

# Avaliação da aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP) ao beneficiamento do carvão mineral realizado no JigueBaum

Thiago Oliveira Rassier<sup>a</sup> (thiago.rassier@gmail.com); Fernanda Siqueira Souza<sup>b</sup>  
(fe\_ssouza@producao.ufrgs.br); Carla Schwengber ten Caten<sup>c</sup>  
(tencaten@producao.ufrgs.br)

<sup>a</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, PPGE/UFGRS, RS – BRASIL

<sup>b</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, PPGE/UFGRS, RS – BRASIL

<sup>c</sup> Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, PPGE/UFGRS, RS – BRASIL

## Resumo

O carvão mineral representa uma importante fonte de geração de energia na matriz energética de muitos países. Por ser uma fonte não-renovável é importante obter o maior aproveitamento possível e um controle de qualidade eficaz. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é realizar um estudo para verificar a aplicação do controle estatístico de processo ao beneficiamento e, assim, alavancar a qualidade. O estudo mostrou que há uma grande variância no processo e as técnicas de controle estatístico de processo podem ser utilizadas para melhorar o processo de beneficiamento por JigueBaum.

*Palavras chave: CEP; Cartas de controle; Carvão mineral; JigueBaum.*

## 1 Introdução

Conforme a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2002), a energia tornou-se um recurso indispensável à sobrevivência humana. As tecnologias de geração, transmissão e uso final proporcionam que regiões, antes desocupadas e pouco desenvolvidas, tornem-se grandes centros urbanos e desenvolvidos economicamente.

Ainda de acordo com a ANEEL, grande parte dos recursos naturais encontra-se em regiões pouco desenvolvidas, longe dos centros consumidores e com fortes restrições ambientais. Dessa forma torna-se indispensável que se conheça os recursos disponíveis, bem como, as tecnologias, sistemas de aproveitamento e a necessidade energética de cada setor do país.

Atualmente, o Brasil possui diversas fontes de geração de energia, como por exemplo, hidrelétricas, biomassa, gás, petróleo, nuclear, eólica, solar e carvão mineral. De acordo com os dados da ANEEL (2011), entre as fontes disponíveis, a que possui maior capacidade instalada de geração é a hidrelétrica, a qual representa 67,29% da capacidade total, seguida de gás com 10,36%, biomassa com 6,39%, petróleo com 5,47%, nuclear com 1,68%, carvão mineral com 1,34%, eólica com 0,70%, solar com <0,01% e, 6,67% da energia utilizada é importado de países vizinhos.

O objeto de estudo deste trabalho é a geração de energia através do carvão mineral. De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2002), o carvão mineral é um combustível fóssil sólido formado a partir da matéria orgânica de vegetais depositados em bacias sedimentares. Por ação de pressão e temperatura em ambiente sem contato com o ar, em decorrência de soterramento e atividade orogênica, os restos vegetais ao longo do tempo geológico solidificam-se, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono, em um processo denominado carbonificação.

De acordo a ANEEL (2011), o Brasil possui dez usinas térmicas que operam com carvão mineral, com capacidade de geração de 1.944,04 KW. O carvão mineral é uma fonte não renovável, a qual sofre muita

resistência em virtude dos impactos ambientais causados durante a sua extração visto que o processo de extração, beneficiamento e queima do carvão mineral provocam vários danos ao meio ambiente, desde a mudança da paisagem, provocado pela abertura de cavas, até a contaminação dos recursos hídricos, provocado pela drenagem das águas sulfurosas das minas (ANEEL, 2011).

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo verificar a viabilidade de melhorar o processo de beneficiamento através da utilização de técnicas de controle estatístico de processo a fim de se obter um aproveitamento maior do minério e aumentar o tempo de vida útil das reservas.

O presente trabalho está estruturado em 5 seções. Além desta introdução, a seção 2 apresenta o referencial teórico contemplando conceitos de controle estatístico de processo, capacidade do processo e desdobramento da função qualidade - QFD. Na seção 3, são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. Os resultados obtidos encontram-se na seção 4, e a seção 5 resume as principais contribuições do trabalho.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 Controle Estatístico de Processos

Antunes, *et al* (2008) afirma que a indústria brasileira consolidou posição competitiva e sólida no plano internacional, baseada na qualidade dos processos e produtos, na eficiência e na qualidade das operações. Ainda nos tempos atuais, o maior desafio das empresas é manter a satisfação de seus clientes por meio de processos que possuam um desempenho excepcional.

De acordo com Krajewski *et al* (2009) uma ótima maneira de se buscar o aperfeiçoamento dos processos é através da filosofia de melhoria contínua, a qual é baseada em um conceito japonês chamado de *Kaizen*. Segundo esta filosofia, qualquer aspecto de um processo pode ser melhorado. A ideia geral é não esperar até que um problema enorme aconteça, e sim agir preventivamente. Com isso, o CEP é a aplicação de técnicas estatísticas que tornam possível determinar se um processo está atendendo às expectativas dos clientes (RIBEIRO E CATEN, 2010). A aplicação do CEP proporciona à empresa o aumento da produtividade, uma vez que, aplicado corretamente, o mesmo diminui a necessidade de retrabalhos e refugos.

