

Estudo de caso sobre o uso do controle da qualidade em uma indústria do setor de petróleo e gás

Case study on the use of quality control in a liquefied petroleum gas plant

Marcos Felipe Falcão Sobral

Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração e Desenvolvimento Rural e do Departamento de Administração da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE.
marcos_sobral@bol.com.br
Recife, PE [Brasil]

André Marques Cavalcanti

Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.
Recife, PE [Brasil]

Romilson Marques Cabral

Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração e do Departamento de Administração da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Doutor em Administração pela Universidade Federal da Bahia – UFBA.
Recife, PE [Brasil]

Lucia Maria Góes Moutinho

Professora do Programa de Pós-Graduação em Administração e Doutora em Economia pela Fundação Getúlio Vargas – FGV-SP.
Recife, PE [Brasil]

Rodolfo Araújo de Moraes Filho

Professor do Programa de Pós-Graduação em Administração e do Departamento de Administração da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Doutor em Administração pelo Institut d'Administration des Entreprises de Grenoble – IAE Grenoble.
Recife, PE [Brasil]

Resumo

Neste artigo, apresenta-se uma pesquisa sobre a aplicação do controle estatístico do processo e um estudo da capacidade em uma planta de envase de gás liquefeito de petróleo. A empresa realizou uma substituição em seu sistema de enchimento de cilindros, gerando a necessidade de verificar se o processo estaria sob controle e dentro dos limites de especificação do mercado. Para tanto, foi realizada a amostragem sobre a produção e, em seguida, a análise com base no controle estatístico do processo, por meio dos gráficos \bar{X} e R . Também foram calculados os índices de capacidade C_p , C_{pk} , P_p e P_{pk} . Ao final, foi possível direcionar ações para melhoria do processo dia após dia, além de verificar se o processo estaria sob controle e atendendo aos seus limites de especificação.

Palavras-chave: Controle estatístico do processo. Estudo da capacidade. Gás liquefeito de petróleo.

Abstract

In this paper we present a study of the application of statistical process control (SPC) and of a capability study in a liquefied petroleum gas bottling plant. The company replaced its cylinder filling system, generating the need to verify if the process was under statistical control and if it met the project specification of the market. In order to do so, samples were collected from the bottling plant and analyzed based on statistical process control, by means of \bar{X} and R Graphs. Capability indexes C_p , C_{pk} , P_p and P_{pk} were also calculated. At the end, it was possible to direct actions in order to improve the process day after day as well as verify that it was under control and within the limits of its specification parameters.

Key words: Capability study. Liquefied petroleum gas. Statistical process control.

1 Introdução

A indústria do gás liquefeito de petróleo (GLP) tem enfrentado nos últimos anos uma série de desafios para entregar um produto de qualidade para o consumidor. Neste ramo, a concorrência é altamente acirrada, que, associada às regulações estatais, forçam as empresas a produzirem com altos padrões de qualidade. No Brasil, o GLP é comercializado por meio de cilindros retornáveis, e o maior volume de vendas está concentrado em reservatórios de 13 quilos. O envase do produto nos botijões é feito pelas distribuidoras, em plantas industriais, que utilizam linhas mecânicas ou automatizadas.

A Petróleo Brasileiro SA (PETROBRAS) é fornecedora do GLP para todas as distribuidoras que comercializam o produto no Brasil. Logo, o diferencial para o consumidor está na qualidade do cilindro, no volume envasado e na distribuição. Desta forma, o processo produtivo para envase do GLP se torna uma atividade estratégica para qualquer empresa do setor se manter competitiva.

Neste contexto, realiza-se um estudo sobre uma distribuidora de GLP, que utiliza o envase de produto em plantas de linha. Discutem-se os problemas do processo de seu sistema de envasamento e pesagem de produtos, e a partir dessa análise apontam-se as possíveis soluções. O diagnóstico se baseia nos registros históricos da empresa que demonstra a situação do desempenho na fase inicial do desenvolvimento da pesquisa. Busca-se identificar a condição do controle do processo, dentro de uma metodologia de análise baseada no 6-Sigma. A partir dessa análise verifica-se a possibilidade de colocar o sistema em produção de larga escala.

Na segunda fase da pesquisa, estuda-se o ritmo de produção mínimo, após a definição dos ajustes para melhoria do desempenho da planta, que mediante simulações usando o aplicativo

Arena indica-se o ritmo de 500 unidades por hora a ser adotado em sua fase de testes, terceira etapa. A partir daí, foi calculado o tamanho da amostra e, em seguida, aplicado o controle estatístico do processo por meio dos gráficos \bar{X} e R associado a atividades de intervenção e ajustes para melhoria do processo. Também foram calculados os índices de capacidade e *performance* do processo para cada dia de produção. Diante disso, seguindo o modelo de diagnóstico, simulação e controle, tornou-se possível desenvolver um curso de ações norteadoras da melhoria da qualidade de conformação em uma planta em produção contínua.

2 Referencial teórico

No ambiente globalizado e em constante mudança, o foco na gestão da qualidade se tornou primordial para as empresas que almejam se manter atuantes no mercado (CAVALCANTI, AQUINO, MECCHI, 2013). Modernamente, qualidade adquiriu um significado operacional claro de conformidade com as especificações (OLIVEIRA, 2003). Seu conceito pode ser visto de diferentes perspectivas. Por exemplo, usando a definição de qualidade de ser “livre de deficiências” requer a medição do número de defeitos, enquanto a definida como “satisfação do cliente” exige uma determinação do número de clientes satisfeitos (FRANKS, 2009).

É possível identificar cinco categorias em que as definições de qualidade (HARDIE, 1998): a exigência de conformidade, a adequação ao uso, o conhecimento das percepções dos clientes, a superação das expectativas dos clientes e a superioridade sobre a concorrência. Já Garvin (1987) fornece uma excelente discussão de oito componentes ou dimensões da qualidade: desempenho, confiabilidade, durabilidade, manutenção, estética, característica, qualidade percebida e conformidade. Geralmente, a qualidade é avaliada com

base na conformidade ou não conformidade em relação ao projeto. Todo o processo apresenta variações naturais que podem ocorrer de maneira aleatória ou não. Assim, a variação é um fator importante que afeta a qualidade do produto, sendo necessário reduzi-la durante o processo produtivo (MOTTONEN et al., 2008).

