

ANÁLISE DE CONTROLE ESTATÍSTICO EM UM PROCESSO PETROQUÍMICO

Danilo Soares Bittencourt

Graduando do curso de Engenharia de Produção da UFRGS

email: bittencourt1982@gmail.com

Rogério Miorando

Departamento de Engenharia de Produção e Transportes UFRGS

email: miorando@gmail.com

Karina Rossini

Departamento de Engenharia de Produção e Transportes UFRGS

email: karina.rossini@gmail.com

Resumo: *Este artigo apresenta uma análise da produtividade média de um processo petroquímico de uma empresa de grande porte desse setor. O estudo contou com a elaboração de cartas de controle para melhor monitoramento da taxa de produção horária do processo, análise de variância entre a produtividade de funcionários da organização e ainda, com um planejamento de experimentos para a escolha de incrementos em variáveis de controle com melhores resultados.*

Palavras chave: *Processo petroquímico; controle estatístico de processo; planejamento de experimentos.*

Abstract: *This article presents an analysis of the average productivity of a petrochemical process of a large company of this sector. This study involved the preparation of control charts to better monitor the hourly rate of the production process, analysis of variance among the productivity of employees of the organization and also with a design of experiments for the choice of increments in control variables with the best results.*

Keywords: *Petrochemical process; statistical process control; design of experiments.*

1. Introdução

Atualmente, existe uma pressão crescente de investidores para que os negócios sejam mais lucrativos, reajam mais rapidamente ao mercado, ofereçam produtos e serviços de maior qualidade e reduzam custos. Para Hair et al. (2009), uma exigência essencial nesse cenário é a criação e o gerenciamento de conhecimento eficaz, pois, atualmente, não há falta de informação, mas escassez de conhecimento.

A indústria petroquímica ocupa uma posição singular na estrutura produtiva brasileira, em face da sua importância para o crescimento e desenvolvimento econômico

do país (COSTA, 2011). Segundo Vianna (2007), essa indústria atua em um segmento de forte comoditização, onde a concorrência em preços é uma constante, sofrendo fortemente os impactos de subida do preço do petróleo e a influência de gigantes conglomerados internacionais que dominam o mercado externo.

Várias sistemáticas da qualidade foram desenvolvidas em empresas de manufatura que se utilizam de processos discretos. Os processos da indústria petroquímica, no entanto, são normalmente contínuos e necessitam do aumento do acervo de referências sobre o estudo de aplicabilidade em empresas de processo com esta característica. Atualmente, tal acervo é predominantemente voltado para processos discretos (ARAGÃO, 2008).

Segundo Montgomery (2009), a estatística é um conjunto de técnicas úteis para a tomada de decisão sobre um processo ou população, baseada na análise da informação contida em uma amostra desta população. Em geral, a busca por melhorias na qualidade de um processo produtivo implica na redução da variabilidade (BARBETTA et al., 2010).

Este trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade da taxa média horária de produção de polietileno de um fábrica do setor petroquímico. Neste estudo, também será realizada uma Análise de Variância para a definição de diferenças de produtividade entre os grupos de trabalho da fábrica e para as principais variáveis de entrada do processo que possam impactar a produtividade.

Além dessa introdução, este artigo ainda apresenta outras quatro seções. A segunda seção aborda o referencial teórico sobre Controle estatístico de processo e Análise de Variância. Na terceira seção são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho. A quarta seção é constituída dos resultados obtidos após a intervenção no processo e, por último, a quinta seção apresenta as considerações finais.

2. Referencial Teórico

Nesta seção são apresentados conceitos necessários para o entendimento do contexto no qual o estudo será realizado, bem como das ferramentas utilizadas. Busca-se identificar as singularidades de processos contínuos, cuja sistemática de produção é diferente dos processos discretos. Também é discutida a utilização de ferramentas

estatísticas como o Controle estatístico de processo (CEP) e a Análise de variância (ANOVA – *Analysis of Variance*).

2.1. Controle estatístico de processo (CEP)

Um processo deve ser estável e replicável, em geral, para produzir um produto que corresponda às exigências dos clientes. Ou seja, este deve ser capaz de operar com pequena variabilidade em torno das dimensões nominais determinadas como características de qualidade de um produto (MONTGOMERY, 2009). O Controle estatístico de processo (CEP) é uma coleção de ferramentas para a resolução de problemas e busca a obtenção da estabilidade, bem como a melhoria da capacidade de um processo através da redução de sua variabilidade.

O CEP tem como principal objetivo permitir o controle do que está sendo produzido, em tempo real e pelo próprio operador, aumentando o seu comprometimento com a qualidade. Para Pease et al. (2001), o CEP permite monitorar propriedades de interesse, de forma a assegurar sua manutenção dentro de limites preestabelecidos. Além disso, indica quando se devem adotar ações de correção e de melhoria.

Segundo Pires (2000), o principal elemento do CEP é a carta de controle de processo. Estas podem ser elaboradas tanto para o monitoramento de variáveis quanto atributos que determinam o desempenho do processo. Essa ferramenta utiliza como dados de entrada as medições realizadas de uma característica de qualidade do produto. As medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas para que possam ser comparadas com limites de controle calculados.

As cartas de controle permitem identificar o comportamento do processo ao longo do tempo detectando a incidência de causas especiais. Ramos (2000) afirma que uma causa especial se trata de um fator que gera variações que afetam o comportamento do processo de maneira imprevisível. Já as causas comuns são definidas como fontes de variações que afetam a todos os valores individuais de um processo. É resultante de diversas origens, sem que nenhuma tenha predominância sobre a outra.

A importância de identificar se uma variação no processo foi devido a uma causa comum ou a uma causa especial se dá em virtude da ação a ser tomada. Conforme Ramos (2000), a eliminação de causas especiais exige uma ação local pelo próprio operador do processo, por exemplo. Já as causas comuns exigem ações sobre o sistema de trabalho necessitando maior esforço para a sua eliminação.

Araujo et al. (2011) sinaliza que as empresas costumam implementar o CEP de uma forma errônea sem levar em consideração duas suposições importantes. A primeira se trata da normalidade da distribuição dos dados, a segunda da interdependência destes. Essa sendo a mais importante dentre as duas, pois mesmo que a primeira seja moderadamente violada, os gráficos ainda apresentam resultados satisfatórios. Já quando existe algum grau de autocorrelação nos valores da característica da qualidade existem grandes chances de valores caírem fora dos limites de controle mesmo com o processo em controle.