Krajewski, *et al*(2009) e Ribeiro e Caten (2010) afirmam que não há dois serviços ou produtos idênticos, pois a variabilidade nos *outputs* está sempre presente, mesmo que o processo esteja operando conforme o desejado. Essa variação possui índices aceitáveis, os quais representam limites que identificam se um determinado produto ou serviço está conforme ou não. Existem diversos fatores que podem influenciar tal variação, entre eles o treinamento de um operador, manutenção de um determinado equipamento, mudança no procedimento, etc.

Na implantação de um controle estatístico de processo, é importante identificar as causas da variabilidade desse processo, de forma que, depois de identificá-las, ações possam ser tomadas a fim de se reduzir a variação. A variabilidade, no processo, está associada a dois tipos de causas: as comuns e as especiais. Krajewski, *et al*(2009) discorrem que as causas comuns são totalmente aleatórias e inevitáveis no processo. Ribeiro e Caten (2010) acrescentam ainda que a variabilidade das causas comuns representam o padrão natural do processo, ou seja, são causas que ocorrem diariamente mesmo com o processo operando sob condições normais. Quando o processo sofre a ação apenas das causas comuns, o mesmo é dito como estável ou sob controle estatístico.

As causas especiais não são aleatórias, são de fácil identificação e passíveis de eliminação. Na presença de causas especiais, o processo sai de seu padrão natural de operação e reduz significativamente seu desempenho e, geralmente, são corrigidas no local e, por isso, são de responsabilidade dos operadores.

Ribeiro e Caten (2010) salientam que a interpretação errônea das causas comuns e causas especiais podem levar ao aumento da variabilidade e elevação dos custos no processo. Assim, é de extrema importância distinguir estas causas a fim de identificar oportunidades de melhorias e ações corretivas eficazes.

Os gráficos de controle são ferramentas do CEP que apresentam como objetivo monitorar o processo ao longo do tempo, analisando se este está sob controle estatístico ou apresenta causas especiais de variação. Os gráficos de controle podem ser de dois tipos: (i) gráficos de controle para variáveis; ou (ii) gráficos de controle para atributos. Neste trabalho, será utilizado apenas o gráfico de variáveis, portanto, não serão trabalhados gráficos de controle para atributos no desenvolvimento do referencial teórico.

### 2.1.1 Gráficos de controle para variáveis

Ribeiro e Caten (2010) afirmam que as variáveis são características de qualidade possíveis de se mensurar, exemplos dessas características são: o diâmetro de um rolamento, uma resistência elétricas, etc. O controle realizado através das cartas de variáveis permite uma ação corretiva mais rápida, uma vez que o lapso de tempo entre a produção e a ação corretiva pode ser encurtado. De acordo com Ribeiro e Caten (2010), este controle deve ser feito monitorando-se duas cartas de controle simultaneamente. O motivo de se monitorar duas cartas de controle justifica-se pela possibilidade de uma causa especial alterar, em um processo, a tendência central e a variabilidade.

Os gráficos de controle mais utilizados são os de média e amplitude (X-R) ou de média e desvio padrão (X-S). Sendo assim, o gráfico de controle para média pode detectar quando a tendência central do processo se altera e o gráfico de amplitude pode detectar a mudança na variabilidade do processo. Já o gráfico de controle do desvio padrão indica de forma mais eficiente a variabilidade de um processo. Em alguns casos, monitorar a variabilidade, através do desvio-padrão, pode ser mais apropriado do que monitorar através da amplitude, principalmente onde há situações em que (i) os dados são coletados por computador e apresentam facilidade em implementar uma rotina de cálculo, (ii) os processos forem sofisticados controlados por especialistas ou (iii) as amostras forem grandes (RIBEIRO E CATEN, 2010).

As equações utilizadas para a obtenção da linha central e dos limites de controle inferior e superior para o gráfico de controle X-R e X-S são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 1.** Cálculo dos limites de controle e linha central para os gráficos de média e amplitude.

	Gráfico de controle para médias	Gráfico de controle para amplitude
Linha central (LC)	$LC = \bar{\bar{x}}$	$LC = \bar{R}$
Limite de controle superior (LCS)	$LCS = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$	$LCS = D_4 + \bar{R}$
Limite de controle inferior (LCI)	$LCI = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$	$LCI = D_3 + \bar{R}$

Fonte: Montgomery (2004)

**Tabela 2.** Cálculo dos limites de controle e linha central para os gráficos de média e desvio padrão.

	Gráfico de controle para médias	Gráfico de controle para amplitude
Linha central (LC)	$LC = \bar{\bar{x}}$	$LC = \bar{R}$
Limite de controle superior (LCS)	$LCS = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{s}$	$LCS = B_4 \bar{s}$
Limite de controle inferior (LCI)	$LCI = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{s}$	$LCS = B_3 \bar{s}$

Fonte: Montgomery (2004)

O valor de  $A_3$ ,  $B_3$  e  $B_4$  são constantes que dependem do valor da amostra (MONTGOMERY, 2004).