Uma vez que a variabilidade pode ser descrita em termos estatísticos, os métodos estatísticos desempenham um papel central no esforço para melhoria da qualidade (MONTGOMERY, 2009). Existem várias metodologias para minimizar ou analisar a variação existente no processo, como, por exemplo, o controle estatístico da qualidade, a 6-Sigma e a função perda de Taguchi (MOTTONEN et al., 2008). A maioria dos processos tem um valor considerado como objetivo e o controle estatístico do processo auxilia a identificar quando existe desvio em relação a esse alvo. Este valor-alvo tem limite que deve ser estreito o suficiente para permitir grande variabilidade no processo (MONTGOMERY, 2009), sendo denominado limite superior de especificação (LSE) e limite inferior de especificação (LIE). Quando um processo está centrado, afirma-se que ele está sob controle. E se a produção está estatisticamente controlada o processo pode continuar, sem a necessidade de uma intervenção (MOTORCU, GÜLLÜ, 2006). No entanto, se esta não estiver estatisticamente sob controle, as causas atribuíveis devem ser descobertas e removidas do processo (MOTORCU, GÜLLÜ, 2006). No controle estatístico da qualidade, são utilizados gráficos de controle para avaliação das características da população, com base em amostra.

2.1 Gráficos de controle

O gráfico de controle é uma exibição gráfica de um característico da qualidade que foi medido ou calculado a partir de uma amostra (MONTGOMERY, 2009). Os gráficos de con-

trole constituem-se numa técnica da qualidade muito conhecida e difundida, a qual é utilizada no controle de processos e produtos e baseada em análises estatísticas (GIRON et al., 2013). Aplica-se a técnica considerando que todo o processo apresenta variações e que, a partir da determinação dessas variações, é possível definir parâmetros que informem se o processo está ocorrendo dentro dos limites esperados ou se existe algum evento que o colocará fora de controle (GIRON et al., 2013). O gráfico de controle contém uma linha central ou média (LM) que representa o valor médio da característica e duas outras linhas horizontais, chamados de limite superior de controle (LSC) e do limite inferior de controle (LIC). A determinação dos limites de controle é uma das decisões críticas que devem ser feitas na concepção de um gráfico de controle. Movendo-se os limites de controle mais distantes da linha central, diminui o risco de um erro dos tipos I e II. Em contrapartida, a aproximação das linhas de controle à linha média causa o efeito oposto (MONTGOMERY, 2009).

É comum que uma medida aceitável para os limites de controle seja definida por meio dos desvios-padrão (σ). Na construção de um gráfico, adotam-se três desvios para cada limite de controle. Desta forma, quando existe o distanciamento bicaudal de $\sigma = 3$, 99,73% das ocorrências estão cobertas. Os gráficos devem ser relacionados com a natureza do característico, gerando as avaliações por variáveis ou atributos (WALTER et al., 2013). Os gráficos de controle para variáveis são usados para monitorar um processo quando o característico da qualidade é uma variável que pode ser mensurada e expressa em um valor na escala contínua (WALTER et al., 2013). Neste caso, é conveniente descrever o característico por meio da medida de sua tendência central e sua variabilidade, e representá-la em um gráfico de controle para variáveis adequado (WALTER et al., 2013).

A análise dos característicos é feita sobre a média dos subgrupos e de sua dispersão. Em virtude disto, todos os controles por variáveis devem ser compostos de dois gráficos: o gráfico da média (\bar{X}) e o da dispersão (R ou S). A escolha de qual gráfico será usado para avaliar a dispersão dos dados deverá ser feita considerando-se o tamanho da amostra. Para amostras em que $n > 10$, aplica-se o S , e para aquelas nas quais $n \leq 10$ é aconselhável o R . A construção de gráficos de controle por variáveis para a média (\bar{X}) guarda conexão com o teorema do limite central, em que a média das amostras são denotadas por $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ e serão utilizadas como ponto a serem plotados no gráfico (LIND, MARCHAL, WATHEN, 2011). Se um característico da qualidade está distribuído segundo uma distribuição normal, com média μ e desvio-padrão σ conhecidos, a média das observações de uma amostra n é dada por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2, \dots, x_n}{n} \quad (1)$$

Neste caso, pode-se considerar o valor obtido pela equação 1 como a linha média (LM) do gráfico de controle. Como a \bar{x} também pertence a uma distribuição normal, com média μ e desvio-padrão $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$, existe a probabilidade de $1 - \alpha$ de que as observações da amostra assumam valores entre os limites a seguir (MONTGOMERY, 2009):

$$\mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

É comum substituir $Z_{\alpha/2}$ pelo valor 3, indicando que os limites se distanciaram em três sigmas da linha média. Se a média da amostra estiver fora dos limites, existe uma indicação que a média das amostras não são mais iguais a média da população μ . Como forma de simplificação, é

comum a substituição dos valores das fórmulas por fatores tabulados, o que permite a construção do gráfico de forma mais simples para o operário. De acordo com a indicação tabulada, o gráfico \bar{X} pode ser contruído pelas seguintes equações (MONTGOMERY, 2009):

$$LM = \bar{x} \quad (3)$$

$$LSC = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad (4)$$

$$LIC = \bar{x} - A_2 \bar{R} \quad (5)$$

Em que a LM é a linha média, dada pela média das médias (\bar{x}) das amostras. LSC é o limite superior de contorole e LIC o limite inferior de controle, calculados pela média das médias somadas ou subtraídas do produto das amplitudes médias e o valor tabulado. Para avaliação da amplitude, existem dois gráficos possíveis, sendo um baseado nas amplitudes; e outro, no desvio-padrão. Para o caso em estudo, como a amostra foi menor que dez, foi adotado o gráfico das amplitudes \bar{R} calculado pelas equações (MONTGOMERY, 2009):

$$LM = \bar{R} \quad (6)$$

$$LSC = D_4 \bar{R} \quad (7)$$

$$LIC = D_3 \bar{R} \quad (8)$$

Segundo Paladini (1990), desde que construídos e implantados de modo correto, os gráficos de controle fornecem informações extremamente úteis para a perfeita avaliação do processo. A in-

formação básica seria a de verificar se o processo estaria ou não sob controle estatístico; entretanto, é possível analisar alguns dados relevantes nos gráficos da média \bar{X} (PALADINI, 1990), tais como:

- Situação natural: o centro não muda ao longo de sua operação.
- Situação ideal: gráfico parcialmente fechado sobre um valor médio que é a especificação básica do característico, registrada no projeto.
- Carga na média: grande número de pontos ao longo da vizinhança da LM.

