

## **Aplicação do controle estatístico de processo na mensuração da variabilidade em uma usina de etanol**

Tiago Soares Oliveira <toliveira.00@gmail.com>

Rafael Henrique Palma Lima <rhlima@sc.usp.br>

*Este trabalho através de pesquisa-ação tem como objetivo mostrar uma aplicação de ferramentas do Controle Estatístico de Processos na produção de etanol em uma usina brasileira. O processo produtivo da usina foi modelado e um conjunto de variáveis da qualidade foi identificado nas fases de preparo do mosto e fermentação. Após isso, amostras foram coletadas para cada uma dessas variáveis, de forma a calcular os limites de controle e os índices de capacidade do processo (Cpk). Com base nessas informações, a usina pode identificar as áreas de sua produção que apresentaram maior variabilidade. A técnica de brainstorming foi empregada com os funcionários da usina para identificar as possíveis causas de variação nas variáveis estudadas. Dessa forma, a contribuição deste trabalho advém da identificação de variáveis da qualidade importantes na produção de etanol e da determinação das possíveis causas que levam à sua variação.*

*Palavras-chave: Controle Estatístico de Processos; Gestão da Qualidade; Indústria Sucroenergética; Etanol.*

## **Application of statistical process control to measure the variability in an ethanol plant**

*This paper discusses the implementation of Statistical Process Control tools in an ethanol plant using action research. The plant's productive system was modeled in a flowchart, so as to identify areas that required statistical control. A set of variables were devised and initial samples were collected to determine their levels of variability, as well as the process capacity index (Cpk). Based on these data, the plant was able to discover which productive areas showed greater variability. Brainstorming techniques involving operational employees were then used to seek out the root causes of variation. The main contribution of this paper is the identification of quality variables that can be replicated in other ethanol plants and the presentation of an empirical method to identify the causes of variation.*

*Keywords: Statistical Process Control; Quality Management; Sugar-Ethanol Industry;*

### **1. Introdução**

Atualmente é muito comum encontrar no meio industrial inúmeras aplicações de indicadores de desempenho, sobretudo indicadores ligados a aspectos da qualidade. O monitoramento e análise dessas variáveis da qualidade vêm se provando cada vez mais indispensáveis para a tomada de decisão baseada em fatos. Para tal finalidade, o Controle Estatístico de Processos (CEP) tem se mostrado de grande valor na identificação de causas especiais de variação em processos produtivos e na determinação de quando ações de melhoria devem ser iniciadas (CAULCUTT, 1996).

Segundo Soares (2001), um dos fatores que influenciou a disseminação da qualidade nas empresas foi o programa de certificação nas normas ISO 9000, que se tornou exigência de diversos clientes. Para Soares (2001), as atualizações da série ISO 9000 vêm dando cada vez mais importância ao controle da qualidade pela aplicação de ferramentas estatísticas.

A qualidade é um tema que tem ganhado cada vez mais atenção no setor sucroenergético. Segundo Baccarin (2005), o setor teve que se atentar à qualidade dos seus produtos a fim de diminuir os custos de produção e conseqüentemente se tornar mais competitivo. O autor explica que isso foi motivado pelo fim do amparo público ao complexo sucroenergético, que desde então era concedida pelo Programa Nacional do Alcool (Proálcool). Concomitantemente, as condições do mercado de açúcar e etanol passaram a influenciar decisivamente na receita do complexo.

Bomfim (2005) cita a importância de assegurar a qualidade do processo e do etanol através da aplicação de ferramentas do CEP. O autor estudou e implantou ferramentas estatísticas no processo produtivo de etanol em uma usina. Ele faz referência às dificuldades em monitorar as variáveis do processo em virtude das grandes variações do processo acarretadas pela qualidade da matéria prima, a cana-de-açúcar, que é altamente dependente dos fatores climáticos. Bomfim (2005) conclui que a implantação do CEP em uma usina de açúcar e etanol poderia ser feita a custos relativamente baixos e que isso poderia trazer ganhos como redução de custos e menores variações na produção.

Outra justificativa para a melhoria da qualidade no setor vem do âmbito econômico. De acordo com Corrêa (2009), somando-se todas as demandas do ano de 2009, o setor precisaria expandir 8,74% em relação ao ano anterior. Isso implica em investimentos da ordem de US\$ 4 bilhões. Para garantir esse sucesso vivido pelo setor sucroenergético é que surge a necessidade de assegurar a qualidade dos processos e produtos através de monitoramentos e análises estatísticas.

Considerando o contexto exposto anteriormente, este trabalho tem como objetivo apresentar uma aplicação real de ferramentas estatísticas para monitorar a produção de etanol. Nesse sentido, este trabalho mostra como foram estimados os índices de variabilidade de variáveis da qualidade identificadas ao longo do processo produtivo. Também é objetivo deste trabalho apontar algumas causas que levam à variação em cada uma das variáveis identificadas.