Outros detalhes sobre os gráficos de controle para variáveis podem ser encontrados em Montgomery (2004), Box et al (1997), Woodall (1997), Schissatti (1998) e Fiterman et al (2004).

## 2.2. Capacidade do processo

Krajewski, *et al* (2009) afirmam que um processo que esteja sob controle estatístico pode não estar atendendo as exigências do cliente, ou seja, pode estar gerando produtos ou serviços fora das especificações, uma vez que os limites de controle são calculados a partir das médias e da variabilidade da distribuição amostral, e não a partir das especificações de projeto. Assim, a capacidade do processo é a capacidade que um processo tem em satisfazer as especificações de projeto para um serviço ou produto. Observa-se que um processo pode estar sob controle estatístico, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações, será considerado como não capaz (FERREIRA, 2008).

De acordo com Ribeiro e Caten (2010), uma maneira simples e quantitativa de expressar a capacidade de um processo é a utilização dos índices de capacidade, comparando os limites naturais do processo com a amplitude das especificações exigidas para o processo. Os índices de capacidade mais usuais e difundidos são o  $C_p$  (índice de capacidade potencial) e o  $C_{pk}$  (índice de capacidade efetiva). O  $C_p$  mede a variabilidade do processo em comparação com as tolerâncias admitidas nas especificações do projeto ou exigências de clientes, mas não avalia se o processo está ou não centrado, ou seja, indica a capacidade potencial do processo em atingir as especificações (SOUZA *et al*, 2009). Já o índice  $C_{pk}$  avalia a localização dos dados. Assim, os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  quando utilizados em conjunto, representam uma boa avaliação da capacidade do processo. Os cálculos para índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  estão representados nas equações (1) e (2), respectivamente.

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (1)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pk_i}, C_{pk_s}) = \min\left(\frac{\bar{X} - LIE}{3\sigma}, \frac{LSE - \bar{X}}{3\sigma}\right) \quad (2)$$

Onde o  $\sigma$  é o desvio-padrão da distribuição de processo, LIE e LSE representam, respectivamente, o limite de especificação inferior e superior.

Um índice  $C_p$  menor que 1,0 indica que o processo não é capaz de atingir às especificações dos clientes, necessitando de melhorias sob o sistema, ou seja, melhorias nas causas comuns de variação. Caso o  $C_p$  for diferente de  $C_{pk}$ , indica que o processo não está centrado, a média não está no ponto central da distribuição dos dados. Observa-se que o índice  $C_{pk}$  é sempre menor ou igual ao índice  $C_p$  (RIBEIRO e CATEN, 2010).

Ribeiro e Caten (2010) explicam que, caso a característica da qualidade for do tipo maior-é-melhor, o limite da especificação superior é infinito, logo a avaliação da capacidade do processo será feita apenas com o  $C_{pk}$  inferior. Caso a característica for do tipo menor-é-melhor, o valor do limite de especificação inferior é zero, logo a avaliação da capacidade do processo será feita apenas com o  $C_{pk}$  superior.

Os cálculos de  $C_p$  e  $C_{pk}$  apresentados nas equações (1) e (2), respectivamente, consideram que as amostras sigam uma distribuição normal, porém, há casos que não seguem esta distribuição. Para esses casos, é necessário buscar por alternativas que utilizem as distribuições adequadas (GONÇALEZ E WERNER, 2009). Existem na literatura transformações de Box-Cox ou de Johnson que convertem dados não normais

em dados normalmente distribuídos, podendo fazer uso dos índices apresentados. Outra alternativa, é utilizar métodos para analisar a capacidade de dados não-normais (SOUZA *et al.*, 2010).

### 2.3 Desdobramento da função qualidade (QFD)

De acordo com Krajewski, *et al* (2009), o desdobramento da função qualidade (QFD – *Quality Function Deployment*) é uma técnica que muitas empresas utilizam para melhorar os produtos e serviços oferecidos. A partir dessa técnica é possível transformar cada exigência do cliente em um requisito técnico de cada etapa do processo de desenvolvimento e produção.

Ribeiro e Caten (2010) afirmam que o QFD é um caminho sistemático para garantir que o desenvolvimento das características e especificações do produto, bem como desenvolvimento de metodologia, processos e controle, sejam orientados pela necessidade do consumidor.