No que diz respeito ao gráfico das amplitudes, deve ser observado se este é estreito ou perto de zero, considerando-se, nesse caso, como situação natural; e fechado em zero, como situação ideal (PALADINI, 1990).

2.2 Capacidade do processo

Compreender a estrutura de um processo e quantificar o seu desempenho são essenciais para a melhoria da qualidade. A análise de capacidade do processo tornou-se, nos últimos anos, uma ferramenta importante em aplicações do controle estatístico do processo (WU, PEARN, KOTZ, 2009). A quantificação do processo, bem como sua variação, é peça central para compreender o comportamento do processo e sua capacidade de produzir itens de qualidade (KANE, 1986). Neste contexto, a relação entre o processo real e os limites de especificação, também chamados de tolerância, podem ser quantificados por meio dos índices de capacidade do processo.

Os índices de capacidade do processo, definidos em Kane (1986), são populares na análise da tolerância de projeto e controle estatístico de processo. A Figura 1 mostra a concepção geral das tolerâncias e limites de especificação do projeto.

Índices de capacidade de processo são amplamente utilizados em muitas indústrias para

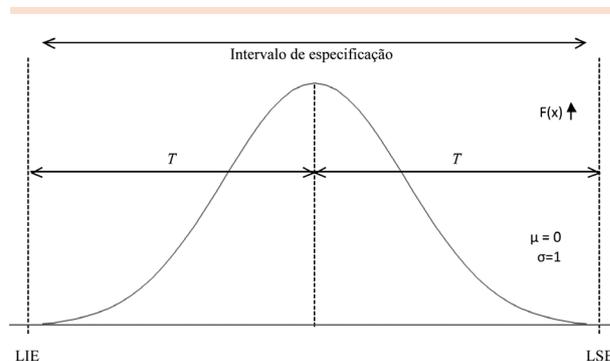


Figura 1: tolerâncias do processo

T – tolerância, LIE – limite inferior de especificação, LSE – limite superior de especificação

determinar se um processo de fabricação pode produzir artigos dentro dos limites especificados (KAYA, KAHRAMAN, 2010). Um índice de capacidade do processo (PCI) é uma característica do processo em relação a especificações, e estes índices ajudam a decidir o quão bem um processo atende às especificações (KAYA, KAHRAMAN, 2010). Todo o processo sofre inúmeras influências que causam variação. Os processos que mantêm estas variações em níveis aceitáveis podem ser chamados de capazes. A variabilidade é caracterizada por uma curva de densidade de probabilidade de um determinado característico e as especificações dos clientes (limites superiores – LSE e limites inferiores de especificação – LIE) são caracterizados por uma janela de aceitação, com uma tolerância T , sobre o valor alvo τ . O valor-alvo pode ser qualquer valor entre os LSE e LIE, mas, por conveniência, adota-se o da média μ . Desta forma, é usual assumir que os característicos sob investigação estão em uma distribuição normal $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, e o processo está sob controle estatístico (CHOU, POLANSKY, MASON, 1998). As medidas de variabilidade estão tornando-se mais amplamente utilizadas nas indústrias para avaliar a capacidade de seus processos (RUNGER, 1994) e para realizar esta análise são usados os índices de capacidade (BORDIGNON, SCAGLIARINI, 2002). Os índices de capacidade mais utilizados são C_p ,

C_{pk} . O C_p , também conhecido como índice da capacidade potencial do processo, considera que o processo está centrado no valor nominal da especificação (GONÇALEZ, WERNER, 2009). O C_p pode ser definido pela seguinte equação:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (9)$$

Para realização de uma avaliação sobre os resultados do C_p , é possível o uso de intervalos de referência, conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Valores de referência para análise da capacidade potencial

Intervalo	Itens Não Conformes (NC) por Milhão	Interpretação
$C_p < 1$	Maior de 2700	Processo Incapaz
$1 \leq C_p \leq 1,33$	Entre 64 e 2700	Processo Aceitável
$C_p \geq 1,33$	Abaixo de 64	Processo Capaz

Fonte: Gonçalves, Werner (2009) e Kane (1986).

Pode-se também calcular a tolerância unilateral, com base em apenas um dos limites de especificação. Para o limite superior de especificação, utiliza-se o C_{pu} , enquanto que para o inferior, aplica-se o C_{pl} .

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (10)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (11)$$

Como o C_p não reflete a tendência de centralização do processo, ele é incapaz de fornecer qualquer indicação do desempenho real do processo. Nestes casos, adota-se também o índice C_{pk} como métrica complementar. Na equação 12, o C_{pk} leva

em conta tanto a variação do processo como sua localização relativa aos limites de especificação, sendo calculado por meio da dispersão e localização dos dados (KAYA, KAHRAMAN, 2010).

$$C_{pk} = \frac{\min(C_{pu}, C_{pl})}{3\sigma} \quad (12)$$

Segundo Gonzalez e Werner (2009), se o processo estiver centrado, então o valor de $C_p = C_{pk}$. Se os valores forem diferentes, pode-se inferir que o processo não está centralizado. Os citados autores afirmam que a interpretação do índice C_{pk} pode ser feita pela mesma regra do C_p . Experiências práticas mostram que medidas-padrão de verificação (ou medidas realizadas diretamente sobre produtos ou processos) estando fora do limite de tolerância T não são consideradas satisfatórias (KUREKOVÁ, 2001). Uma medida alternativa aos índices C_p e C_{pk} é o C_{pm} que leva em conta a proximidade com o valor-alvo, bem como a variação do processo para avaliar o seu desempenho (CHAN, CHENG, 1988). O cálculo do índice é dado pela equação 13.

