

MONITORAMENTO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DE ETANOL UTILIZANDO GRÁFICO DE CONTROLE

MONITORING OF ETHANOL DISTILLATION PROCESS USING CONTROL CHART

Vinícius Rückert Roso; Bruna Gregory Palm²; Leandro Cantorski da Rosa³
¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria/RS – Brasil
vinicius.roso@mecanica.ufsm.br
²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria/RS – Brasil
brunagpalm@gmail.com
³Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGEP
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria/RS – Brasil
leski78@hotmail.com

Resumo

O Controle Estatístico do Processo (CEP) foi aplicado na Usina Piloto de Etanol da Universidade Federal de Santa Maria, a fim de monitorar o processo de destilação de uma mistura de bebidas alcoólicas para a produção de etanol combustível. O acompanhamento das variáveis de temperatura do processo através de gráficos de controle de regressão permitiu o monitoramento do processo para controle do percentual de hidratação do etanol. Esse monitoramento, através de instrumentos de medição ou de gráficos de controle gerados instantaneamente auxilia o operador a realizar o controle da vazão de vapor inserida no reservatório, agindo diretamente no produto final. Com isso, observa-se que o etanol produzido atinge o grau de hidratação desejado, atendendo às exigências para utilização em motores de combustão.

Palavras-chave: Controle Estatístico de Processo, etanol combustível, modelo de regressão

Abstract

A Statistical Process Control were applied in the Ethanol pilot plant of Federal University of Santa Maria, monitoring the distillation process of an alcoholic mix of drinks for the production of fuel ethanol. The temperature variables monitoring, using regression control charts allows the monitor of the ethanol hydration percentage. By measuring instruments or control charts generated instantly helps the operator to carry out the control of the steam flow to the reservoir inserted, acting directly on the final product. With this, it is observed that the ethanol produced reaches the desired degree of hydration, taking into account the requirements for use in combustion engines.

Key-words: Statistical Process Control, ethanol fuel, regression model.

1. Introdução

A utilização de resíduo como matéria-prima traz soluções ambientais e ecológicas para um produto que anteriormente necessitava de intenso tratamento para ser devolvido à natureza. De acordo com Scoarize (2004), quando um material retorna para ser utilizado como matéria-prima em uma cadeia produtiva, o seu valor é inferior ao praticado pela matéria-prima original. Isto ocorre com diversos materiais, como por exemplo, a casca de arroz que pode ser utilizada como insumo na geração vapor, e desde 2011 também faz parte da realidade da Receita Federal e da Universidade Federal de Santa Maria, com o reprocessamento de bebidas alcoólicas apreendidas, gerando etanol combustível e álcool para limpeza, em diferentes graduações.

Considerando o etanol combustível, o incremento na aplicação tem sido expressivo nos últimos anos. Essa difusão ocorre devido a fatores como a capacidade de produção ser praticamente ilimitada, até mesmo se considerando que a base esteja no plantio e na colheita de biomassa, o que não ocorre com produtos derivados do petróleo. O etanol, devido ao elevado calor latente de vaporização, provoca resfriamento durante a passagem do estado líquido para vapor, sendo responsável pela redução da temperatura nos dutos de admissão e no interior do cilindro. Com isso, o incremento na densidade do ar contribui para o aumento na eficiência volumétrica. Além disso, o etanol possui maior teor de oxigênio em sua formulação química do que os combustíveis fósseis, que aliado à elevada taxa de hidrogênio por carbono, promovem uma combustão mais eficiente, gerando menor teor de emissão de material particulado.