Alternativamente às cartas de controle tradicionais, o gráfico de controle da soma cumulativa (CUSUM – *cumulative sum*) e o gráfico da média móvel exponencialmente ponderada (EWMA – *exponentially weighted moving average*) podem ser utilizados para a detecção de alterações na média apresentadas pelo processo (SOUZA et al., 2007).

Em que pese o exposto, Faria (2008) ressalta que apesar dos conceitos e das técnicas estatísticas serem importantes para o uso do CEP nas empresas, estes devem ser vistos apenas como auxiliares. O fundamental é o desenvolvimento de uma nova cultura permitindo a motivação e cooperação de todos buscando sempre a melhoria contínua do processo.

2.2. CEP em Processos Contínuos

Processos contínuos são representados pela indústria química e petroquímica, além de outras inúmeras empresas. Nesses processos, não existem unidades discretas de produtos. Ramos (2000) declara que processos contínuos possuem peculiaridades quando comparados a processos tradicionais. Geralmente apresentam maior variabilidade nas entradas, o controle do processo costuma ser totalmente automático e sua alteração é lenta e gradual e as saídas se dão em fluxo contínuo ou lotes de material.

No caso de processos da indústria petroquímica, as empresas usam automatizações de controle do tipo Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD). Segundo Bouyer (2011), esse tipo de sistema é uma interface entre os operadores e o processo produtivo. O SDCD apresenta os sensores, os dispositivos de controle, os circuitos e as válvulas do processo e através das telas e dos computadores, os operadores podem supervisionar e intervir no estado do processo de forma a manter as variáveis (temperaturas, pressões, vazões e níveis) em patamares desejados.

Quando da utilização do CEP em um processo contínuo, devido às suas peculiaridades, algumas dificuldades podem ser encontradas. Ramos (2000) elenca as seguintes:

- Emprego de amostras unitárias: a maioria dos livros textos de CEP enfatiza somente gráficos em que médias são utilizadas para o controle do processo e nos processos contínuos é bastante comum serem utilizadas amostras de tamanho unitário onde há somente um resultado disponível para análise.
- Coleta e formação de amostras: existe a necessidade de identificar a melhor forma de coletar as amostras e formar subgrupos para a análise da estabilidade estatística. Em processos contínuos estas metodologias nem sempre são tão intuitivas como na fabricação de produtos discretos.
- Transmissão de variação pelas matérias primas: como os insumos utilizados na indústria de processos contínuos costumam ser fornecidos diretamente da natureza sem haver nenhum processamento prévio, é comum haver maior variação em suas características do que em materiais que se encontram em estágios mais avançados da cadeia produtiva.
- Fluxos múltiplos de material: como os processos podem apresentar múltiplas entradas, geralmente há a necessidade da elaboração de múltiplos gráficos de controle, sendo um para cada fluxo, e dificuldade na formação de subgrupos para análise do processo.
- Bateladas homogêneas, mas com diferenças entre si: lotes geralmente possuem homogeneidade satisfatória, contudo, podem apresentar variabilidades com relação a outros lotes.
- Dados não independentes: pode haver correlação entre dados obtidos próximos no tempo e este problema pode afetar os gráficos de controle, que necessitam ser modificados para a compensação dessa inconveniência.

A autocorrelação acontece quando um valor acima da média tende a ser seguido por outro valor acima da média e um valor abaixo da média, tende a ser seguido por outro valor abaixo da média (MONTGOMERY, 2009). Ainda sobre autocorrelação, Claro et al. (2007), afirmam que mesmo níveis moderados podem apresentar efeitos significativos na incidência de alarmes falsos. Já, Vasconcelos et al. (2012) advertem que devem ser utilizados gráficos apropriados para a avaliação quando se trabalha com dados que apresentem certa correlação.

Em relação às características da qualidade de seus produtos, um processo pode apresentar comportamento estacionário quando os dados variam em torno de alguma média fixa de maneira estável e previsível e não-estacionário quando se verifica certa instabilidade sem que os dados apresentem algum sentido de média estável ou fixa. O segundo caso é bastante encontrado nas indústrias químicas e petroquímicas e se dá principalmente devido a fatores que não podem ser estabilizadas como variáveis ambientais e propriedades da matéria prima (MONTGOMERY, 2009).

Dado a problemática da autocorrelação e da configuração não estacionária que se verifica nos processos contínuos, Montgomery (2009) ressalta que a primeira pode ser contornada com algumas modificações nos gráficos de controle tradicionais, já a segunda pode ser dirimida com o controle de retroação. Claro (2007) conclui que cartas de EWMA mostram-se como uma alternativa eficiente em atenuar a perda do poder das cartas de controle devido à existência de autocorrelação na variável sob monitoramento.

Moreira Jr. (2005), defende que é necessário primeiro tratar dados autocorrelacionados para que depois estes possam ser controlados estatisticamente. O autor identifica em seu estudo o modelo auto-regressivo integrado de média móvel (ARIMA - *autoregressive integrated moving average*) como uma importante ferramenta para tal tratamento e afirma que o ajuste por um modelo adequado tem por objetivo separar causas estruturais de um processo das causas comuns e especiais observadas nos gráficos de controle.

2.3. Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância avalia a igualdade das médias de diferentes níveis em que um fator é testado. Segundo Runger et al. (2009), a ANOVA trata de um teste de hipóteses onde a hipótese nula indica que as médias dos diferentes níveis ou tratamentos de um determinado fator são iguais e a hipótese alternativa afirma que ao menos uma das médias analisadas é diferente das demais significativamente.

Para uma boa utilização da ferramenta, Grigolo et al. (2012) relata que é importante atentar para as suposições de normalidade, de independência e de que as populações apresentem variâncias iguais. Não obstante, o autor conclui em seu trabalho que mesmo sendo violada alguma dessas condições, de forma moderada, a ANOVA apresenta resultados satisfatórios por se tratar de um teste bastante robusto.

A ANOVA compreende um planejamento experimental de um fator. Um experimento planejado é um teste - ou uma série de testes - onde mudanças propositalmente são feitas em variáveis de entrada de um processo de modo a se observar mudanças correspondentes nas variáveis de saída. (MONTGOMERY, 2009).

Ainda segundo Montgomery (2009), experimentos fatoriais são utilizados quando se deseja tratar dois fatores simultaneamente para o conhecimento de níveis ótimos de operação de cada fator. Já quando existem vários fatores de interesse em um experimento, um planejamento fatorial se faz necessário. Nesse caso, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores estudados devem ser promovidas no experimento. O efeito de um fator é definido como a mudança no nível do fator.