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (13)$$

Uma vantagem do índice C_{pm} em relação ao C_p é que ele fornece uma boa ideia da capacidade do processo, tanto para os processos que se apresentam próximos ao valor nominal quanto para os que se mostram mais afastados dele (GONÇALEZ, WERNER, 2009). Como o índice C_{pm} leva em conta a proximidade de μ em relação a T , ele se torna mais sensível que o C_{pk} (WU, PEARNS, KOTZ, 2009). É comum que os índices de *performance* também sejam utilizados na análise de capacidade do processo. O índice de *performance* P_p basicamente tenta verificar se a amostra

que foi extraída do processo é capaz de atender aos requisitos do cliente (SHINDE, KATIKAR, 2012). Adicionalmente, também existe o índice P_{kp} .

$$P_p = \frac{LSE - LIE}{6s} \quad (14)$$

$$P_{pk} = \frac{\min(LSE - \mu, \mu - LIE)}{6s} \quad (15)$$

2.3 Gás liquefeito de petróleo

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é um gás fóssil não renovável, que permanece em estado líquido a pressões moderadas (TEXAS COMPTROLLER OF PUBLIC ACCOUNTS, 2008). Podendo ser obtido pelo processamento do gás natural ou por meio do refino do petróleo cru (TEXAS COMPTROLLER OF PUBLIC ACCOUNTS, 2008). O processo de distribuição de GLP para os consumidores normalmente dispensa a utilização de gasodutos, sendo distribuído por meio de caminhões basicamente de duas formas: a granel ou em cilindros transportáveis e reutilizáveis que são envasados em plantas de engarrafamento (SOBRAL, 2008). Os cilindros transportáveis são envasilhados em unidades industriais, denominadas de plantas de engarrafamento. Estas unidades têm por objetivo principal o envase do produto em um recipiente transportável que pode variar de 2 a 45 quilos. Segundo Sobral (2008), o processo de engarrafamento pode ser realizado de duas maneiras: por meio do carrossel ou nas plantas em linha. O sistema em linha é uma das modalidades mais antigas, datando da década de 1950, sendo considerado seguro e de menor custo de implantação, está presente na maioria das unidades de engarrafamento brasileiras. Além disso, pode operar com cilindros de diversas dimensões, e possui intensa participação

humana no processo (SOBRAL, 2008). A Figura 2 demonstra um modelo de planta de engarrafamento em modelo de linha.

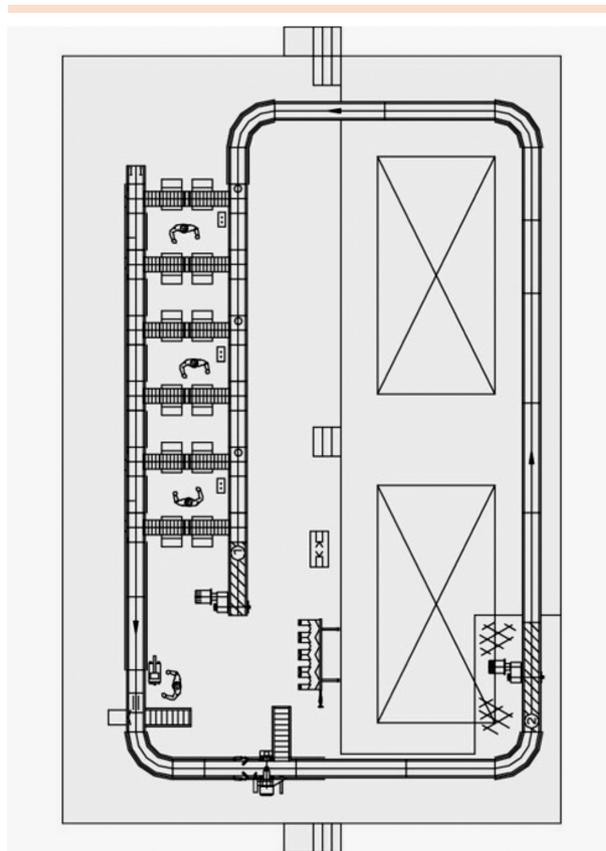


Figura 2: Planta em linha para engarrafamento de GLP

Fonte: Kosan Crisplant (2014).

O sistema por meio de carrossel (Figura 3) é o método mais sofisticado para envase de GLP em cilindros transportáveis (SOBRAL, 2008). Embora os investimentos iniciais sejam bem mais elevados, é possível obter ganhos de escala com sua aplicação. Também existe um ponto fundamental que é a redução dos acidentes de trabalho, uma vez que a quantidade de pessoas movimentando os cilindros transportáveis é drasticamente reduzida.

Após o engarrafamento, o botijão tem seu peso medido de acordo com as normas dos órgãos reguladores e, em seguida, o vasilhame é lacrado, etiquetado e carregado nos veículos para o consumidor ou revendedor.

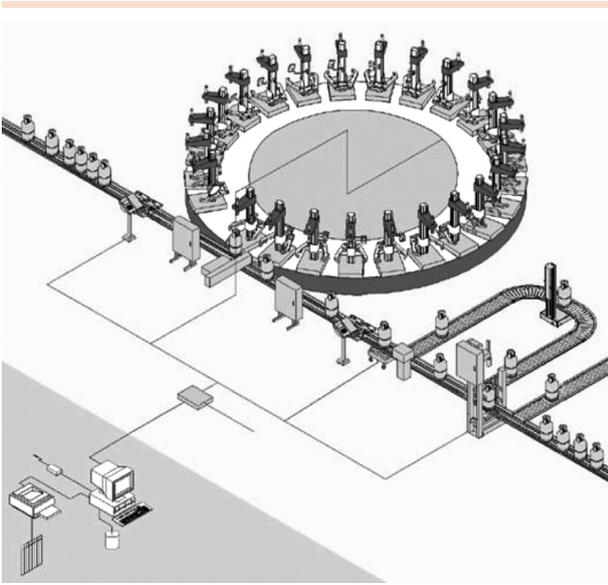


Figura 3: Planta em formato carrossel para engarrafamento de GLP

Fonte: Kosan Crisplant (2014).