Segundo Oliveira (2010), a aplicação de ferramentas indicadoras de desempenho tem se tornado essencial em processos industriais, sobretudo aos que exigem níveis mais rigorosos de qualidade. O monitoramento destas variáveis se torna indispensável para a tomada de decisão baseada em fatos. A identificação de causas especiais através de Controle Estatístico de Processos (CEP) apresenta-se como uma das principais ferramentas utilizadas na indústria. A definição expressa por Montgomery (2001) classifica o CEP como sendo um conjunto de técnicas de estatística aplicadas à engenharia, visando o auxílio na tomada de decisões. O presente trabalho visa coletar e analisar as variáveis componentes do processo de destilação de uma mistura de bebidas alcoólicas - composta por uísque, vodca, vinho, entre outros – a fim de se obter como produto final o etanol combustível. O intuito da análise se fortaleceu devido à inexistência de dados na literatura referentes a este processo de destilação, possibilitando assim a definição de parâmetros necessários para a melhoria do processo. Assim, estabelecidos valores ótimos em especial de temperatura para produção, um controlador eletrônico pode determinar os instantes ideais para a injeção de calor no

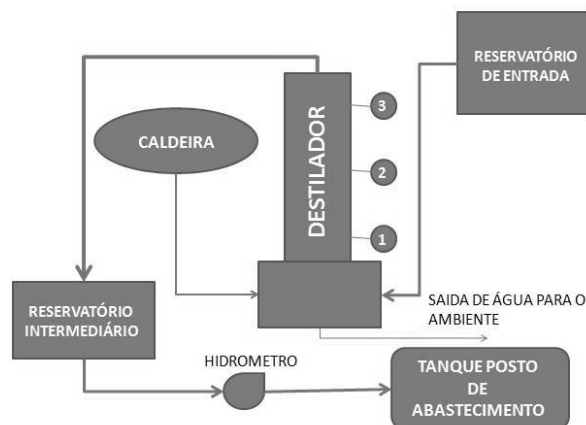
processo. Como resultado, o processo sob controle garante que o produto final apresente as mesmas características em todas as situações, podendo criar uma independência ao controle do operador.

2. Material e Métodos

2.1 O Processo

A caracterização do processo analisado difere de um processo convencional de produção de etanol, no qual em geral utiliza-se a cana de açúcar como matéria-prima. Assim, a Figura 1 apresenta o fluxograma do processo, onde o destilador recebe a mistura de bebidas oriunda do reservatório de entrada e o vapor proveniente do aquecimento da água na caldeira. Com a elevação da temperatura no destilador ocorre o início do processo de separação do álcool. Através do monitoramento de temperaturas por termopares localizados em três pontos do destilador, sendo o primeiro deles no reservatório do destilador, próximo à base, o segundo em um ponto intermediário e o terceiro na extremidade superior, próximo ao topo da torre, faz-se o controle da injeção de vapor necessária ao processo a fim de manter o nível de desidratação desejado.

Figura 1- Fluxograma da usina de etanol da UFSM



Fonte: Autoria Própria (2015)

As observações foram coletadas na Usina Piloto de Etanol da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde usualmente o processo não é realizado de modo contínuo, sendo distribuído em bateladas com quantidades menores de matéria-prima; ou seja, há a necessidade de recarregar o processo, no qual são destilados 600 litros de matéria-prima por batelada, com variação da quantidade de produto gerado de acordo com a graduação alcoólica da matéria prima. Considerando o abastecimento da caldeira com lenha como o início do processo, são necessárias aproximadamente sete horas até que todo o produto seja transferido para o tanque de abastecimento no posto, encerrando o processo. Somente após aproximadamente 2 horas e 45 minutos do início do processo o etanol começa a ser liberado ao tanque, em condições de uso como combustível, 94° GL

(94 volumes de álcool e 6 volumes de água). Após atingir o teor alcoólico desejado, as temperaturas devem ser controladas para que se mantenha constante esta relação de volumes. No processo analisado, a mistura utilizada como matéria prima apresentava 25° GL, sendo considerada uma composição forte.