Existem certos tipos especiais de planejamentos fatoriais. Bortolini (2012) aborda o planejamento fatorial 2^k . Esse planejamento leva esse nome, pois trata de k fatores, cada um com dois níveis. Em seu estudo o autor conclui que este tipo de experimento é bastante interessante para a indústria uma vez que seu planejamento e sua análise são relativamente simples se comparado a experimentos com mais de dois níveis para cada fator.

3. Procedimentos Metodológicos

Esta seção aborda o cenário da empresa e as classificações do método de pesquisa quanto à natureza, abordagem, objetivos e procedimentos. Também será relatado o método adotado para a elaboração do estudo.

3.1. Descrição do Cenário

A empresa foco desse estudo foi fundada em 16 de agosto de 2002 e atua tanto na primeira quanto na segunda geração da cadeia petroquímica. Seu foco é a produção de polietileno, polipropileno e PVC.

Atualmente, essa organização é uma das principais exportadoras brasileiras e está presente em mais de sessenta países em todos os continentes. Conta com uma equipe com mais de sete mil integrantes e possui 36 unidades industriais distribuídas pelo mundo.

A organização é capaz de produzir anualmente mais de dezesseis milhões de toneladas de petroquímicos e químicos intermediários e contabilizou, em 2012, um

faturamento de mais de 42 bilhões de reais. Sua estrutura organizacional está dividida em cinco unidades de negócio, a saber: Petroquímicos Básicos, Poliolefinas, Vinílicos, EUA e Europa e, por fim, a unidade da América Latina.

A unidade industrial foco da pesquisa faz parte da Unidade de Negócios de Poliolefinas e é produtora de polietileno de baixa densidade – resina termoplástica largamente utilizada na produção de sacolas plásticas e sacarias em geral. A planta em que serão realizados os experimentos utiliza um processo petroquímico exotérmico denominado de Alta Pressão em função dos altos níveis de pressão com que é operada. Essa planta é capaz de produzir aproximadamente quinze toneladas de resina por hora e é operada 24 horas por dia, sete dias por semana por operadores que trabalham em regime de revezamento de turno.

O processo de Alta Pressão iniciou suas atividades há mais de três décadas e muitas foram as mudanças, realizadas até agora, em relação ao seu projeto original buscando o aumento de produtividade. Atualmente existe a observância da falta de uniformidade da quantidade de polietileno produzida por hora de um lote para outro. Cada lote é composto de 95.000 quilos de resina e apresentam tempos de formação diferentes um do outro. É de interesse da equipe de engenharia entender como essa variabilidade se comporta e o que a está causando de forma que – ao tratar tais causas – a produção horária de polietileno atinja os padrões esperados pelos projetos de aumento de carga.

A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos onde pode ser identificado o fluxo do processo estudado. O gás é recebido a aproximadamente 40kgf/cm^2 no Limite de Bateria da fábrica através de gasoduto e é comprimido primeiramente a 250kgf/cm^2 e em um segundo momento a 3100kgf/cm^2 em um compressor de 15000HP de onde vai para o reator e reage com o catalisador transformando-se em polímero fundido. Em seguida o polímero oriundo do reator é extrudado para ser armazenado no formato de grânulos. A injeção de catalisador é feita no reator.

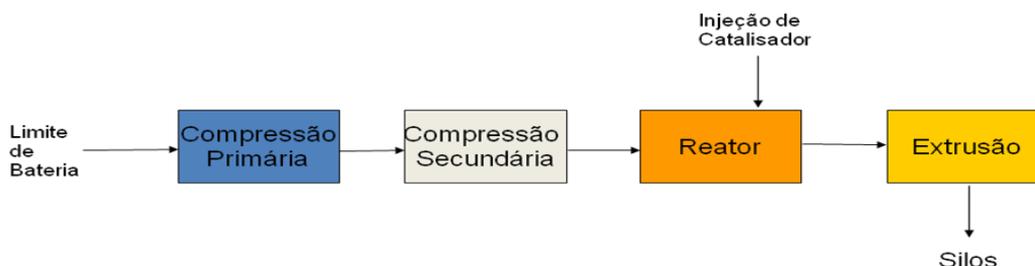


Figura 1: Diagrama de blocos do Processo de Alta Pressão

A reação ocorre de forma eficiente apenas com determinados níveis de temperatura dentro do reator. As variáveis que podem ser alteradas com a finalidade de se elevar a temperatura do reator são a pressão e a vazão da injeção de catalisador. Cabe ressaltar que estudos nunca foram feitos para a determinação de qual dessas variáveis torna o processo mais produtivo.

3.2. Caracterização do método de pesquisa

Quanto à sua natureza, esse trabalho pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, pois tem a finalidade de definir as melhores formas de atuar no processo e conhecer diferenças de trabalho entre grupos de turno de forma a se determinar melhores práticas de operação. No tocante à abordagem, a pesquisa se dará de forma predominantemente quantitativa, uma vez que os dados numéricos serão levantados para o cálculo de médias, desvios padrão e de resultados dos experimentos. Com relação aos objetivos, o estudo se classifica como explicativo, dado que através da definição de certos procedimentos os resultados poderão ser elencados e a discussão sobre eles poderá ser feita. Por fim, no que se trata dos procedimentos, a pesquisa pode ser definida predominantemente como experimental devido ao fato de ser basicamente concentrada em análise de experimentos, contudo, sob esse aspecto, o caráter também de pesquisa-ação não pode ser ignorado em virtude de o resultado apresentar oportunidades de melhorias que serão disseminadas entre os funcionários da empresa.

3.3. Caracterização do método de trabalho

O método utilizado para o estudo proposto pretendeu gerar informações a cerca da variabilidade da taxa média de produção da planta estudada e foi dividido em cinco etapas: *i)* coleta de dados de produtividade horária do processo de Alta Pressão; *ii)* estratificação da produtividade horária entre os grupos de trabalho; *iii)* análise da variância das taxas de produtividade média dos grupos de operadores; *iv)* análise dos efeitos da pressão e vazão de catalisador para o reator sobre a carga de produção horária, bem como a análise de interação entre esses dois fatores; *v)* análise dos resultados obtidos para a otimização do processo.