De acordo com Krajewski, *et al* (2009), o QFD se desenvolve através da busca de resposta para seis perguntas: (i) opinião do cliente: o que nossos clientes precisam e desejam?; (ii) análise competitiva: como nossos clientes avaliam nosso desempenho quando comparado ao desempenho de nossos concorrentes?; (iii) opinião do engenheiro: quais medidas técnicas relacionam-se às necessidades de nossos clientes?; (iv) correlação: quais são as relações entre a opinião do cliente e a opinião do engenheiro?; (v) comparação técnica: de que modo o desempenho de nosso serviço ou produto se compara ao de nossos concorrentes?; e (vi) Trade-offs: quais são os trade-offs técnicos potenciais?;

Com a resposta a essas seis perguntas, aprimora-se o processo de desenvolvimento e produção, aumentando assim a competitividade da empresa no mercado. Segundo Ribeiro e Caten (2010), o QFD é uma técnica consistente onde é possível definir os processos críticos para o cliente e um ótimo início para a implantação do controle estatístico de processo.

## 3 Procedimentos Metodológicos

O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas: (i) utilização da ferramenta QFD; (ii) planejamento; (iii) coleta de dados; (iv) análise dos dados.

Na primeira etapa, utilizou-se a metodologia do QFD – *QualityFunction Deployment*, através da qual se buscou a definição de qualidades exigidas pelos clientes e os processos que são responsáveis pela construção de tais qualidades. Nesse momento, trabalhou-se com uma equipe multidisciplinar onde se envolveu diferentes setores da empresa e, cruzando-se as informações obtidas, identificou-se qual processo influencia na qualidade mais relevante para os clientes. Seguindo a metodologia do QFD, foram planejadas melhorias que possam reforçar o sistema de qualidade. Trabalhou-se junto com a equipe técnica a fim de definir quais melhorias seriam pertinentes fazer.

Com os dados obtidos através da metodologia do QFD, partiu-se para a segunda etapa que consiste na definição dos postos de controle, definição dos parâmetros e características de qualidade do processo a serem monitorados. Nesta etapa, também foi definido o procedimento de coleta, ou seja, quem irá coletar, qual a frequência de coleta de dados, onde os dados serão registrados, o que se fazer com os dados obtidos e qual sistema de medição será utilizado .

Após as definições do planejamento, iniciou-se a terceira etapa que contemplou a coleta dos dados. O início da coleta deu-se a partir de 20 minutos de operação, as coletas foram feitas a cada 20 minutos na peneira desaguadora e, em cada coleta, foram retiradas 4 amostras. Algumas das amostras foram analisadas pelo laboratório quanto ao parâmetro de cinza, a fim de se obter a relação existente entre cinza e peso da amostra.

Na quarta etapa, foram analisados os dados obtidos com o software ProCep onde se calculou os limites de controle e foram geradas as cartas de controle. Foram utilizadas cartas de média e desvio-padrão. Com a

análise das cartas de controle, identifica-se a incidência ou não de causas especiais. Foi identificado o motivo que levou ao aparecimento de causas especiais a fim de se obter dados para uma futura implantação efetiva do controle estatístico no processo de beneficiamento de carvão mineral.

## 4 - Resultados e discussão

### 4.1 - Processos de beneficiamento de carvão mineral (etapas)

Em um primeiro momento será descrito o cenário onde o trabalho foi desenvolvido. Para a descrição desse subitem foi realizado um acompanhamento de todo o processo de extração e beneficiamento do carvão mineral na empresa onde o estudo foi desenvolvido.

O carvão mineral é encontrado, na natureza, em camadas. Cada camada apresenta características diferentes em relação à outra. Na região de Butiá, Rio Grande do Sul, as camadas são chamadas de: camada A, camada S, camada Leito, camada M1, camada Intermediária, camada M2, camada I1 e camada I2. Além das diferenças entre qualidade de uma determinada camada à outra, há ainda uma alteração das características do minério em relação de um ponto a outro da jazida, ou seja, uma mesma camada de carvão pode ter suas características alteradas dependendo do local de onde está sendo extraído.

Pode-se considerar que o processo produtivo inicia-se no planejamento da lavra. Dentro do planejamento é realizado estudo geológico através de sondagens e perfisagens para se identificar a qualidade do carvão que se irá minerar em determinada área. Com base nesses dados de qualidade, projeta-se o quanto deve ser extraído para atender o mercado consumidor. Esse dado é repassado ao setor de mineração.

No setor de mineração, é realizado a decapagem do material estéril até se chegar ao carvão mineral. A etapa de extração é fundamental para o processo de produzir, uma vez que, se o minério extraído possui baixa qualidade na mina, o beneficiamento será prejudicado. Como falado anteriormente, o carvão mineral é encontrado em camadas, essas camadas são separadas pelo estéril (material não aproveitado). Caso, no processo de detonação, tenha se utilizado uma razão de carga de explosivo maior do que o necessário pode haver a mistura do material estéril com o carvão, ou se o operador do equipamento, que faz a seletiva do carvão mineral e estéril, não estiver devidamente treinado, poderá haver esta contaminação.