2.2 O Método

A aplicação de métodos estatísticos para controle de processos é amplamente utilizada em questões industriais para detecção de problemas. Entretanto, para a viabilização do uso, a eficácia do modelo deve ser aliada a praticidade da utilização. Para a correta escolha do modelo, se torna indispensável o conhecimento das características dos dados a serem analisados. Segundo Woodall & Montgomery (1999), os gráficos de controle clássicos supõem que os dados sejam independentes e identicamente distribuídos. Contudo, Aizenchtadt et al. (2008) alegam que se esta suposição for falsa, o desempenho de gráficos de controle pode não ser satisfatório, gerando alarmes falsos e ineficácia na detecção de causas especiais.

Pelo fato de haverem outras variáveis além das estudadas que influenciam no processo, gráficos de controle de regressão se tornam uma boa alternativa para monitoramento. Também, verifica-se indicações de correlação entre as variáveis estudadas, desta forma, torna-se interessante avaliar os resíduos do modelo de regressão. Variáveis correlacionadas, analisadas separadamente podem apresentar comportamento sobre controle estatístico, porém quando o processo é avaliado como um todo pode estar fora de controle. Por isto a necessidade de avaliação integrada do processo como um todo quando as variáveis são correlacionadas (JACKSON, 1956). Desta forma, optou-se pela escolha dos gráficos de controle de regressão para monitoramento deste processo.

O gráfico de controle de regressão é baseado no ajuste de um modelo de regressão simples, o qual irá relacionar uma variável de controle e valores observados monitorados a uma característica de qualidade do processo. Esta relação será comparada aos valores ajustados pelo modelo de regressão (JACOBI et al., 2002; MANDEL, 1969). Trabalhos em diversas áreas utilizam distintas formas destes gráficos. Jacobi et al. (2002) aplicam gráficos de controle de regressão em dados de coleta de lixo na cidade de Santa Maria. Casarin et al. (2007), aplica gráficos de controle em regressão no processo de monitoramento da montagem de máquinas colheitadeiras. Pedrini & Caten (2011) monitora o processo de extrusão de bandas de rodagem de uma indústria de borrachas por meio de gráficos de controle de regressão.

O gráfico de controle de regressão considerado neste trabalho é uma melhoria ao proposto por Mandel (1969), pois possibilita a utilização de mais variáveis de controle no processo. Este gráfico foi proposto por Haworth (1996) e intitulado gráfico de controle de regressão múltipla, o

qual é baseado nos resíduos padronizados na forma Student como sendo a variável monitorada durante o processo. A linha central deste gráfico é igual à zero, que é o valor esperado para a soma dos resíduos de um modelo de regressão. Os limites de confiança são calculados baseados nas estatísticas t-Student, com nível de confiança de $1 - \alpha$, onde α é o nível de significância, e $\eta - \rho$ graus de liberdade, sendo η o tamanho amostral e ρ o número de regressores mais um. Desta forma, os limites de confiança são dados por:

$$LSC = +t_{\alpha/2, \eta - \rho}$$

$$LC = 0$$

$$LIC = -t_{\alpha/2, \eta - \rho}$$

Segundo Pedrini (2011), o gráfico de controle proposto por Haworth (1996) possui bom desempenho e baixas taxas de alarme falso, não havendo sensibilidade excessiva para a alteração de variáveis. Para os dados em estudo foi ajustado um modelo de regressão múltipla (CHAMBERS, 1992) da seguinte forma:

$$y = x\beta + \varepsilon, \text{ na qual}$$

$$y = \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{matrix} \quad X = \begin{matrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nk} \end{matrix} \quad \beta = \begin{matrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{matrix} \quad \varepsilon = \begin{matrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{matrix}$$

Mais especificamente, y é a temperatura no condensador, a temperatura no deflegmador e no destilador são as covariáveis β e ε é o erro aleatório do modelo. As análises foram realizadas por meio computacional, com o uso do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

3. Resultados

Para maior compreensão das variáveis em estudo, será apresentado primeiramente através da Tabela 1 um resumo descritivo dos dados monitorados. A variável temperatura do condensador apresentou média de 37,941 °C, variância de 18,027 °C e coeficiente de variação de 11,191 °C. A variável temperatura do deflegmador apresentou média de 54,923 °C durante o período observado, com variância de 11,339 °C e coeficiente de variação de 6,130 °C. A terceira temperatura observada corresponde ao destilador, obtendo média de 89,395 °C, variância de 22,955 °C e coeficiente de variação de 5,359 °C.