Na primeira etapa, os dados foram coletados através de um *software* utilizado em tempo integral para a operação do processo que informa os valores de cada variável

do SDCD. O *software* descrito é chamado Aspen e é monitorado pelo operador que de acordo com as variáveis que o processo apresenta, atua ou não em determinados controladores. Todas as informações do processo são registradas e é possível obter-se dados desde a década passada. Essa etapa permitirá o entendimento da variabilidade da taxa de produção horária da planta.

A segunda etapa foi realizada vinculando os dados obtidos através do Aspen às datas em que cada grupo de turno estava operando o processo. Foram coletadas amostras de médias de produtividade horária de cada grupo para o estudo. Uma vez estratificados os dados, a terceira etapa realizou uma análise de variância que permitiu verificar se existia diferença significativa na taxa de produção entre os grupos de forma a buscar atuar em grupos que apresentem as médias mais baixas.

A quarta etapa compreendeu a realização de um experimento fatorial com níveis diferentes de pressão e de injeção de catalisador, observando se a taxa de produção horária da planta era influenciada de forma positiva ao se escolher uma dessas duas variáveis em detrimento de outra. Foi também analisada, nesse momento, qualquer interação entre os fatores. Por fim, a quinta e última etapa tratou da análise dos resultados obtidos para a otimização do processo.

4. Resultados e Discussão

Essa seção descreve os procedimentos que foram realizados para a elaboração do estudo pretendido descrito anteriormente.

4.1. Cartas de controle para a produção horária

Em um primeiro momento, foi necessária a coleta de dados suficientes para que as cartas de controle pudessem ser elaboradas para posterior controle da operação da produção de resina horária. Através de planilhas já existentes de controle de formação de lotes e de controle de ensaques desses lotes obtinha-se a média de produção horária de cada lote dividindo o valor real de resina ensacada pelo tempo que a formação de determinado lote durou.

Em média os lotes possuem 95000kg que levam aproximadamente 6 horas para serem produzidos, contudo, como já se sabia, esses dados variam. Com amostras das médias de produtividade de noventa lotes diferentes utilizou-se o *software* Minitab para

as verificações necessárias. Primeiramente foram realizados testes de normalidade com a amostra, pois essa é uma das premissas para o cálculo dos limites de controle de forma direta. O Minitab oferece três diferentes testes de normalidade, a saber: Anderson-Darling; Ryan-Joiner e Kolmogorov-Smirnov. Em todos os três a amostra confirmou sua distribuição de probabilidade como Normal. A Figura 2 ilustra esses resultados. Os valores-P dos gráficos são, respectivamente, 0,993, > 0.1 e > 0.15 .

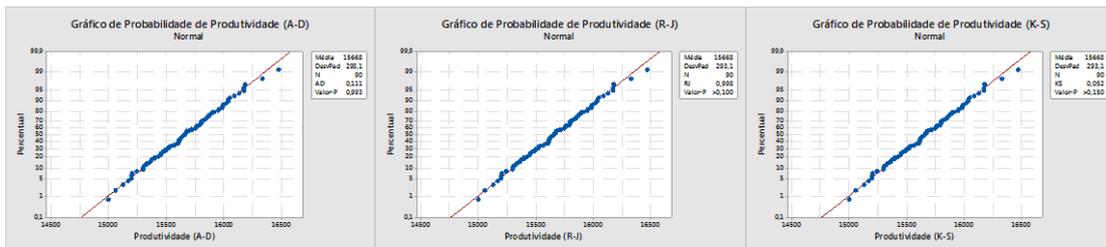


Figura 2: teste de normalidade para amostra das castas de controle

A carta de controle que foi utilizada para o estudo foi a de média e de amplitude móvel para valores individuais devido à fabricação em lotes apresentar apenas uma amostragem por subgrupo. Com o assistente do Minitab além de calcular os limites de controle pôde-se, também, verificar a ausência de autocorrelação entre os dados que, como a presença da normalidade é uma premissa para a elaboração das cartas de controle. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos na primeira corrida.

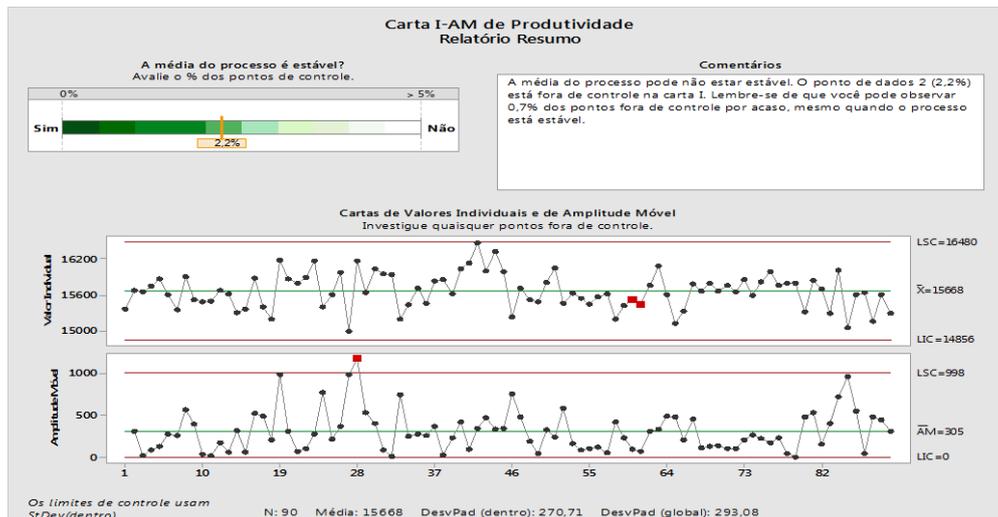


Figura 3: limites de controle calculados na primeira corrida pelo Minitab

Os pontos 28, 60 e 61 evidenciavam a presença de causas especiais. Por esse motivo, foram suprimidos da segunda corrida os pontos 28, e do 52 ao 61. Os limites de controle que foram encontrados posteriormente estão representados na Figura 4.

