustão – ACC

Originalmente, a definição do ponto de coqueificação dos fornos era baseada na experiência do operador do processo, ou seja, por detecção visual (através da coloração da chama nos tubos de ascensão) o ciclo de coqueificação era considerado encerrado. Este procedimento não garantia o momento exato em que todo o carvão enornado havia se transformado em coque e se havia gerado os demais sub-produtos do processo, como gás, alcatrão e licor amoniacoal.

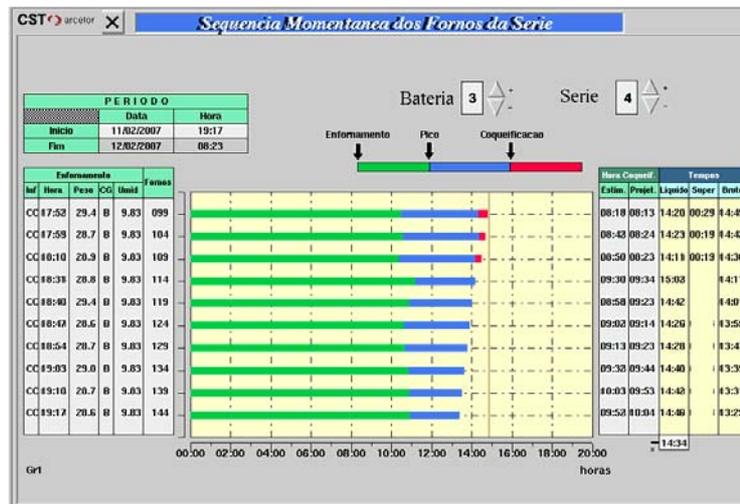
Em 1996, com apoio técnico da empresa japonesa Kawasaki Steel, a CST ARCELOR BRASIL adotou um sistema automático de detecção do tempo líquido de coqueificação através da medida de temperatura do gás gerado no processo. Termopares foram instalados em cada um dos 147 fornos e se passou a obter a curva de temperatura de todo o ciclo de coqueificação, como mostrado na Figura 3.



Fonte: Computador de Processo - PROCOM

Figura 3 – Registro de temperatura dos ciclos de coqueificação

Com o monitoramento do processo feito pelo Computador de Processo – PROCOM, todos os dados do ciclo (Tempos de Coqueificação, Carga Enfornada, Horários de Enfornamento e Desenfornamento, etc.) passaram a ser computados de maneira “on-line” pelo sistema, conforme mostrado na Figura 4, facilitando as ações necessárias para a manutenção da estabilidade da planta. A estabilidade do tempo Líquido de coqueificação resulta na condição térmica adequada com conseqüente estabilização no consumo de calor das baterias.



Fonte: Computador de Processo - PROCOM

Figura 4 – Seqüência de coqueificação e demais dados computados pelo PROCOM

2.2 Modelo Matemático do ACC

O ACC deve assegurar a estabilidade operacional da planta e seu modelo matemático tem a função específica de guiar o processo de combustão, auxiliando na definição dos seus *set points*. As entradas do modelo são variáveis de processo e de matérias-primas e, como resultado, as saídas são os parâmetros de combustão. Este modelo aponta quais ajustes devem ser feitos nas vazões de gás para que a energia transmitida das câmaras para o forno seja suficiente para transformar o carvão em coque respeitando a seqüência operacional programada. A vazão de gás para os fornos depende dos seguintes parâmetros:

- Tempo Líquido de Coqueificação (ΔTL);
- Umidade da Matéria-Prima (carvão) (ΔU);
- Carga Seca de Carvão Enfornado (ΔP).

Estes parâmetros são verificados a cada 4 horas através de correlações entre valores padrões e valores reais de processo, considerando ainda o comportamento dos fornos neste período. Após esta verificação, novos parâmetros de processo são calculados para o próximo período. Os parâmetros abaixo são utilizados para medir a variação de temperatura nas câmaras de combustão (ΔT):

$$\Delta T = f(\Delta TL, \Delta P, \Delta U)$$

Após esta verificação, um novo set point de temperatura pode ser definido para as câmaras (Tset point) considerando o valor médio de temperatura das últimas 4 horas:

$$T_{set\ point} = T_{medium} + \Delta T$$

A vazão de gás é definida pela variação de temperatura nas câmaras de combustão:

$$\Delta V = f(\Delta T)$$

Da mesma maneira, por fim, um novo set point de vazão de gás (Vset point) é definido considerando o valor médio da vazão das últimas 4 horas:

$$V_{set\ point} = V_{medium} + \Delta V$$

Quando o combustível utilizado for o COG, o modelo deve considerar ainda o período de pausa da queima entre cada ciclo de reversão. Já quando o combustível utilizado for o MG, o modelo deve considerar para os novos set points o Poder Calorífico dos gases da mistura (COG e BFG).