Dentre os dados adquiridos e essenciais para o controle do processo, se verificou a relação existente entre as temperaturas do condensador, do deflegmador e do destilador, coletadas nos pontos representados respectivamente por 1, 2 e 3 na Figura 1. A Tabela 2 apresenta os resultados das correlações de Spearman entre as variáveis estudadas. Realizou-se também teste para verificar a significância das correlações a um nível de 5% de significância. Verificam-se correlações significativas entre as variáveis estudadas, em função da notável sequência dos pontos coletados, sendo o ponto 1 o mais próximo da fonte de calor e o ponto 3 o mais distante. Assim, verifica-se a irradiação do calor vindo da caldeira e dissipando-se na torre do destilador. Qualquer alteração nesta sequência implicaria na variação da qualidade do produto final, sendo necessária intervenção imediata no processo.

Tabela 1 – Resumo descritivo das variáveis estudadas

Variável	Média	Mediana	Erro Padrão	Variância	Coefficiente de Variação	Mínimo	Máximo
Temperatura do Condensador (°C)	37,941	37,800	4,246	18,027	11,191	32,800	54,800
Temperatura do Deflegmador (°C)	54,923	54,750	3,367	11,339	6,130	48,800	67,400
Temperatura do Destilador (°C)	89,395	87,650	4,791	22,955	5,359	81,000	97,500

Fonte: Autoria Própria (2015)

Tabela 2 – Coeficientes de correlação entre as variáveis

	Temperatura Condensador (1)	Temperatura Deflegmador (2)	Temperatura Destilador (3)
Temperatura Condensador (1)	1	0,8136 (p-valor < 0,00)	0,4854 (p-valor < 0,05)
Temperatura Deflegmador (2)	0,8136 (p-valor < 0,00)	1	0,7305 (p-valor < 0,00)
Temperatura Destilador (3)	0,4854 (p-valor < 0,05)	0,7305 (p-valor < 0,00)	1

Fonte: Autoria Própria (2015)

A Tabela 3 apresenta os resultados para o modelo testado e as Figuras 02 e 03 apresentam um resumo dos resíduos do modelo. Verifica-se a distribuição aleatória dos resíduos na Figura 02, porém percebe-se a presença de um outlier, pois se encontra fora do limite de 3 desvios padrão. A Figura 3 evidencia graficamente comportamento normal dos resíduos.