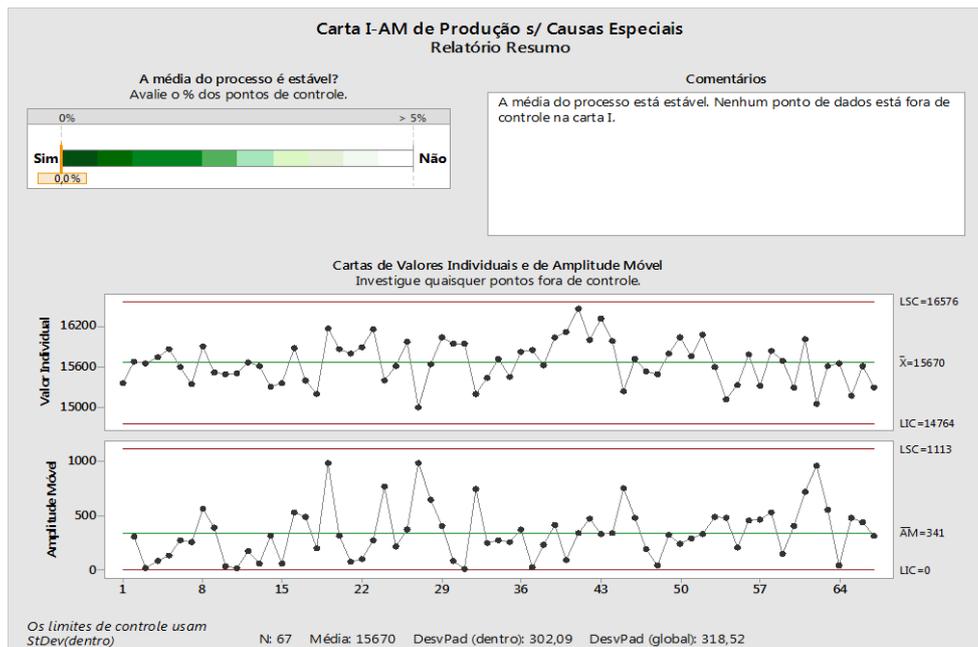


Figura 4: segunda corrida - carta de controle sem a presença de causas especiais

Foi elaborado, portanto, um documento contendo o controle da produtividade horária com o limite superior de 16.576 kg/h, média de 15.670 kg/h e limite inferior de 14.764 kg/h. A ideia é de que quando do surgimento de algum valor fora dos limites se não houver motivo aparente para o ocorrido, o processo deva sofrer alguma intervenção para o ajuste da produtividade. O documento elaborado está presente no Anexo A.

4.2. Análise de variância entre os grupos de operadores

Com a finalidade de se realizar o estudo da ANOVA para a verificação de diferenças entre as médias de produtividade horária dos grupos de operadores, a coleta de amostras deveria ser a mais representativa possível. Para tanto, foi necessário coletar amostras de lotes que foram formados pelo mesmo grupo. Geralmente, os lotes iniciam sua formação com um grupo de trabalho e terminam com outro. Esses lotes não serviriam para o estudo, pois teriam sido controlados por dois operadores diferentes. Desta forma adotou-se um critério para a coleta dos dados.

Como os horários de início de jornadas são às 00h, às 08h e às 16h, e o lote leva seis horas para sua completa produção, todos os lotes utilizados apresentavam sua formação das 02h às 08h, das 10h às 16h e das 18h às 24h. As informações puderam ser coletadas de uma planilha de controle diário onde cada lote produzido é registrado com a informação do horário de início, horário de final e quantidade ensacada real.

O Minitab informou o tamanho de amostra necessário para a quantidade de níveis que se desejava estudar. De uma amostra preliminar pôde-se obter a informação de que com trinta amostras de cada nível – cada grupo de trabalho – seria possível obter um poder de 90% nas informações obtidas. Coletou-se por tanto 150 amostras de médias de produtividade dividindo-se o ensacado real pelo tempo de formação de cada lote iniciando nos horários já descritos – trinta produzidos por cada um dos cinco grupos de operadores. O fator, portanto para os cálculos da ANOVA foi a produção média horária nos cinco níveis e cada nível compreendia um grupo de operadores.

O gráfico do poder da amostra, bem como, os gráficos dos resíduos da amostra pode ser visualizado na Figura 5.

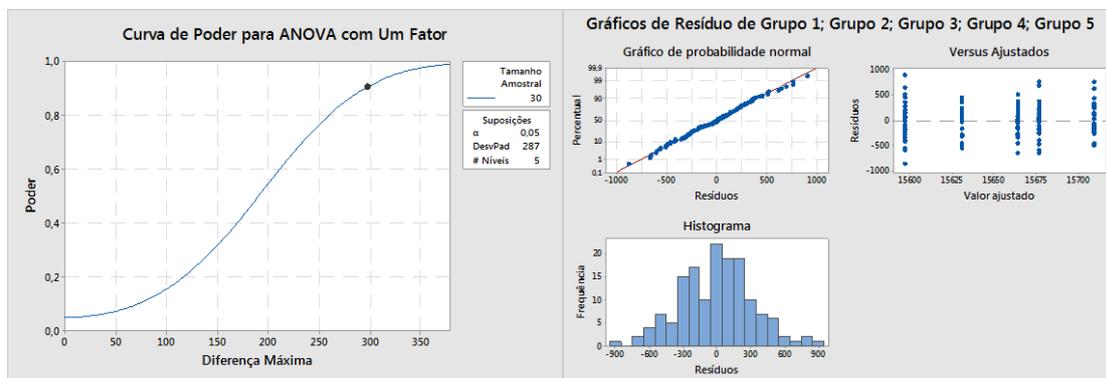


Figura 5 – Poder da amostra e Gráficos de Resíduos com teste de probabilidade normal

Outro aspecto importante que foi considerado foi a igualdade de variâncias entre os níveis estudados. O Minitab também pôde validar facilmente essa informação. Abaixo se encontra a saída do Minitab para o teste de igualdade de variâncias e a figura 6 apresenta o gráfico equivalente.

Teste de igualdade de variâncias: Grupo 1; Grupo 2; Grupo 3; Grupo 4; Grupo 5

Método

Hipótese nula Todas as variâncias são iguais

Hipótese alternativa No mínimo uma variância é diferente

Nível de significância $\alpha = 0,05$

Foi utilizado o método de Bartlett. Esse método é preciso apenas para dados normais.