3 Metodologia aplicada

A pesquisa ocorreu em uma empresa de grande porte, localizada na região nordeste do Brasil.

Inicialmente, dedicou-se a análise sobre a identificação das peças em uma primeira etapa. Em seguida, foi analisado o melhor nível de produção em escala para teste utilizando o Arena e, na última etapa, o nível escolhido foi aplicado ao processo produtivo. A metodologia de estudo adotada foi a pesquisa-ação, com intervenções visando ao aperfeiçoamento do processo produtivo. Como guia para o processo de melhora, foi adotado o ciclo definir, medir, analisar, melhorar e controlar (DMAIC), em razão de o processo de negócio já existir e necessitar de melhoramentos.

Não foi autorizada a publicação de dados adicionais sobre a organização. A empresa atua no ramo de petróleo e gás, envasando gás liquefeito de petróleo em cilindros retornáveis de 13 quilogramas. A produção média da planta é de 3000 cilindros/hora, operando em turnos diários de oito horas regulares. Para enchimento dos re-

servatórios, o operador precisa digitar a tara do vasilhame. O sistema de pesagem, por sua vez, efetua a soma da tara e do gás dentro do recipiente, expelindo o cilindro quando o processo estiver concluído.

A empresa efetuou a substituição de seu sistema de enchimento e pesagem de cilindros, por um mais eficiente e preciso, havendo, portanto, a necessidade de avaliar se o novo processo estaria realmente sob controle estatístico. A linha de produção operou em fase de testes durante três dias, período em que foram recolhidas amostras de cada hora de produção. Com o objetivo de evitar o envio de produtos defeituosos ao mercado, a empresa optou por reduzir sua produção horária para 500 vasilhames. Para o cálculo do tamanho amostral, levou-se em consideração uma população finita de 500 reservatórios. As informações adicionais foram obtidas com base nos manuais internos, nas orientações corporativas da organização e na entrevista com gestor de produção. O intervalo de confiança foi fixado em 95%, o desvio-padrão populacional foi estimado em 0,1, e o erro absoluto tolerável em 0,072, formando uma amostra de oito unidades.

Foram adotados os gráficos da média e da amplitude, sendo calculados os limites superiores e inferiores de controle para cada um dos três dias. Entre os dias, foram efetuadas intervenções de melhoria no processo de forma a tratar os problemas detectados. Por fim, calcularam-se os índices de capacidade (C_p e C_{pk}) e desempenho do processo (P_p e P_{pk}) para todos os dias, que serviram de orientação para calibração e parametrização do sistema de enchimento e pesagem.

3.1 Estudo de caso

Foram retiradas diariamente oito amostras aleatórias, equivalentes a cada hora de produção. Para separação, usou-se um mecanismo de expulsão da esteira principal para a linha de retrabalho.

Na avaliação, o operário efetuava a releitura da tara e da pesagem do vasilhame de forma a verificar se o processo estaria permitindo que este recipiente fosse envasado com 13 quilos de GLP. Ao final do dia, os dados foram analisados pela equipe de instalação, e o sistema de pesagem reajustado, até que o processo fosse considerado sob controle.

Para o envase dos vasilhames, existem padrões de qualidade que devem ser seguidos e que estão relacionados à média e dispersão. O desvio-padrão máximo deve ser de 0,1, e o volume médio dos vasilhames deve concentrar-se em 13 quilos, de forma a evitar prejuízos para a empresa ou para o cliente. Caso a distribuidora envase, por exemplo, 13,1 quilos em média no fim de um dia normal de produção, terá perdido três toneladas de produto. Em contrapartida, tanto o envase abaixo do disposto no rótulo do produto quanto uma grande dispersão são puníveis com multas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

A linha produtiva iniciou sua operação no primeiro dia de testes, e os reservatórios foram analisados estatisticamente também nesse momento. Como a amostra foi inferior a dez, optou-se por utilizar o gráfico da média associado ao da dispersão. Na apuração, observou-se que tanto a média quanto o desvio estavam fora dos parâmetros, evidenciando um processo sem controle, conforme as Figuras 4 e 5.

A média de GLP envasado no reservatório estava três vezes superior ao limite aceitável pela empresa. Um processo assim poderia trazer a ela prejuízos diários de até nove toneladas de produto. Houve forte variação dos dados, com um ponto fora

do limite superior de controle, dois acima da linha média e quatro pontos abaixo dessa mesma linha. A última observação da hora 8 mostrou-se muito próxima do limite inferior, demonstrando um processo fora de controle. A dispersão do primeiro dia também foi considerada do mesmo modo e totalmente fora dos limites de especificação da empresa. A amplitude das amostras chegou a quase um quilo e verificou-se nos gráficos a existência de um ponto acima do limite superior, além dos valores não fecharem próximos à linha média. Nas duas cartas, houve um ponto fora do limite superior na quinta hora de produção. A equipe de operações detectou que, nesse período, ocorreu uma troca de turnos, porém não se pode comprovar se realmente há relação entre este evento e a ocorrência de pontos fora dos limites. A análise de capacidade foi realizada, de acordo com os dados da Tabela 2.