Após extração do minério da jazida, com os devidos cuidados, o mesmo é enviado através de transporte terrestre ao beneficiamento. No beneficiamento, passa por um processo de britagem que tem por objetivo diminuir a sua granulometria deixando-o com no máximo 50mm de diâmetro. O processo de britagem também é importante para o beneficiamento, uma vez que, quando se realiza a quebra das pedras de carvão se permite separar melhor o que é carvão do que é estéril. Ainda na britagem, realiza-se a cata manual, ou seja, as pedras maiores de estéril são separadas manualmente.

Após a britagem, o minério passa para o lavador que utiliza um sistema chamado de Jigue Baum para realizar a separação de minério e estéril. A separação do carvão de estéril é realizada através de densidade, como o carvão mineral é mais leve que o material estéril, o mesmo flutua sobre a água, enquanto o material estéril afunda. O jigue, que está cheio d'água, é movimentado pela ação de compressores de ar, os quais, ao colocar ar para dentro através de células, provocam uma onda na água. Essa onda movimenta o material que está dentro do leito do jigue, facilitando assim a separação. O material estéril vai sendo depositado na parte inferior do leito do jigue e, de acordo com a regulagem das balanças, é aberta uma escotilha que faz com que o material estéril saia do leito do jigue, sendo carregado por caçambas até um silo. Dependendo da qualidade do material estéril separado o mesmo pode ser reaproveitado sendo beneficiado para outro produto, onde deverá passar novamente pela lavagem. O minério que flutuou passa pelo leito do jigue e vai para peneiras desaguadoras, as quais retiram o excesso de água. Alguns produtos passam em uma peneira que faz a separação granulométrica, ou seja, produtos de diferentes granulometrias.

O produto acabado é depositado em pátios de estocagem em forma de pilhas, geralmente cada pilha é composta por 300 toneladas de produto. Após ter-se o volume completo de uma pilha de produto, a mesma é liberada para o controle de qualidade analisar. A análise de qualidade pode levar até seis horas para ficar pronta e, em alguns casos, o produto está fora do especificado. Quando a qualidade não está de acordo com o desejado, o produto tem que passar novamente pelo processo de lavagem ou ser blendado com outro até se obter a qualidade desejada.

## 4.2 Análises dos resultados

A metodologia QFD foi utilizada para guiar as primeiras etapas deste trabalho. O primeiro passo foi a identificação das principais qualidades exigidas pelos clientes. Através da análise dos contratos com os clientes observou-se que as principais exigências, algumas vezes passíveis até de multa, são em relação ao poder calorífico e teor de enxofre no minério. Outra característica que é muito citada nos contratos é em relação à granulometria do produto.

De acordo com Ryan e Ledda (1998), o enxofre pode ser encontrado no carvão mineral na forma de sulfetos, enxofre orgânico, enxofre elementar e sulfato. A forma mais comum é a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), a qual é um sulfeto e possui uma coloração amarelada na sua forma natural. Outra parcela de enxofre presente no carvão mineral está em sua fórmula molecular. O enxofre na forma de pirita é passível de controle, já o enxofre na forma molecular, é de difícil separação no beneficiamento do carvão mineral.

O poder calorífico do carvão mineral é definido pela quantidade de material estéril que há no mesmo, ou seja, dependendo da regulagem que se faz nas balanças, primárias e secundárias, é possível se obter um produto com poder calorífico maior ou menor, isso está relacionado a menos cinza ou mais cinza respectivamente. A cinza é o material inorgânico que está presente no produto. Quando se faz o controle da quantidade de matéria inorgânica presente no produto, se controla, simultaneamente, a quantidade de enxofre.

A granulométrica do carvão mineral é definida através de peneiramento. No fim do processo, há uma peneira que tem como finalidade separar as diferentes granulometrias que o carvão apresenta.

Sendo assim, ficou definido pela equipe multidisciplinar que o processo de separação do minério da matéria inorgânica seria através da densidade, processo este conhecido como lavagem, é o responsável pela qualidade do produto final e, conseqüentemente, pelo atendimento aos requisitos do cliente.

Definido o processo principal, partiu-se para uma análise do mesmo. Foram identificados diversos pontos a serem melhorados, tais pontos influenciam diretamente na qualidade do processo. Como comentado na descrição do processo de beneficiamento, o carvão e o estéril são separados através da movimentação que é feita no jigge, tal movimentação é feita através da ação de um compressor que injeta ar para dentro do jigge. O ar cria um ambiente com pressão e provoca ondas na água, o que facilita a separação por densidade. Um ponto a ser melhorado são os vazamentos de ar que existem no jigge, tais vazamentos causam perda de pressão e conseqüentemente pouca movimentação do material que está sendo beneficiado, causando uma ineficiência na separação. Além deste aspecto, citados foram identificados outros pontos a serem melhorados, tais alterações iram depender de tempo e recursos para poderem ser efetivamente feitas.