Intervalos de 95% de Confiança Bonferroni para os Desvios Padrão

| Amostra | N | DesvPad | IC |
|---------|----|---------|--------------------|
| Grupo 1 | 30 | 298,502 | (222,202; 443,772) |
| Grupo 2 | 30 | 318,549 | (237,125; 473,576) |
| Grupo 3 | 30 | 264,228 | (196,688; 392,818) |
| Grupo 4 | 30 | 335,573 | (249,797; 498,884) |
| Grupo 5 | 30 | 390,883 | (290,969; 581,112) |

Nível de confiança individual = 99%

Testes

Estadística

Método de teste Valor-p
Bartlett 4,83 0,305

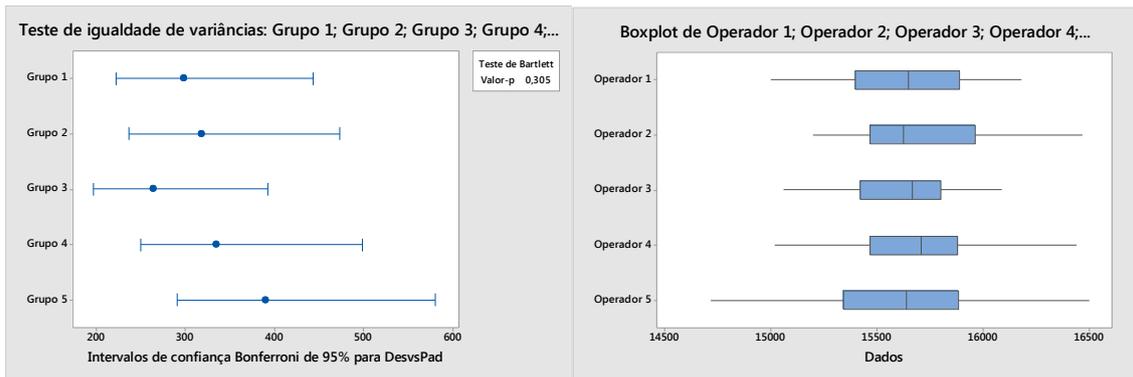


Figura 6 – Teste de igualdade de variâncias

As informações do modelo ao rodar a ANOVA no Minitab seguem abaixo:

ANOVA para 1 fator: Grupo 1; Grupo 2; Grupo 3; Grupo 4; Grupo 5

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
 Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente
 Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores
 Fator 5 Grupo 1; Grupo 2; Grupo 3; Grupo 4; Grupo 5

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------|-----|----------|----------|---------|---------|
| Fator | 4 | 223636 | 55909 | 0,53 | 0,713 |
| Erro | 145 | 15247954 | 105158 | | |
| Total | 149 | 15471590 | | | |

Considerando que o valor de significância alfa foi de 0.05, e que o Valor-P encontrado é bastante superior ao alfa, pôde-se concluir que não existem diferenças significativas entre as médias de produtividade horária dos grupos de operadores. Os boxplot dos valores dos grupos e o gráfico com os intervalos estão apresentados na Figura 7.

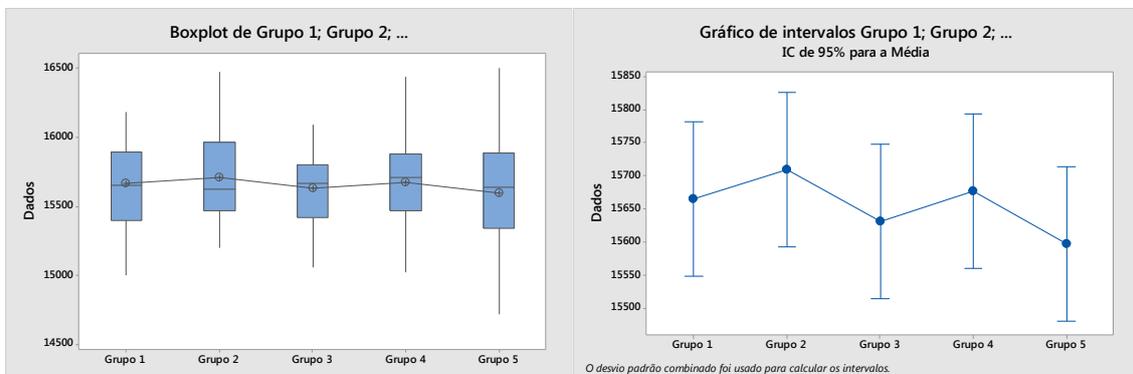


Figura 7 – Boxplot com as médias de produtividade dos grupos e gráfico de intervalos

As comparações múltiplas entre as médias cujos gráficos aparecem na Figura 8 confirmam os resultados.

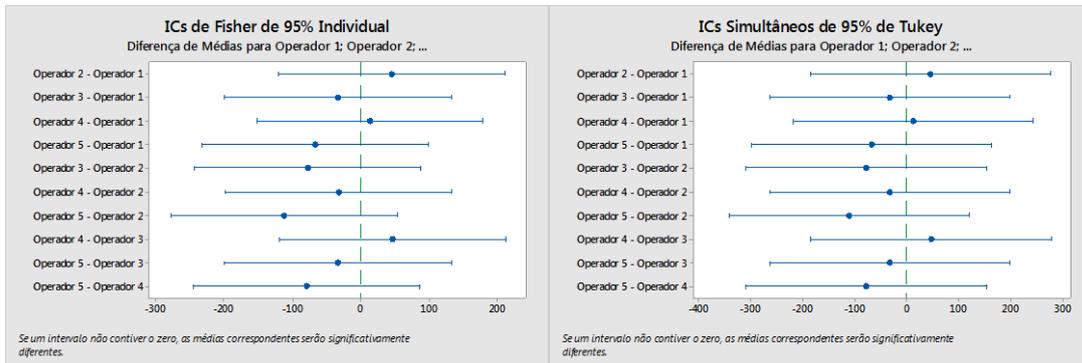


Figura 8 – Testes de Fisher e de Tukey para CMM da amostra

4.3. Planejamento de experimentos

O planejamento de experimentos desse trabalho compreendia ensaios com níveis diferentes de injeção de catalisador e de pressão no reator e verificação da produção apresentada em cada uma das situações. Para início do planejamento foi utilizado o Minitab para a elaboração do plano de ensaios. A intenção era se valer de um experimento fatorial completo a fim de estudar se algum desses fatores apresentava efeitos principais diante da produção horária e também se os dois possuíam interação entre si.

Foram definidos três níveis de pressão – 2675, 2690 e 2710 kgf/cm² – e, também, três níveis de vazão de catalisador para o reator – 4.5, 4.6 e 4.7 kg/h. Uma vez definidos os níveis, optou-se por se fazer três réplicas dos ensaios para se obter o total de três leituras de produtividade para cada combinação de níveis. De posse da ordem de ensaios, cada combinação de níveis foi testada no reator e em cada situação era realizada uma leitura da produtividade daquele momento. A Tabela 1 demonstra a relação de ensaios gerada pelo *software* e também já traz as leituras realizadas em cada um dos ensaios.