2.3 Metodologia Seis Sigma para o Controle do Tempo Líquido

Atuando de maneira generalizada em todos os fornos, o ACC é uma ferramenta importante e eficiente para guiar a estabilização e administrar pequenas variações ao longo do processo. Caso algum problema crônico ou variação localizada ocorra em poucos fornos ou em determinada região das baterias, o modelo já não se torna efetivo para correção destas situações: este tipo de condição requer uma atuação específica de acordo com o problema encontrado.

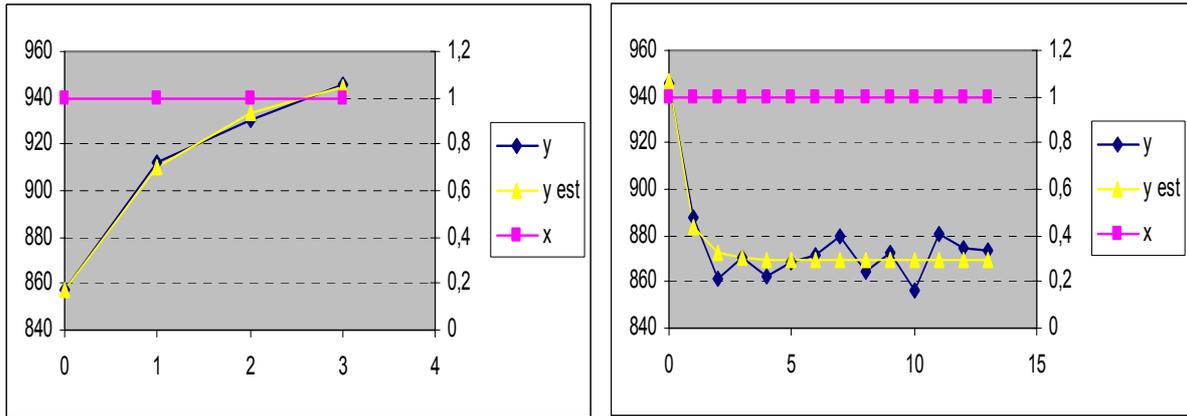
A aplicação correta da metodologia estatística para medidas de individuais por forno, no nível 6 Sigma, pode garantir a ocorrência de apenas 3,4 defeitos a cada 1 milhão de oportunidades. A CST ARCELOR Brasil vem adotando esta filosofia de gerenciamento da rotina do processo com foco na eliminação de defeitos enfatizando as etapas de análise dos fenômenos, medidas de processo e eliminação dos problemas no processo de coqueificação. A idéia central é medir os defeitos que aparecem na rotina do processo, tanto nas séries de fornos quanto individualmente por forno de maneira que se alcance um nível de qualidade que tenha como resultado o “zero defeito”.

2.4 Meta Estipulada para o Tempo Líquido

A meta definida para o Tempo Líquido de coqueificação das séries de fornos é de 890 minutos com Limite Superior de Controle LSC de 900 minutos e Limite Inferior de Controle LIC de 880 minutos. Já para o controle individual dos fornos, o LSC passa a ser de 910 minutos e o LIC de 860 minutos para uma mesma meta de 890 minutos: esta diferença ocorre em função do número individual de fornos por série (9 ou 10 fornos, dependendo da série). Para a série, o desvio Sigma estipulado é de 3 minutos, ficando então o $\pm 3\sigma$ em ± 10 minutos. Para o controle individual dos fornos, o $\pm 3\sigma$ é de ± 30 minutos.

2.5 Resposta do Tempo Líquido à Ação de Gás

Ajustes na vazão de gás dos fornos, tanto de forma individual como de maneira generalizada, são necessárias para a manutenção da estabilidade operacional da planta. Para se conhecer a resposta do tempo líquido dos fornos aos ajustes da vazão de gás, foi elaborado um experimento em que ações controladas de aumento e redução de vazão de gás foram intencionalmente geradas em um mesmo forno supondo que, em ambos os diferentes momentos, ele estivesse em condições normais de operação. A figura 5 apresenta os resultados do experimento:

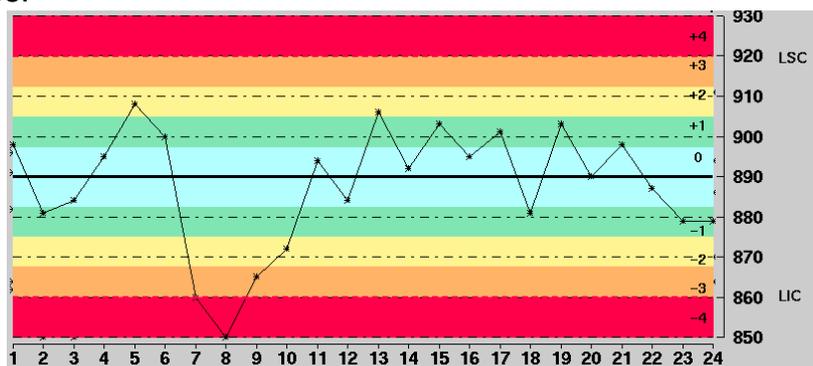


(5a) (5b)
Figura 5 (a e b) – Variações de tempo líquido em função das ações de gás