## **2. Método de pesquisa**

Esta pesquisa foi conduzida com a participação ativa de um de seus autores. Dessa forma, o método aplicado neste trabalho pode ser classificado como uma pesquisa ação, que, de acordo com Gil (2006), é realizado em estreita associação com uma ação, na qual o pesquisador representativo da situação está envolvido de modo participativo, associando pesquisa e ação para resolução de um determinado problema. A pesquisa foi realizada de acordo com as seis etapas descritas a seguir:

- Etapa 1 – Pesquisa bibliográfica: nesta etapa foi feita a revisão bibliográfica sobre conceitos básicos de CEP e gráficos de controle. Em seguida foram estudados os gráficos de amplitude móvel e de observação individual, além do índice Cpk de capacidade do processo;
- Etapa 2 – Identificação das variáveis a serem controladas: o processo de produção da usina foi analisado para identificar quais variáveis da qualidade deveriam ser monitoradas pelas ferramentas do CEP;

- Etapa 3 – Coleta de dados: as amostras iniciais foram coletadas para calcular os limites de controle e índices de capacidade. Tais amostras foram retiradas dos boletins diários preenchidos pelos analistas de laboratório, que são os responsáveis pela coleta e análise de diversos aspectos da qualidade ao longo do processo;
- Etapa 4 – Cálculo dos limites de controle e índice Cpk: após a coleta dos dados, os limites de controle para os gráficos de observações individuais e amplitude móvel foram calculados, juntamente com os índices de capacidade Cpk para cada variável da qualidade;
- Etapa 5 – Discussão sobre a variabilidade no processo: os limites de controle e índices de variabilidade foram discutidos, de forma a apontar quão estável está cada etapa do processo;
- Etapa 6 – Apontamento das causas de variação no processo: com base na discussão da Etapa 5 e em informações obtidas por um brainstorming realizado com os funcionários da empresa foram apontadas as possíveis causas para a variação no processo.

### **3. Referencial teórico**

Nesta fase do trabalho foi revisada a literatura especializada sobre os fundamentos do CEP, e sobre os gráficos de observação individual (X) e de amplitude móvel (MR). O referencial teórico também abordou a capacidade de processos e cálculo do índice Cpk.

#### **3.1. Controle Estatístico de Processo**

De acordo com Samohyl (2005), o CEP ajuda a minimizar a variabilidade do processo de produção, maximizando a qualidade final do produto pela redução de custos em função de amostragem e redução de rejeitos. O CEP possui ferramentas para monitoramento e melhoria de processo. No contexto do CEP, a qualidade está diretamente ligada à variabilidade do processo. Para o autor, qualidade é a conformidade às especificações e se traduz para o CEP em fazer corretamente repetidas vezes as tarefas necessárias e usando material de qualidade consistente para conseguir resultados do processo de produção que refletem o desejo do consumidor.

Para Costa et al. (2005), todo processo, independentemente da forma como é gerido, possui perturbações. Segundo Montgomery (2001) as perturbações podem ser:

- Causas aleatórias ou comuns da variação: são inerentes ao processo, mesmo que este esteja sob controle estatístico. O processo pode absorvê-las sem gerar produtos defeituosos. Um processo que possui apenas causas aleatórias é considerado sob controle;
- Causas atribuíveis ou especiais da variação: possuem fontes de variação muito maiores do que a variabilidade natural, sendo porém, identificáveis. As causas atribuíveis devem ser evitadas por gerarem defeitos e o processo que as contem é considerado fora de controle.

#### **3.2. Gráficos de Controle**

Os gráficos de controle são usados para analisar e monitorar o comportamento de variáveis e atributos da qualidade. O monitoramento e análise são realizados observando os valores obtidos de amostras em relação aos limites de controle.

##### *3.2.1 Conceito e Interpretação de Gráficos de Controle*

De acordo com Montgomery (2001) os gráficos de controle foram originalmente propostos em 1924 por W. A. Shewhart, com a intenção de eliminar variações atribuíveis. Quando os valores excediam os limites de controle, o processo era considerado fora de controle.

Segundo Vieira (1999), os gráficos de controle exibem três linhas paralelas denominadas Limite Superior de Controle (LSC), Linha Média (LM) e Limite Inferior de Controle (LIC). Os valores obtidos através da análise da amostra colhida é plotado no gráfico, sendo que quando há flutuação não aleatória, a tendência é que os pontos vão além dos limites de controle, indicando que o processo está fora de controle.