Conhecidas as principais qualidades exigidas pelos clientes e o processo que possui maior influência para a geração dessas qualidades parte-se para a definição da característica a ser monitorada, além dos postos de controle e dos responsáveis pelo monitoramento. Dentre as principais características exigidas pelos clientes a que ganha maior destaque é o poder calorífico do minério, uma vez que o preço da tonelada varia de acordo com este parâmetro. Como o poder calorífico está relacionado com a quantidade de matéria inorgânica presente no produto, definiu-se que esta seria a característica a ser monitorada. A quantidade de matéria inorgânica está diretamente relacionada ao parâmetro peso do produto, ou seja, quanto mais pesado o produto está, maior é a quantidade de matéria inorgânica e menor é o poder

calorífico. Dessa forma o parâmetro a ser monitorado é o peso. Como dito anteriormente, a separação de matéria inorgânica e carvão mineral é feita no jigge, logo, este foi definido como posto de controle responsável pelo monitoramento.

#### 4.2.1 Análise da carta de controle de média e desvio padrão

Analisando de forma geral a amostragem realizada para a camada M1 é possível observar que há uma grande variação no processo, influenciada por causas especiais e causas comuns. O limite superior, médio e inferior foram calculados a partir de um total de 400 amostras divididas em 100 subgrupos de 4 amostras cada, com 39 subgrupos de causas especiais eliminadas, ficando em 3,48kg, 3,38kg e 3,27kg respectivamente. As amostras foram coletadas em 8 turnos de trabalho de 8h cada, onde trabalharam 3 operadores diferentes.

O valor médio das amostras foi de 3,40 kg e o desvio padrão foi de 0,16. O gráfico de média (Figura 1) indica que há um grande número de causa especiais agindo sobre o processo, uma vez que 39% das amostras estão fora dos limites de controle. Analisando o gráfico de desvio padrão (Figura 2), é possível verificar que 8 amostras ficaram fora dos limites de controle.

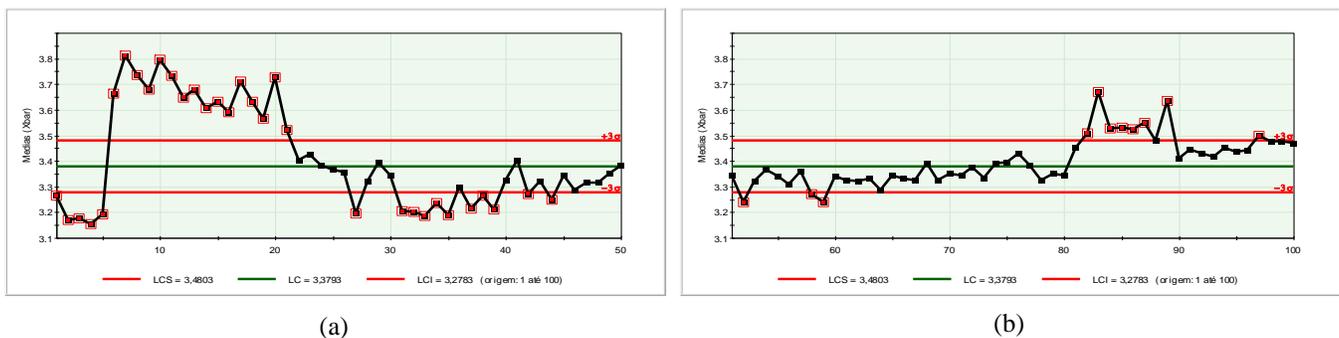


Figura 1. (a) Gráfico de controle de médias para amostras 1-50; (b) Gráfico de controle de médias para amostras 51-100

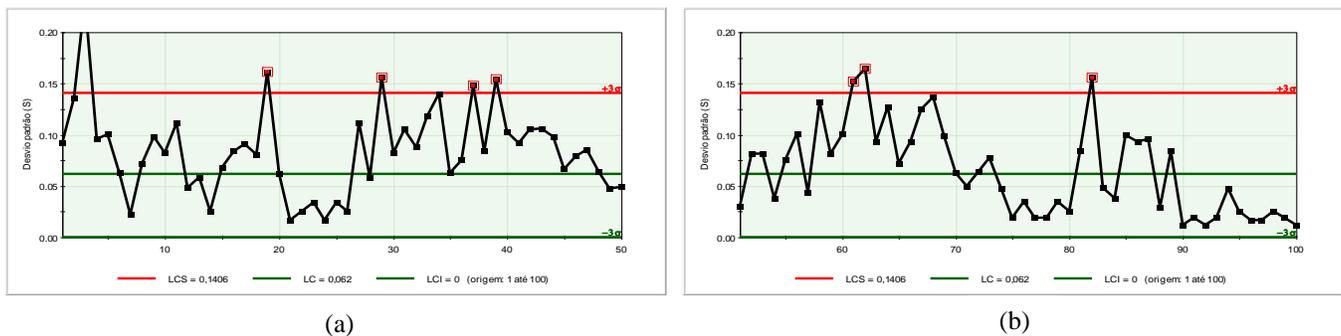


Figura 2. (a) Gráfico de controle de desvio padrão para amostras 1-50; (b) Gráfico de controle de desvio padrão para amostras 51-100