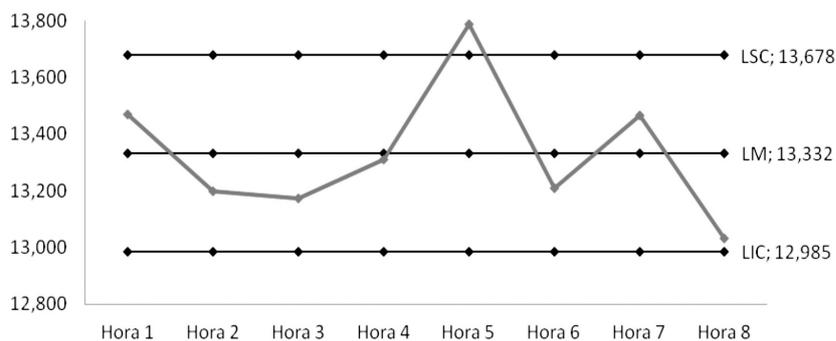


Figura 4: Gráfico da média para o primeiro dia

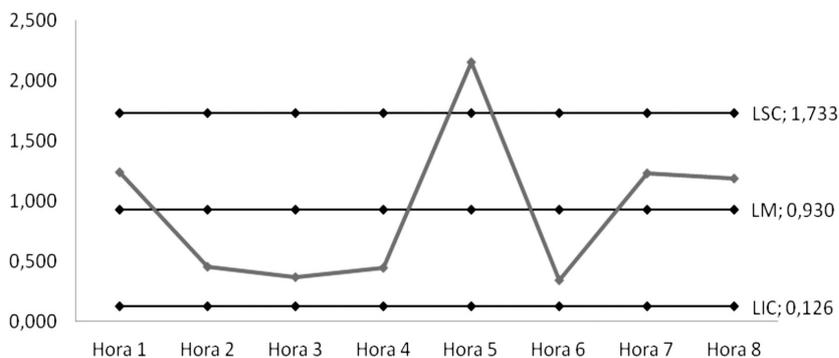


Figura 5: Gráfico da dispersão para o primeiro dia

Tabela 2: Índices de capacidade e performance do primeiro dia

Índice	Valor
LSE	13,10
LIE	12,90
C_p	0,14
C_{pk}	(0,31)
P_p	0,14
P_{pk}	(0,33)

O índice de capacidade (C_p) foi calculado em 0,14 e considerado inadequado por ser menor que um. Igualmente, o índice de desempenho do processo (P_p) foi igual a 0,14 e menor que 1,33, não satisfazendo o critério de aceitação. Desta forma, o processo não tem condições de manter as especificações definidas no projeto e não é capaz. De igual maneira, o índice C_{pk} estava em 0,31 negativos, indicando que a média do processo encontrase fora dos limites de especificação. A curva estava deslocada à direita, apresentando um $C_{pu} = (0,31)$, conforme Figura 6.

Os vasilhames engarrafados nesse dia não foram enviados ao cliente, sendo decantados. A decantação é um procedimento para retirada do GLP do cilindro e retorno do reservatório para a linha produtiva.

Durante a decantação feita nesse dia, observou-se que muitos vasilhames estavam com problemas na válvula. Identificando-se, na maioria das vezes, presença de corpos estranhos, válvulas com folgas, desgastes ou defeitos. Por experiência da empresa, tais obstruções ou defeitos fazem com que o bico de enchimento fique em falso, não permitindo que o envase seja executado corretamente o que acarreta o vazamento do cilindro. Isto foi apontado como a principal causa da alta variância no primeiro dia produtivo.

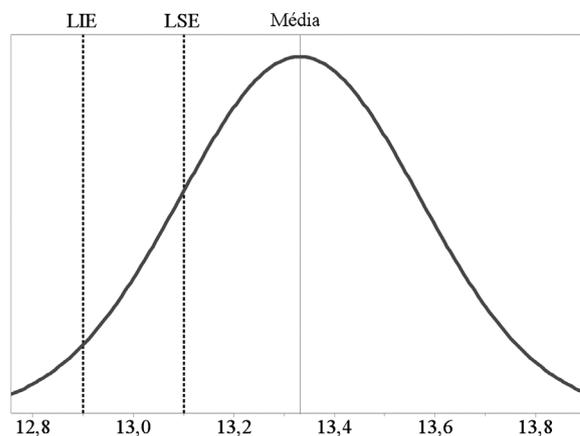


Figura 6: Deslocamento da distribuição do primeiro dia

Para reduzir a variação, o sistema de lavagem dos botijões foi reajustado com vistas à remoção de impurezas, tais como restos de sabão, areia e corpos sólidos. Também foram realizados apertos nas válvulas antes da entrada do vasilhame na linha produtiva. Para reduzir a média de produto envasado, foram feitos ajustes no tempo de enchimento das balanças além de ser reduzida a pressão do sistema de bombeio de GLP para a planta de produção. A divulgação dos tempos de enchimento e pressão de trabalhos não foi autorizada.

No segundo dia, após as correções assinaladas, a operação se iniciou novamente, gerando o gráfico da média (Figura 7).

A linha média apresentou redução significativa em relação ao dia anterior, passando de 13,33 para 13,11. Apesar disso, os valores ainda perma-

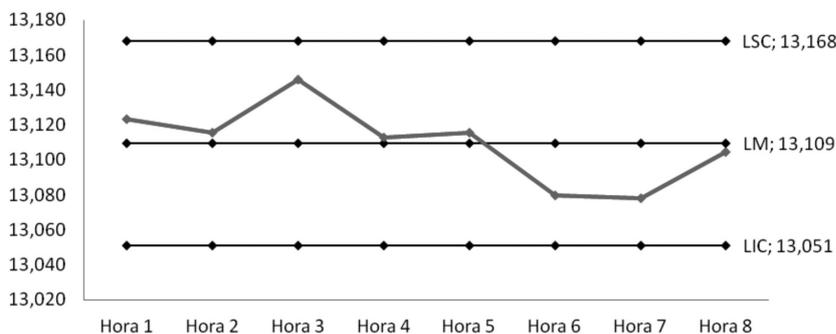


Figura 7: Gráfico da média para o segundo dia

neceram distantes dos limites de especificação definidos pela empresa. O gráfico não apresentou nenhum ponto fora dos limites de controle, porém os dados não fecharam completamente em torno da média. Observou-se que algumas válvulas ainda apresentavam desgastes e resíduos de sabão (que é utilizado para detecção de vazamento), além disso, a pressão de bombeio precisava de novo ajuste. Assim, foram adotadas intervenções sobre as plataformas de enchimento e o sistema de bombeio de GLP, tais como ajustes de pressão e verificação de válvulas, de forma a aproximar os valores aos limites de especificação. A empresa não autorizou a divulgação da pressão de bombeio adotada. No que tange a dispersão, as ações se mostraram produtivas, reduzindo a amplitude média de 0,930 para 0,147, como mostra a Figura 8.