A saída do Minitab para o experimento fatorial completo foi a seguinte:

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 529845 | 66231 | 0,64 | 0,733 |
| Linear | 4 | 392183 | 98046 | 0,95 | 0,458 |
| Catalisador | 2 | 75265 | 37632 | 0,36 | 0,699 |
| Pressão | 2 | 316918 | 158459 | 1,54 | 0,242 |
| Interações de 2 fatores | 4 | 137661 | 34415 | 0,33 | 0,852 |
| Catalisador*Pressão | 4 | 137661 | 34415 | 0,33 | 0,852 |
| Erro | 18 | 1857711 | 103206 | | |
| Total | 26 | 2387556 | | | |

| Ordem | Catalisador | Pressão | Produção |
|-------|-------------|---------|----------|
| 1 | 4,5 | 2675 | 15662 |
| 2 | 4,5 | 2690 | 15804 |
| 3 | 4,5 | 2710 | 15720 |
| 4 | 4,6 | 2675 | 15592 |
| 5 | 4,6 | 2690 | 15449 |
| 6 | 4,6 | 2710 | 15666 |
| 7 | 4,7 | 2675 | 16037 |
| 8 | 4,7 | 2690 | 15598 |
| 9 | 4,7 | 2710 | 15781 |
| 10 | 4,5 | 2675 | 15662 |
| 11 | 4,5 | 2690 | 16049 |
| 12 | 4,5 | 2710 | 15777 |
| 13 | 4,6 | 2675 | 15848 |
| 14 | 4,6 | 2690 | 15795 |
| 15 | 4,6 | 2710 | 15623 |
| 16 | 4,7 | 2675 | 15859 |
| 17 | 4,7 | 2690 | 15734 |
| 18 | 4,7 | 2710 | 15509 |
| 19 | 4,5 | 2675 | 15932 |
| 20 | 4,5 | 2690 | 14408 |
| 21 | 4,5 | 2710 | 15954 |
| 22 | 4,6 | 2675 | 15850 |
| 23 | 4,6 | 2690 | 15423 |
| 24 | 4,6 | 2710 | 15625 |
| 25 | 4,7 | 2675 | 15896 |
| 26 | 4,7 | 2690 | 15714 |
| 27 | 4,7 | 2710 | 15796 |

Tabela 1 – Ensaios realizados no Processo Tubular

A Figura 9 traz as informações dos resíduos dos ensaios:

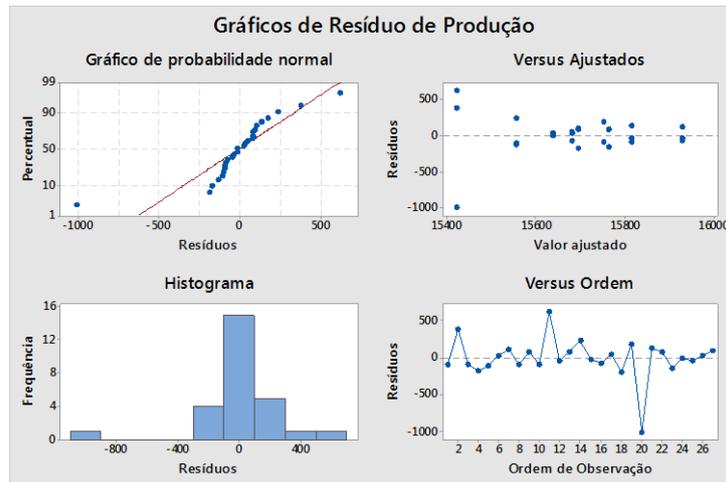


Figura 9 – Gráfico de resíduos para o planejamento de experimentos

Como se pode perceber. O experimento não apresentou efeito principal de nenhum dos dois fatores e tão pouco interação entre si. Entretanto, os gráficos de resíduo indicaram a presença de um outlier. Rodou-se, portanto o teste de outliers e foi evidenciada que a presença da leitura de número 20 – 14.408 kg/h – distorcia os

resultados. Esse dado foi suprimido para nova corrida no Minitab. A Figura 10 apresenta os testes de outliers.

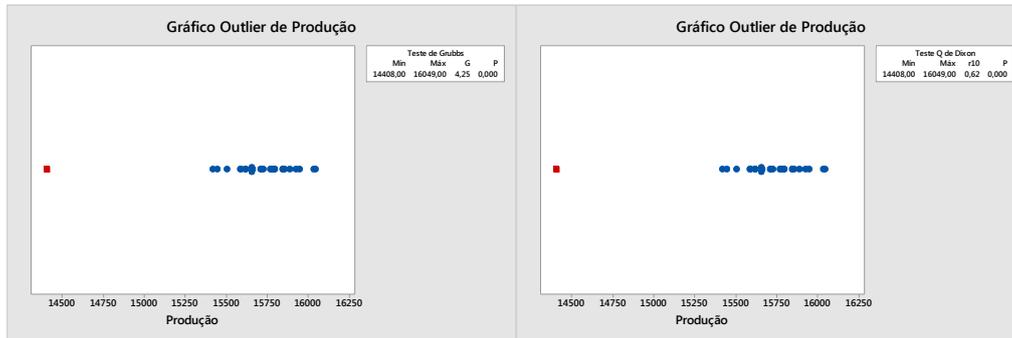


Figura 10 – Teste de outliers para os valores de produção lidos nos ensaios

Em seguida uma nova corrida foi realizada e os dados da saída do Minitab podem ser conferidos a seguir:

Análise de Variância

| Fonte | GL | SQ (Aj.) | QM (Aj.) | Valor F | Valor-P |
|-------------------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Modelo | 8 | 347195 | 43399 | 2,30 | 0,071 |
| Linear | 4 | 201948 | 50487 | 2,68 | 0,067 |
| Catalisador | 2 | 140662 | 70331 | 3,73 | 0,045 |
| Pressão | 2 | 54483 | 27241 | 1,45 | 0,263 |
| Interações de 2 fatores | 4 | 154987 | 38747 | 2,06 | 0,132 |
| Catalisador*Pressão | 4 | 154987 | 38747 | 2,06 | 0,132 |
| Erro | 17 | 320483 | 18852 | | |
| Total | 25 | 667678 | | | |

Na segunda corrida pôde-se concluir que a injeção de catalisador possui um efeito principal frente à produtividade horária, a pressão não possui efeito principal e os fatores não apresentam interação entre si. Fazendo-se uma análise do que ocorre no nível molecular da reação pode se interpretar esse resultado através do fato de a pressão aumentar a massa de gás presente no reator propiciando à produção de resina mais viscosa que dificulta o escoamento e impacta na produção. Já o catalisador eleva as temperaturas do reator diminuindo a viscosidade do produto e consequentemente aumentando a produção

5. Considerações Finais

Ferramentas estatísticas estão cada vez mais presentes no cotidiano das empresas uma vez que a qualidade é um requisito básico de qualquer produto ou processo atualmente. Através da utilização dos métodos corretos é possível transformar dados em

informações de extrema relevância que podem ser imprescindíveis quando da tomada de decisões tanto em caráter operacional quanto em caráter gerencial.