Este experimento mostrou inicialmente que o tempo para a estabilização do tempo Líquido para uma ação de aumento da vazão de gás (Figura 5a) é maior do que o tempo de resposta para uma ação de redução da vazão de gás (Figura 5b). Em função da necessidade de uma maior quantidade de testes para a confirmação precisa deste conceito, novos experimentos estão sendo realizados.

2.6 Utilização de Carta de Controle

Considerando os resultados observados durante os primeiros experimentos, foi observada a necessidade de uma maior otimização das atuações realizadas no processo de maneira a se atingir as metas estipuladas e também para monitorar o comportamento do ACC. A utilização das cartas de controle, na filosofia do conceito de Controle Estatístico de Processo – CEP, passou a auxiliar a operação do processo através da análise sistemática dos gráficos. A Figura 6 mostra o modelo utilizado na Coqueria para o controle do tempo líquido de coqueificação das séries de fornos.



Fonte: Computador de Processo - PROCOM

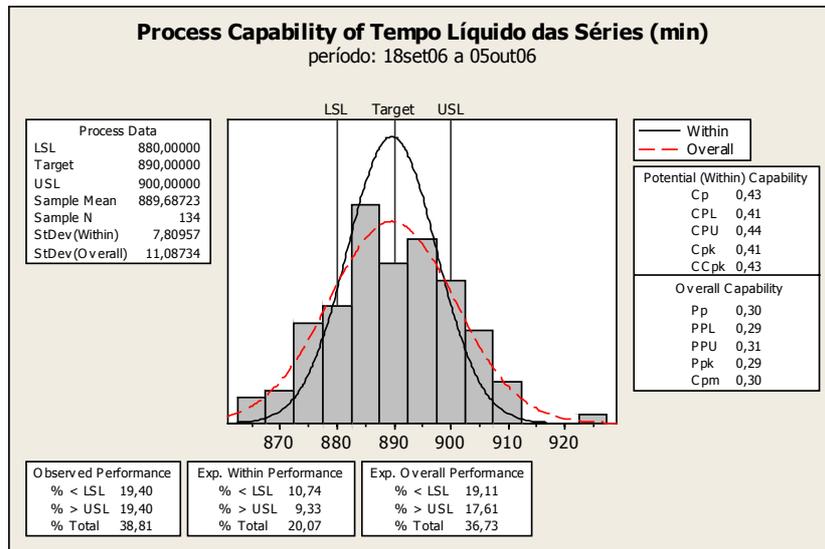
Figura 6 – Carta de controle das séries de fornos

Esta carta, conhecida como Gráfico de 4 pontos, é um tipo específico de controle por zona, sendo as 5 zonas distribuídas simetricamente em relação à linha central e cada zona recebe um peso (score) específico de acordo com a distância à meta estabelecida.

Caso o processo esteja dentro do padrão 6 Sigma, de cada 3 resultados, 2 estarão dentro da zona "0". Estando os pontos além da zona "3", o processo pode ser considerado fora de especificação.

Se a carta acumular uma pontuação igual o maior a 4 pontos (em valor absoluto), significa que está na hora de atuar no processo (aumento ou redução da vazão de gás). A partir desta informação, uma análise mais detalhada é realizada e então se toma a decisão de como atuar no processo.

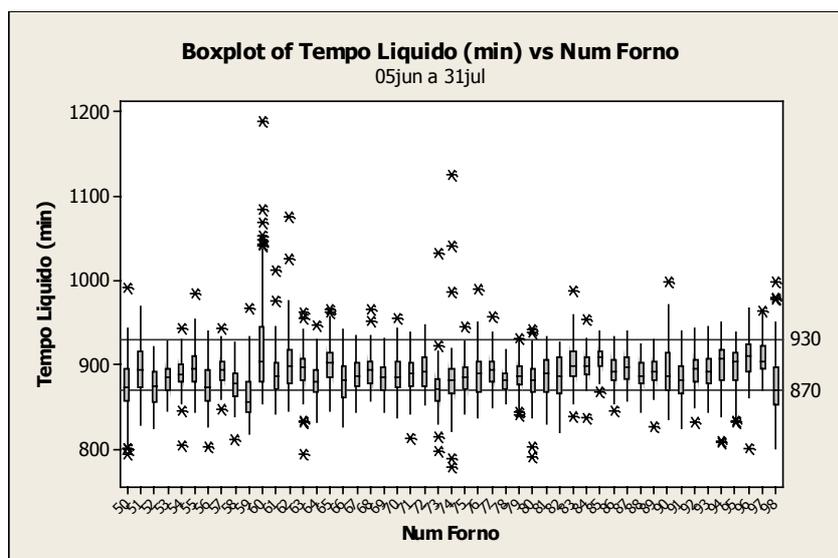
Para a avaliação da capacidade do processo de coqueificação, considerando a meta para as séries de 890 ± 10 minutos, utiliza-se a ferramenta estatística mostrada na Figura 7.