Não se observou pontos fora dos limites de controle e os valores fecharam em torno da linha média, evidenciando a melhoria e eficácia das ações adotadas. Efetuou-se uma análise de capacidade para o segundo dia, conforme Tabela 3.

Os índices C_p apresentaram valores acima de 1,00, o que é considerado adequado e representa um processo relativamente confiável. O C_{pk} e o P_{pk} continuaram com valores abaixo de zero, mostrando que a curva está descentralizada. A empresa optou por não realizar decantação de seus reservatórios produzidos no segundo dia, visto que os valores médios e os da disper-

Tabela 3: Índices de capacidade e performance do segundo dia

Índice	Valor
LSE	13,10
LIE	12,90
C_p	1,44
C_{pk}	(0,14)
P_p	1,49
P_{pk}	(0,14)

são apresentaram melhoras. Novos ajustamentos foram feitos na máquina de lavagem, desta vez na velocidade da esteira, de modo a permitir que o cilindro transite dentro da máquina por mais tempo, o que reduziria a quantidade de impurezas no corpo e na válvula. Adicionalmente, as ações para ajustes de válvulas adotadas no dia anterior foram mantidas.

Com a análise da variação sobre os valores médios entre os dois dias, foi possível estabelecer uma relação do tempo de enchimento com a pressão do sistema e seu impacto sobre a média de GLP envasado em cada botijão. Foram adotadas ações para limpeza e raspagem da alça dos botijões, local onde está gravada a tara do botijão. Todas as vezes que este recipiente é recebido na plana de enchimento uma camada de tinta é aplicada nele, e isto, com o passar dos anos, dificulta a visualização dos valores. Limpar a alça facilitou a leitura dos valores por parte do operador. No terceiro dia, a linha média do gráfico X foi igual a 12,999, sendo muito próxima dos limites de especificação (Figura 9).

Todos os valores do gráfico fecharam próximos à linha média. Não foram observados qualquer tipo de estrutura específica ou pontos fora dos limites superiores ou inferiores. De igual forma, a dispersão também foi reduzida em relação ao dia anterior (Figura 10).

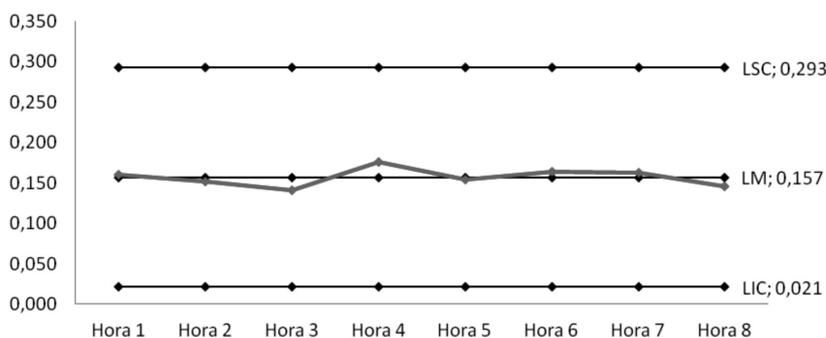


Figura 8: Gráfico da dispersão para o segundo dia

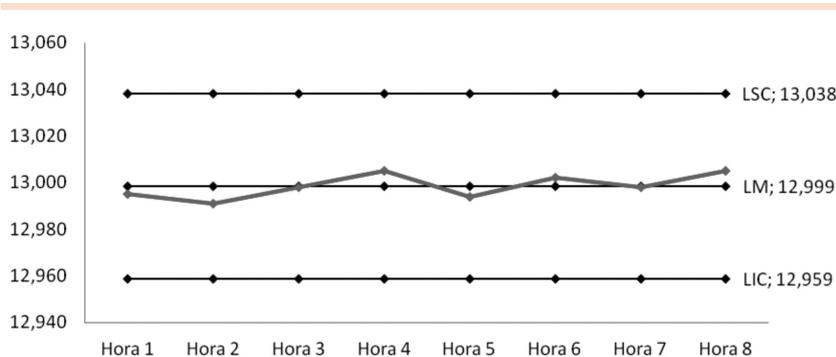


Figura 9: Gráfico da média para o terceiro dia

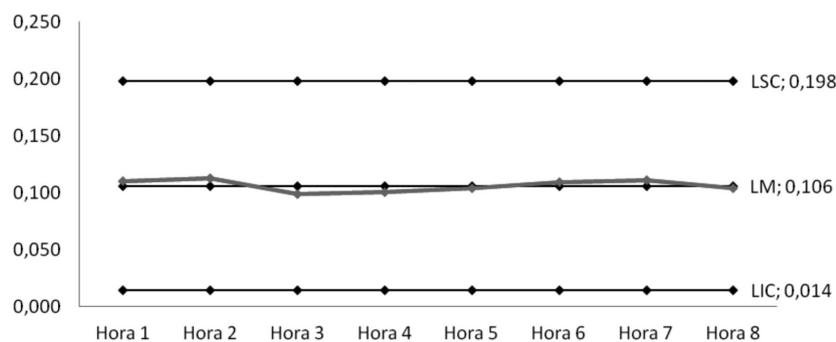


Figura 10: Gráfico da dispersão para o terceiro dia

As ações repercutiram positivamente sobre o processo, influenciando os índices de capacidade, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Índices de capacidade e performance no terceiro dia

Índice	Valor
LSE	13,10
LIE	12,90
C_p	6,24
C_{pk}	6,15
P_p	6,47
P_{pk}	6,37

Como os índices C_p e C_{pk} estão acima de 1,33, pode-se considerar que o processo é bastante satisfatório e altamente confiável. A *performance* ($P_p = 6,47$) apresentou um alto valor, permitindo afirmar que existe baixa variação em relação à faixa dos limites superiores e inferiores de especificação. Do mesmo modo, o P_{pk} foi igual a 6,37, indicando que há uma baixa variação na faixa

dos limites de especificação. Uma análise global possibilita afirmar que o processo está sob controle.