Para Montgomery (2001), as flutuações ou padrões não aleatórios também indicam processo fora de controle. Para o autor, o processo está fora de controle se:

- Um ponto se localiza fora dos limites de controle três sigma;
- Dois, em três pontos consecutivos, se localizam além dos limites de alerta de dois-sigma;
- Quatro, em cinco pontos consecutivos, se localizam além a uma distância de um sigma ou mais em relação à linha central;
- Oito pontos consecutivos se localizam de um mesmo lado da linha central.

O uso mais importante do gráfico de controle é melhorar o processo. O uso rotineiro e atento dos gráficos de controle ajudará a identificar causas atribuíveis. Para Montgomery (2001), se essas causas puderem ser eliminadas do processo, a variabilidade será reduzida e o processo melhorará. Para Xie e Goh (1999), o CEP apenas fornece dados estatísticos sobre o processo, sendo papel dos engenheiros ou gestores interpretar os resultados e definir quais ações serão tomadas.

### 3.2.2 Gráficos de observações individuais e amplitude móvel ou gráficos de X e MR.

De acordo com Costa *et al.* (2005), os gráficos de X e MR, são utilizados em casos em que as amostras são de tamanho  $n = 1$ . A linha média para o gráfico de X é a média  $\bar{X}$  do processo (valor-alvo ou estimativa da média em controle do processo). Os limites de controle distam três vezes o desvio padrão do processo estimado pela constante  $d_2$  com  $n = 2$ . Geralmente os gráficos de X e MR são utilizados em processos automatizados, nos quais ocorre inspeção de 100% da produção, ou em processos onde a taxa de produção é baixa. As etapas para construção dos gráficos são as seguintes:

- Escolher a característica da qualidade a ser controlada;
- Coletar  $m$  amostras de observações individuais ( $n = 1$ );
- Calcular a média geral, representada pelo símbolo  $\bar{X}$ ;

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

- Calcular a média das amplitudes móveis (MR);

$$MR_i = |x_i - x_{i-1}| \quad i=2,3,\dots,m$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=2}^m MR_i}{m-1}$$

- Calcular os limites de controle;

Gráfico X:

$$LSC = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$
$$LM = \bar{x}$$

$$LIC = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

Gráfico MR:

$$LSC = D_4 \overline{MR}$$

$$LM = \overline{MR}$$

$$LIC = D_3 \overline{MR}$$

Onde  $d_2 = 1,128$ ;  $D_3 = 0$ ; e  $D_4 = 3,267$ ; (VIEIRA, 1999).

- Analisar os pontos nos gráficos, verificar se há padrões não aleatórios ou pontos fora de controle. Caso haja pontos fora de controle, estes devem ser excluídos e os limites dos gráficos recalculados. É necessário repetir este procedimento até que todos os pontos estejam sob controle;
- Se o estado de controle alcançado não for adequado, melhorias devem ser realizadas até atingir o nível de qualidade desejado;
- Caso o controle alcançado for adequado, os gráficos podem ser adotados para o controle atual e futuro do processo.

### 3.3 Capacidade do Processo

De acordo com Soares (2003), o estudo da capacidade do processo tem por função avaliar se um processo estável é capaz de satisfazer o nível de qualidade almejado pelos clientes, enquanto que gráficos de controle são ferramentas para avaliação da estabilidade de um processo. Segundo Vieira (1999), o cálculo da capacidade do processo tem validade apenas em processos que estão em estado de controle estatístico.

Uma maneira de analisar um processo estável é através do cálculo da capacidade do processo. Segundo Costa et al. (2005), os índices de capacidade de processo (ICPs) medem o quanto o processo atende às especificações. Para grande parte dos índices, quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às especificações. O Cpk é calculado pela fórmula a seguir:

$$C_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3 \cdot \sigma}; - \left( \frac{\mu - LIE}{3 \cdot \sigma} \right) \right\}$$

De acordo com Montgomery (2001), quanto maior for o valor do ICP, melhor o processo estará atendendo às especificações. A Tabela 1 mostra a interpretação do índice Cpk.

$C_{pk}$	Interpretação	Ações pertinentes
$C_{pk} \geq 2,0$	Processo excelente, altamente confiável	Os operadores têm perfeito controle do processo
$1,33 \leq C_{pk} \leq 2,0$	Processo capaz, relativamente confiável	Os operadores têm que monitorar para evitar deterioração
$1,00 \leq C_{pk} \leq 1,3$	Processo relativamente incapaz, pouco confiável	Exige dos operadores controle contínuo
$0 \leq C_{pk} \leq 1,0$	Processo incapaz, podemos ter produção defeituosa	Exige dos operadores controle de 100% da produção
$C_{pk} \leq 0$	Processo totalmente incapaz, não tem condições de manter as especificações	

Fonte: Adaptado dos índices  $C_{pk}$  do modelo de Soares (2001)

Tabela 1 - Índice de capacidade Cpk

#### 4. Aplicação do CEP na usina de etanol

Esta seção trata da aplicação do CEP em uma usina sucroalcooleira e está organizado da seguinte forma: primeiramente é caracterizado o processo de produção do etanol; em seguida são apresentadas as variáveis do processo que serão controladas pelo CEP e por fim é feita a análise das variáveis.