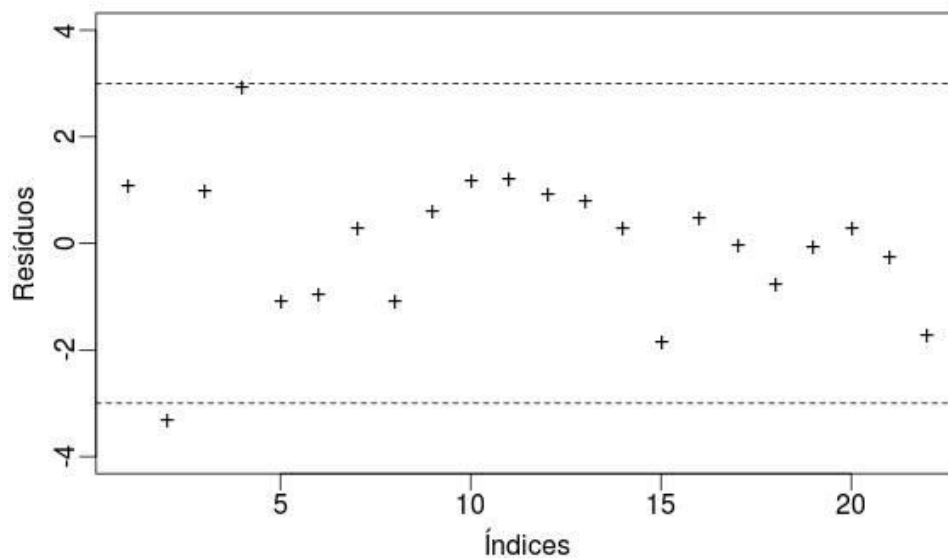
Tabela 3 – Modelo de regressão múltipla

	Estimativa	Erro padrão	p-valor
β_0	-17,7483	6,7591	<0,05
β_1	1,2332	0,0941	<0,00
β_2	-0,1348	0,0661	<0,05

Coeficiente de determinação (R^2) = 0,9015

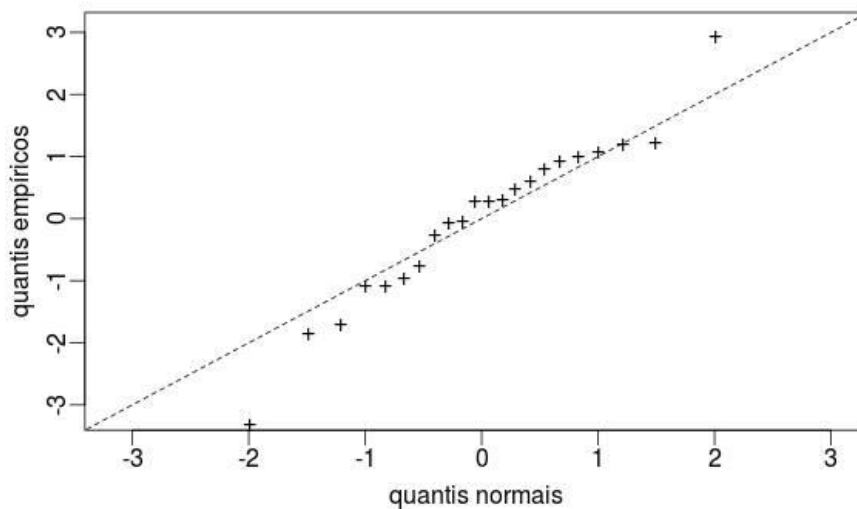
Fonte: Autoria Própria (2015)

Figura 2 – Gráfico dos resíduos *versus* Índices



Fonte: Autoria Própria (2015)

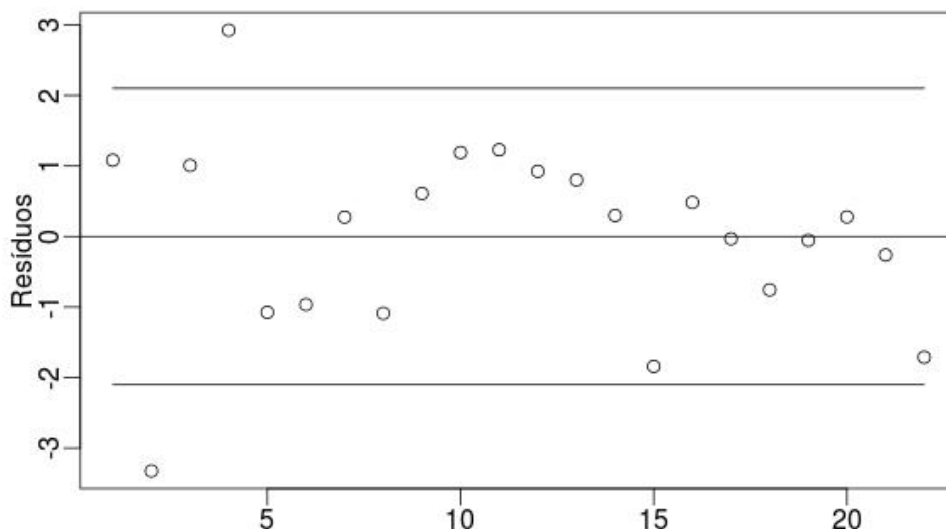
Figura 3 – Q-Q plot dos resíduos



Fonte: Autoria Própria (2015)