4 Conclusões

O processo produtivo do GLP é considerado extremamente confiável, mesmo antes da intervenção para modernização do maquinário. Com a instalação de novos equipamentos, temia-se, na empresa, que o novo processo pudesse produzir itens fora de especificação. Com o uso dos índices de capacidade foi possível avaliar diversos aspectos do processo e sua conformidade em relação às especificações do projeto e do mercado. Ao longo de três dias, os índices foram utilizados como métrica e horizonte para parametrização e ajustes no novo sistema de enchimento. O uso de tais índices poupou tempo e recursos da equipe de implantação, permitindo a conclusão mais rápida do projeto. Já o uso do controle estatístico possibilitou observar se o processo realmente estaria sob controle estatístico. Ações de melhorias foram aplicadas de forma concomitante ao uso do controle estatístico, procedimento esse que se mostrou mais eficaz do que a utilização dos gráficos de modo isolado. Com a experiência da empresa em contingenciamento de problemas, foi possível adotar ações para reduzir a dispersão do processo bem como melhorar a média da dispersão por produto envasado. Estas ações permitiram que a organização economizasse produto e cumprisse os requisitos das agências reguladoras do setor. Além disso, ela pôde liberar a entrega dos vasilhames ao mercado com a segurança de estar atendendo a todos

dos limites de especificação. Uma análise global possibilita afirmar que o processo está sob controle.

os requisitos de qualidade. Após o terceiro dia, a equipe efetuou uma nova pesquisa com base em uma produção de 3000 peças por hora e obteve resultados praticamente idênticos aos do atual trabalho, o que indica a eficácia da metodologia do estudo de capacidade e controle aplicada.

Referências

- BORDIGNON, S.; SCAGLIARINI, M. Statistical analysis of process capability indices. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 18, n. 4, p. 321-332, Jul./Aug. 2002.
- CAVALCANTI, A. M.; AQUINO, J. T.; MECCHI, T. M. Análise da percepção dos usuários dos serviços oferecidos pelas companhias aéreas sob a ótica do modelo SERVQUAL. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 249-258, 2013.
- CHAN, L.; CHENG, S. A new measure of process capability Cpm. *Journal of Quality Technology*, v. 20, n. 3, p. 162-175, 1988.
- CHOU, Y.-M.; POLANSKY, A.; MASON, R. Transforming non-normal data to normality in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, v. 18, p. 133-141, 1998.
- FRANKS, O. S. A theoretical model for implementing quality management in an automated environment. *International Journal of Control and Automation*, v. 2, n. 2, p. 1-8, 2009.
- GARVIN, D. A. *Competing in the eight dimensions of quality*. Cambridge: Harvard Business Review, 1987.
- GIRON, E. et al. Aplicação do controle estatístico de processo em uma empresa do setor avícola. *RAI – Revista de Administração e Inovação*, v. 10, n. 4, p. 38-62, out./dez. 2013.
- GONÇALEZ, P. U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. *Gestão e Produção*, v. 16, p. 121-132, jan./mar. 2009.
- HARDIE, N. The effects of quality management on business performance. *Quality Management Journal*, v. 5, n. 3, p. 65-83, 1998.
- KANE, V. E. Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, v. 18, p. 41-52, Jan. 1986.
- KAYA, I.; KAHRAMAN, C. Development of fuzzy process accuracy index for decision making problems. *Elsevier Sciences*, v. 180, n. 6, p. 861-872, Mar. 2010.
- KOSAN CRISPLANT. *Filling systems* [internet]. 2014. Disponível em: <<http://www.kosancrisplant.com/en/home/>>. Acesso em: 4 abril 2014.
- KUREKOVÁ, E. Measurement process capability – trends and approaches. *Measurement Science Review*, v.1, n. 1, p. 43-46, 2001.
- LIND, D.; MARCHAL, W.; WATHEN, S. *Statistical Techniques in Business & Economics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- MONTGOMERY, D. C. *Introduction to statistical quality control*. Jefferson City: John Wiley & Sons, 2009.
- MOTORCU, A. R.; GÜLLÜ, A. Statistical process control in machining, a case study for machine tool capability and process capability. *Materials & Design*, v. 27, n. 5, p. 364-372, 2006.
- MOTTONEN, M. et al. Manufacturing process capability and specification limits. *The Open Industrial and Manufacturing Engineering Journal*, v. 1, p. 29-36, 2008.
- OLIVEIRA, O. J. *Gestão da qualidade – tópicos avançados*. São Paulo: Cengage Learning Editores, 2003.
- PALADINI, E. P. *Controle de qualidade uma abordagem abrangente*. São Paulo: Atlas, 1990.
- RUNGER, G. C. Quality Engineering. *ROBUSTNESS OF VARIANCE ESTIMATES FOR BATCH AND CONTINUOUS PROCESSES*, v. 7, n. 1, p. 31-43, 1994.
- SHINDE, J.; KATIKAR, R. S. Importance of process capability and process performance indices in machine tool. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*, v. 2, n. 2, p. 1211-1217, 2012.
- SOBRAL, M. F. *Modelo multicritério para classificação de clientes em uma empresa de GLP*. 2008. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)– Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2008.
- TEXAS COMPTROLLER OF PUBLIC ACCOUNTS. *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*. Texas: The Energy Report, 2008.
- WALTER, O. M. et al. Aplicação individual e combinada dos gráficos de controle Shewhart e CUSUM: uma aplicação no setor metal mecânico. *Gestão e Produção*, v. 20, n. 2, p. 271-286, 2013.
- WU, C.-W.; PEARN, W. L.; KOTZ, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. *International Journal of Production Economics*. v. 117, n. 2, p. 338-359, Feb. 2009.

Recebido em 5 nov. 2014 / aprovado em 24 fev. 2015

Para referenciar este texto

SOBRAL, M. F. F. et al. Estudo de caso sobre o uso do controle da qualidade em uma indústria do setor de petróleo e gás. *Exacta – EP*, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 13-25, 2015.