Este trabalho compreendeu a elaboração de cartas de controle, estudo de análise de variância e planejamento de experimentos para melhora da produtividade de um processo petroquímico. As cartas de controle permitirão o monitoramento contínuo da carga horária da planta de forma a evidenciar ineficiências, hoje não controladas pelos operadores de processo.

Para o estabelecimento do controle estatístico desse sistema, essas cartas deverão ser implementadas na rotina das leituras a fim de se conhecer a variabilidade da produção e possibilitar o ajuste dessa variabilidade. A análise de variância entre os grupos de operadores comprovou que não existem diferenças significativas entre as médias de produtividade horária das cinco equipes atuantes no processo o que satisfaz as condições de sua homogeneidade. Essa etapa do estudo demonstrou que é preciso estudar mais a fundo esse sistema de forma a entender o motivo do surgimento das causas especiais quando da primeira rodada das cartas de controle.

O planejamento de experimentos desempenhou um papel importante no estudo devido à relevância da informação dele obtida. Atualmente não existe uma predileção dos operadores pelo incremento de uma variável em detrimento de outra para aumento das temperaturas no reator. Percebe-se que uns preferem dosar mais catalisador ao passo que outros elevam a pressão de acordo com suas próprias teorias e conhecimentos empíricos. Essa prática não favorecia o processo, mas apenas o conforto do operador que estivesse no controle do painel naquele momento com a ideia de que manteria o processo mais estável incrementando uma e não outra variável.

O estudo permitiu entender que deve haver certa padronização dos operadores optando primeiramente pelo incremento da injeção de catalisador para elevações das temperaturas de maneira a se obter a maior produtividade possível, uma vez que essa variável apresenta efeito principal na resposta produtividade.

As sugestões de melhorias serão passadas à equipe de engenharia da empresa com intuito de suas aplicações após a inclusão das novas práticas nos procedimentos da unidade. Como sugestão de trabalhos futuros, indica-se um estudo de análise multivariada de dados que permitirá se valer de uma quantidade maior de variáveis simultâneas que não foram consideradas nesse trabalho como a pureza das matérias primas, temperatura ambiente, etc.

Referências

- Aragão, I. R. 2008. **Redução de perdas em um processo produtivo petroquímico com o uso conjunto da árvore de perdas e do seis sigma**. Dissertação do curso de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.
- Araujo, Nilo G. A.; Lindoso, Rodrigo L.; Henning, Elisa; Alves, Custódio C.; Zvirtes, Leandro. 2011. **Aplicação de gráficos de controle para monitoramento estatístico da turbidez da água potável**. Anais do XXXI Encontro Nacional da Engenharia de Produção (ENEGEP).
- Barbetta, P. A.; Reis, M. M.; Bornia, A. C. 2010. **Estatística para cursos de engenharia e informática**. São Paulo: Atlas, Terceira Edição.
- Bortolini, Juliano. 2012. **Estudo de experimento industrial 2^k aplicados em um processo industrial**. Dissertação do curso de Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária da Universidade Federal de Lavras.
- Bouyer, Gilbert C. 2011. **A linguagem como instrumento cognitivo no trabalho dos operadores de processo contínuo de produção**. Revista Produção Online, V. 11 N. 3, jul/set.
- Braskem. Site Institucional. Disponível em www.braskem.com.br, Acesso em novembro de 2013.
- Claro, Fernando A. E.; Costa, Antonio F. B.; Machado, Marcela A. G. 2007, **Gráficos de Controle de EWMA e de X para monitoramento de processos autocorrelacionados**. Produção, V. 17 N. 3, set/dez.
- Costa, F. H. M. 2011. **Crescimento, efeitos em cadeia e concentração da indústria petroquímica amazense**. T&C Amazônia n° 20.
- Faria, Evandro de Paula; Andrade, Cláudia C.; Silva, Elvis M. 2008. **O CEP como ferramenta de melhoria de qualidade e produtividade nas organizações**. Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. Anais. Rio de Janeiro.
- Grigolo, Vinicius E.; Oliveira, Gilson A. 2012. **Análise de Variância (ANOVA) em aplicações agroindustriais**. XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnologia da UTFPR.
- Hair, J. F.; Black, W. C.; Babin, B. J.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L. 2009. **Análise Multivariada de Dados**. São Paulo: Bookman, Sexta Edição.
- Montgomery, D.C. 2009. **Introdução ao Controle estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, Quarta Edição.
- Moreira Jr. F. J. 2005. **Proposta de um método para o controle estatístico de processo para observações autocorrelacionadas**. Dissertação do curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Paese, Cíntia; ten Caten, Carla; Ribeiro, José L. D. 2001. **Aplicação da análise de variância na implantação do CEP**. Revista Produção, V. 11 N. 1, nov.
- Pires, Verônica Tassinari. 2000. **Implantação do Controle Estatístico de Processos em uma empresa de manufatura de óleo de arroz**. Dissertação do curso de Mestrado em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Ramos, A. W. 2000. **CEP para processos contínuos e em bateladas**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, Primeira Edição.
- Runger, Gerge C.; Montgomery, Douglas C. 2009. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. São Paulo: LTC, Quarta Edição.
- Souza, Gueibi P.; Domingos Filho, Manoel; Samohyl, Robert W. 2007. **Aplicação dos conceitos de Controle Estatístico de Processo (CEP) em uma indústria de fundição do Norte Catarinense**. Revista Produção Online, V. 7 N. 2, ago.
- Vasconcelos, M.S.; Hora, Henrique M.; Costa, Helder G. 2012. **Controle estatístico de um processo químico contínuo: Um estudo de caso com gráfico IRM e duas variáveis de controle**. Revista Engenharia Industrial, Ano 11 N. 1.
- Vianna, H. S. 2007. **Proposta de melhoria em Sistema Gerencial de Custos de Empresa do Setor Petroquímico**. Trabalho de Conclusão de curso de Especialização. Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