A Figura 4 apresenta o gráfico de controle de regressão múltipla (HAWORTH,1996) para os dados monitorados. Verifica-se a presença de dois pontos fora de controle, localizados nas observações 2 e na 4. Entretanto esta variação pode estar relacionada à instabilidade do processo, visto que ocorre na fase inicial de abertura de etanol para o reservatório.

Figura 04 – Gráfico de controle de regressão



Fonte: Autoria Própria (2015)

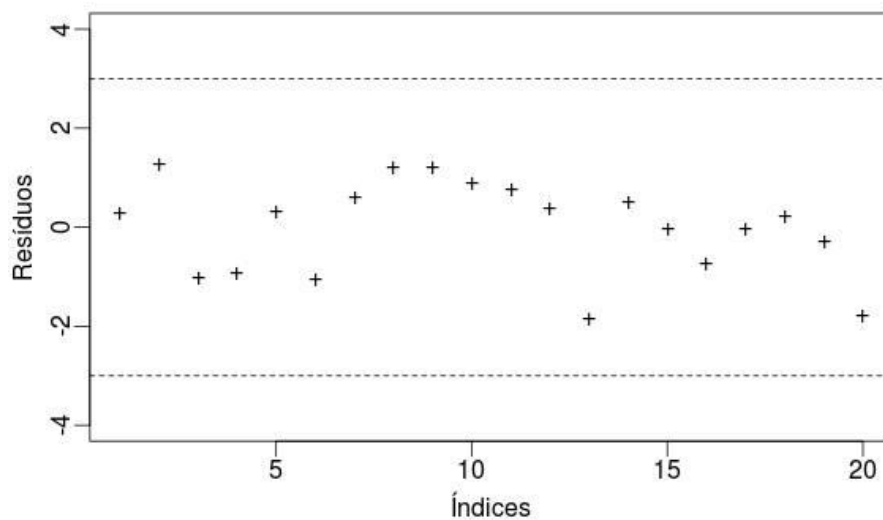
Deste modo, foi necessário desconsiderar estes pontos iniciais, realizando a retirada dos mesmos e efetuando novamente as análises. Assim, a Tabela 4 apresenta os resultados para o novo modelo ajustado sem as observações 2 e 4. As Figuras 5 e 6 apresentam graficamente o comportamento dos resíduos do modelo. Os resíduos padronizados distribuem-se aleatoriamente em torno de zero, dentro do intervalo de -3 a 3, de acordo com a Figura 5. A Figura 6 evidencia o comportamento normal dos resíduos, com os resíduos apresentando média igual a zero.

Tabela 4 – Modelo de regressão múltipla

	Estimativa	Erro padrão	p-valor
β_0	-20,4341	5,2799	<0,05
β_1	1,2960	0,073	<0,00
β_2	-0,1432	0,048	<0,05
Coeficiente de determinação (R^2) = 0,9488			