Se for analisado o gráfico de média, ponto a ponto é possível observar que entre as amostras 1 e 5, o operador “a” utilizou uma densidade na balança secundária de 1,5 e isso resultou em uma média de 3,19 kg entre as 5 amostras, com um desvio padrão de 0,038. Dentre as 5 amostras coletadas pelo operador “a”, em seu turno de trabalho, apenas a amostra 1 ficou dentro dos limites de controle, as restantes ficaram abaixo do limite de controle inferior.

No momento em que houve a troca de operadores, o operador “b”, que assumiu o turno de trabalho, mudou a regulagem da balança secundária para 1,45, e isso elevou o peso da média que ficou em 3,68 kg.

O desvio padrão entre as amostras 6 e a 20 foi de 0,069. Todas as amostras neste intervalo ficaram acima do limite de controle superior.

A produção total no intervalo de coleta das amostras 1 a 20 foi de 1.240 toneladas de carvão mineral, a média de cinza analisada pelo laboratório ficou em 33,24%. A cinza desejada era de 30%. A cinza do minério bruto, antes do beneficiamento, foi de 45,8%.

Da amostra 21 a 26 o operador que realizou o beneficiamento, foi o operador “c”, o mesmo regulou a balança secundária em 1,45 e das amostras coletadas apenas a 2ª ficou acima do limite de controle superior, as demais ficaram dentro do LCS e LCI. A média de peso das amostras coletadas pelo colaborador “c” ficou em 3,41 Kg, com um desvio padrão de 0,055.

As amostras 27 a 50 foram coletadas pelo colaborador “a”, o qual variou a regulagem da balança secundária entre 1,45 e 1,47 durante o turno de operação. A média geral das amostras, neste intervalo de coleta, foi de 3,28kg e o desvio padrão no intervalo foi de 0,067. As primeiras 6 amostras ficaram oscilando próximas do limite inferior com algumas ficando abaixo do LCI. Da amostra 33 a 45 a regulagem da balança secundária passou a ser 1,47 o que deixou as amostras com uma variação menor, porém, continuaram oscilando acima e abaixo do LCI. Das amostras 45 a 50 a regulagem da balança passou a ser 1,45, as amostras aumentaram o peso e, durante esse intervalo, todas ficaram dentro do LCI e LCS.

Durante o intervalo de coleta da amostra 21 a 50 foram beneficiadas 2.085 toneladas de carvão mineral e a cinza analisada pelo laboratório foi de 30,25%, o esperado era 30%. A cinza do minério bruto, nesse intervalo de coleta, foi de 47,63%.

O intervalo de amostras entre 51 a 73 foram coletados pelo operado “a”, ele variou a regulagem da balança secundária entre 1,47 e 1,5. Neste intervalo, apenas 3 amostras ficaram fora dos limites de LCI e LCS. A média de peso das amostras ficou em 3,33 Kg e o desvio padrão foi de 0,036. Neste intervalo de tempo, obteve-se 2061 toneladas de produto com uma cinza média de 33,73%.

Da amostra 74 a 80, o operador “c” manteve uma regulagem de 1,45 na balança secundária e obteve uma média de peso das amostras de 3,37Kg e um desvio padrão de 0,033. Neste intervalo, todas as amostras ficaram dentro do LCI e LCS. Neste período, foram obtidas 629 toneladas de produto e a cinza média foi de 33%.

As amostras de 81 a 89 foram coletadas pelo operador “b”. A regulagem da balança secundária foi de 1,45 e a média de peso das amostras foi de 3,54kg e um desvio padrão de 0,065. Todas as amostras ficaram acima do limite de controle superior.

Da amostra 90 a 100 que foram coletadas pelo operador “c”. A regulagem da balança secundária foi mantida em 1,5 e a média de peso das amostras foi de 3,43kg e um desvio padrão de 0,026. Neste intervalo, as amostras ficaram dentro dos limites de LCI e LCS. No intervalo de amostras de 81 a 100 foram produzidas 1435 toneladas de produto e a média de cinza ficou em 30,49%.

#### **4.2.2 Análise de capacidade**

Antes de analisar a capacidade do processo foi necessário realizar a análise estatística do processo a fim de se verificar se o mesmo segue ou não a distribuição normal. Sendo assim foi verificado que as amostras possuem uma distribuição assimétrica à direita e que as mesmas não seguem o modelo de distribuição normal.