Fonte: Software Statistica

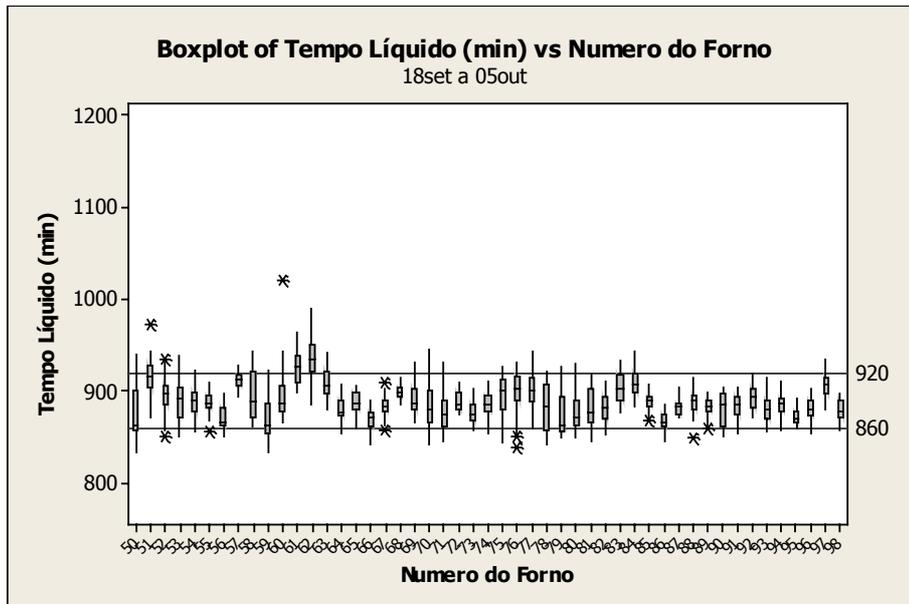
Figura 7 – Carta de capacidade do processo (18/09/06 a 05/10/06)

A carta descreve um processo praticamente centrado na meta porém com a ocorrência de causas especiais. A linha vermelha representa a curva normal verificada no processo. Para complementar as avaliações feitas pelas Cartas de Controle e de Capacidade de processo, foi utilizada a Carta de Box Plot individualmente por forno. A Figura 8 apresenta o comportamento da Bateria de Coque #02 antes das práticas já descritas e a Figura 9 o comportamento da mesma bateria após a implementação de tais práticas.



Fonte: Software Statistica

Figura 8 – Tempo Líquido da Bateria #02 (05/07/06 a 31/07/06)



Fonte: Software Statistica

Figura 9 – Tempo Líquido da Bateria #02 (18/09/06 a 05/10/06)

3 CONCLUSÕES

Novas práticas operacionais foram implementadas com a aplicação das ferramentas estatísticas apresentadas, entretanto, estas ferramentas sozinhas não garantem a estabilidade desejada para o processo sem uma metodologia sistemática para o ajuste individual de fornos que venham a apresentar problemas ou variações localizadas. Sem estes ajustes, pontos fora de controle continuarão a impedir o funcionamento do ACC.

Todas as ações implementadas vêm mostrando uma aumento na estabilidade do processo e novos procedimentos estão sendo elaborados para aumentar a eficiência do ACC em modo “automático”.

Agradecimentos

Agradecemos a toda equipe de Controle Térmico e Preservação da Seção de Coqueria da CST ARCELOR Brasil pelo empenho e pela colaboração apresentada para a realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 O.J. Silva, O.B. Valente, C.H.S. Dandréa, J.M. Clemente, M.R. Silva, J.M. Oliveira, L.S. Mascena, “Controle Automático da Combustão nas Baterias de Coque da CST”, *58º Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro Brasil, 2003.
- 2 G. Brue, “*Six Sigma for Managers*”, McGraw-Hill Co., 2002.
- 3 V.F. CAMPOS, “*Gerenciamento da rotina de trabalho do dia-a-dia*”, Editora Desenvolvimento Gerencial, 2001.
- 4 O.D. Filho, O.F.B. Drumond, “*Itens de Controle e Avaliação de Processos*”, Fundação Christiano Ottoni, 1994.