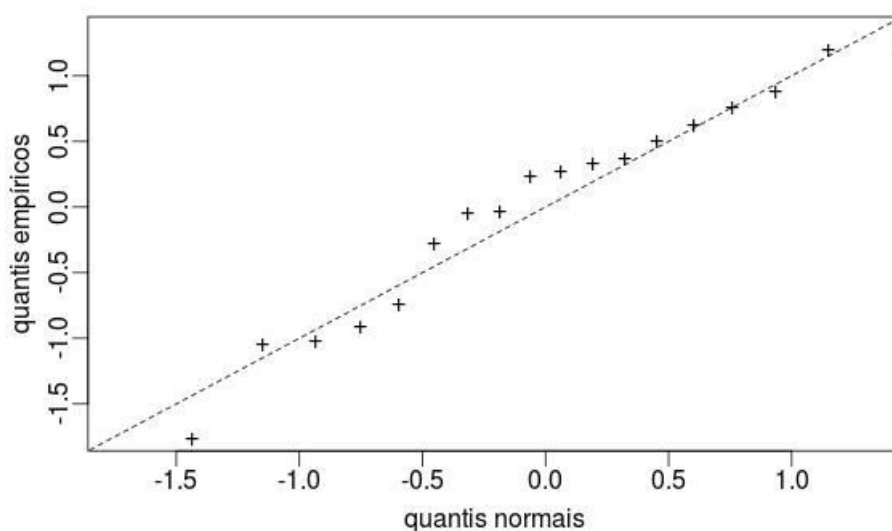
Fonte: Autoria Própria (2015)

Figura 5 - Gráfico dos resíduos *versus* Índices



Fonte: Aatoria Própria (2015)

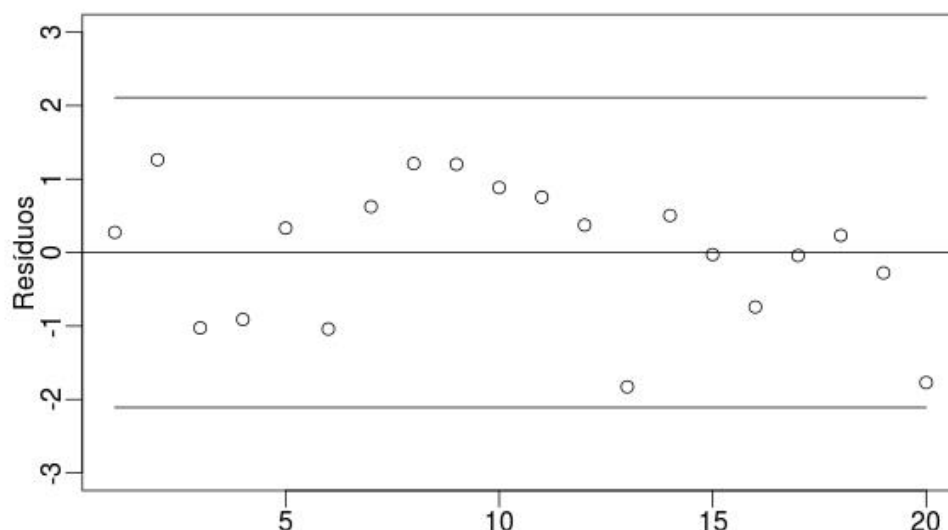
Figura 6 - Q-Q plot dos resíduos



Fonte: Aatoria Própria (2015)

O gráfico de controle de regressão múltipla para os dados monitorados é apresentado pela Figura 7. Observa-se neste caso que não há pontos fora dos limites de controle e os resíduos estão distribuídos de forma aleatória em torno de zero, não havendo sete pontos consecutivos em um mesmo lado da linha central do gráfico, o que caracteriza o processo como sob controle (ROSA, 2009). Este resultado está de acordo com o que se espera, uma vez que o ponto inferior (ponto 1 é o ponto de maior proximidade do local que recebe o calor oriundo da caldeira. Os pontos subsequentes (2 e 3), estão à distância superiores, respectivamente.