Uma vez definido que as amostras não seguem o modelo de distribuição normal, foi necessário selecionar no Software ProCep o cálculo dos índices de capacidade considerando a análise não paramétrica. Os limites superiores e inferiores definidos foram de 3,46 e 3,25, estes limites foram definidos a partir de análise dos dados coletados.

Os cálculos realizados pelo ProCep mostram que o processo é efetivamente não capaz, uma vez que o índice  $C_p$  ficou em 0,37. Apenas 76% das amostras ficaram dentro dos limites especificados, 14% ficaram acima das especificações e 9 % ficaram abaixo das especificações.

Com base nesses dados percebe-se que é necessário realizar melhorias no processo a fim de torná-lo capaz de atender às exigências do cliente.

Existe um grande número de itens que podem provocar causas especiais e que desestabilizam o processo, entre os itens observados é importante citar o treinamento dos funcionários responsáveis pelo jigue. Muitos itens, como por exemplo, a pressão de ar no jigue, pressão de água, regulagem da balança secundária, regulagem da balança primária e volume alimentado por hora, são diretamente regulados pelo funcionário que trabalha no local, o que demanda a ele um bom conhecimento técnico e operacional que podem ser adquiridos através de treinamentos.

## 5 Conclusão

O trabalho realizado teve como objetivo verificar a viabilidade de implantação de controle estatístico de processo no beneficiamento de carvão mineral. Para tanto, coletou-se 400 amostras divididas em 100 grupos de 4 amostras. As 4 amostras que formam um grupo foram coletadas no mesmo intervalo de tempo, utilizando-se como dado a média do grupo, a fim de se minimizar erros de amostragem.

Os dados coletados foram analisados com o programa ProCep a fim de se verificar a estabilidade e a capacidade do processo. Para verificar a estabilidade do processo foram analisadas cartas de média e de desvio padrão. Foi verificado que o processo não é estável, o mesmo apresenta um grande número de amostras fora dos limites de controle superior e inferior. Ao analisar, simultaneamente a cartas de média e de desvio padrão verifica-se que, apesar da grande variação no peso das amostras, a variabilidade do processo é baixa.

Ao analisar os dados estratificando por operador é possível verificar que as amostras coletadas por um operador em um mesmo turno de trabalho seguem um padrão, demonstrando uma certa estabilidade, o que nos indica a possibilidade de tornar o processo estável e capaz com a definição de padrões de operação a serem seguidos por todos os operadores.

Este trabalho permitiu concluir que há a possibilidade de implantação de controle estatístico de processo no beneficiamento de carvão mineral e que o mesmo pode ser útil na identificação de pontos de melhoria do processo proporcionando assim um melhor aproveitamento da jazida e conseqüente ganho à empresa.

## Referências

ANTUNES JÚNIOR, J. A. V.; ALVAREZ, Roberto dos Reis; PELLEGRIN, Ivan; KLIPPEL, M., BORTOLOTO, P.. *Sistemas de Produção - Conceitos e Práticas para Projetos e Gestão da Produção Enxuta*. Porto Alegre: Bookman, 2008.

KRAJEWSKI, Lee; RITZMAN, Larry; MALHOTRA, Manoj. *Administração de produção e operações*. 8 ed. São Paulo: Pearson, 2008.

RIBEIRO, J.L.D. & TEN CATEN, C.S. *Série Monográfica Qualidade: Controle Estatístico do Processo*. Porto Alegre: FEENG/UFRGS, 2010.

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 1 ed. Brasília : ANEEL, 2002. Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf).

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. BIG – Banco de Informações de Geração. Brasília : ANEEL, 2011. Disponível em: [www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15](http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15) .

SOUZA, F.S., PEDRINI, D.C. E CATEN, C.S. (2009), *Índices de capacidade do processo: comparação*

*entre índices tradicionais e índices para gráficos de controle de regressão.* XVI Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), Bauro, São Paulo – SP.

SOUZA, F.S., PEDRINI, D.C. E CATEN, C.S. (2010), *Índices de capacidade do processo: proposta baseada em modelos de regressão e um fluxograma orientativo.* XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul – RS.

BOX, G.E.P.; COLEMAN, D.E.; BAXLEY, R.V. *A Comparison of Statistical Process Control and Engineering Process Control.* Journal of Quality Technology. v.29, p. 128-30, 1997.

FITERMAN, M.; CATEN, C.S.; BATTESINI, M.; LIMA, L.L. *CEP por atributos: uma abordagem de implantação.* ENEGEP, 2004, Florianópolis, SC.

SCHISSATTI, M.L. *Uma metodologia de implantação de cartas de Shewarth para o controle de processos.* UFSC (1998). Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

WOODALL, W.H. *Control Charts Based on Attribute Data: Bibliography and Review.* Journal of Quality Technology. v.29, p. 172-83, 1997.

MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade.* 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 513 p, 2004.

RYAN, B., LEDDA, A.. *A review of sulphur in coal: with specific reference to the Telkwa deposit,* North-western British Columbia. Geological Fieldwork. 1998