Figura 7 - Gráfico de controle de regressão



Fonte: Autoria Própria (2015)

3 Conclusão

A realização da coleta de dados para monitoramento de um processo de destilação de bebidas na usina piloto de etanol da UFSM é inédito até então, e de extrema importância para o levantamento de uma série de variáveis. Com o acompanhamento do processo em uma batelada, coletaram-se as variáveis existentes no processo, ressaltando as que influenciariam na qualidade do produto final. Com isso, tomaram-se para análise três temperaturas em diferentes pontos da torre de destilação, aplicando nestes dados um modelo de regressão múltipla em função da constatação de correlação entre as variáveis. O objetivo da aplicação deste modelo é a elaboração de um gráfico de controle para monitoramento do processo. Observaram-se dois pontos além dos limites de controle, fato ligado à instabilidade inicial do processo. Retirando estes dois valores, executou-se novamente o modelo, evidenciando o processo estar sob controle.

Desta forma, garante-se que o produto final, no caso o etanol combustível, está sendo produzido com o percentual de hidratação necessário para utilização em motores. Como perspectiva está a análise do impacto do percentual de destilação no custo de produção do etanol. Assim, gráficos de controle de regressão tornam-se uma ferramenta estatística interessante para controle do processo de produção etanol, uma vez que se espera temperaturas crescentes do ponto 1 ao 3. Qualquer diferenciação nesse aspecto, pode representar erros do instrumento de medição ou algum tipo de interferência no processo. A constância dos dados observados garante que o produto final esteja com a mesma qualidade durante a totalidade do processo.

Referências

- AIZENCHATADT, E.; INGMAN, D.; FRIEDLER, E. 2008. "Quality control of wastewater treatment: a new approach." **European Journal of Operations Research**, v. 189, p. 445-458, sep/2008. ISSN: 0377-2217.
- CASARIN, V. A.; SOUZA, A. M.; BOHM, S. I. H.; JACOBI, L. F. 2007. "Aplicação de gráficos de controle de regressão no monitoramento do processo de montagem de colheitadeiras." **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Foz do Iguaçu, Brasil.
- CHAMBERS, J. M. (1992). "Statistical Models in S" eds, Ed. J. M. Chambers and T. J. Hastie, Wadsworth & Brooks/Cole, Pacific Grove, California, ISBN 978-0412830402.
- HAWORTH, D. A. 1996. "Regression control chart to manage software maintenance". **Journal of Software Maintenance**, v. 8, n. 1, p. 35-48. ISSN: 1532-0618
- JACKSON, J. E. 1956. "Quality control methods for two related variables". **Industrial Quality Control**, v. 12, n. 7, p. 4-8.
- JACOBI, L. F.; SOUZA, A. M.; PEREIRA, J. E. S. 2002. "Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos". **Revista Produção**, v. 12, n. 1, p. 46-59. ISSN: 1676-1901.
- MANDEL, B. J. 1969. "The regression control chart". **Journal of Quality Technology**, v. 1, n. 1, p. 1-9. ISSN 0022-4065.
- MONTGOMERY, D. C. 2001. "Introduction to statistical quality control". 4ª Ed. New York: John Wiley. ISBN-13: 978-1118146811
- OLIVEIRA, T. S. 2010. "Aplicação do controle estatístico de processo na mensuração da variabilidade em uma usina de etanol". **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP**.
- PEDRINI, D. C. 2011. "Método para aplicação de gráficos de controle de regressão no monitoramento de processos". **Revista Produção**, v. 21, n. 1, p. 106-117, jan./mar. 2011. ISSN 0103-6513
- R Development Core Team. 2014. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0.
- ROSA, L. C. 2009. "Introdução ao controle estatístico de processos". Santa Maria, Ed. Da UFSM,. 152p.: il.; 21 cm.
- SCOARIZE, R; SILVA, R. 2004. "Transformando resíduos em matéria-prima". **III Seminário do Centro de Ciências Sociais Aplicadas**. Cascavel-PR, outubro de 2004.
- WOODALL, W. H.; MONTGOMERY, D. C.. 1999. "Research issues and ideas in statistical process control". **Journal of Quality Technology**, v. 31, n. 4, p. 376-386. ISSN, 0022-4065.

Recebido: 02/06/2015

Aprovado: 21/03/2017