##### 4.1. Fluxograma do processo de produção do etanol

A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de produção do etanol, construído a fim de mostrar de forma simples e abrangente todo o processo produtivo, desenhado com base em visitas na empresa estudada. Nas subseções seguintes são descritas as etapas do processo.

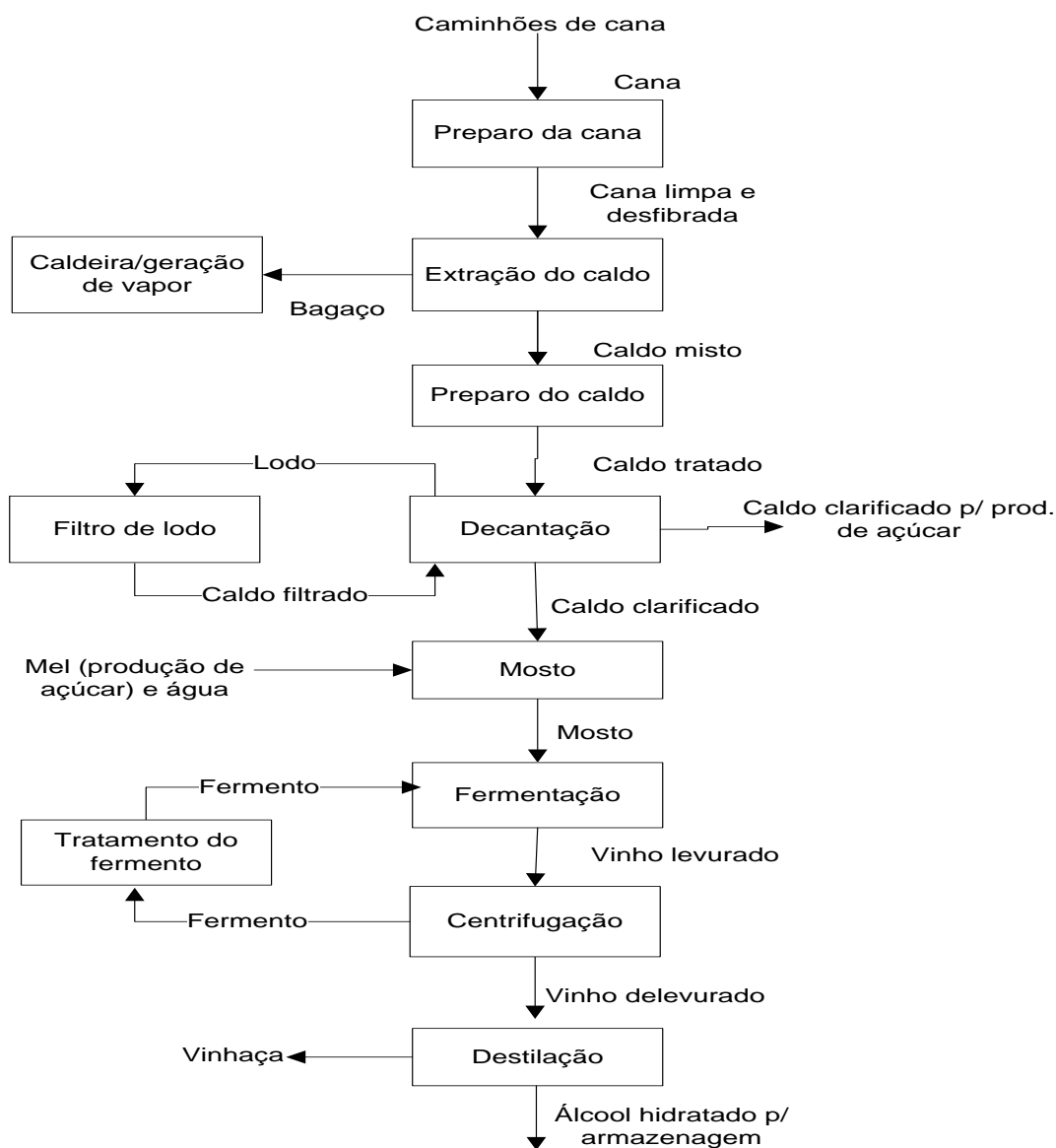


Figura 1 - Fluxograma do processo de produção de etanol

#### *4.1.1 Preparo da cana*

A primeira fase do processamento da cana é o descarregamento. Os caminhões são descarregados na mesa alimentadora e a cana é colocada diretamente no processo. Em seguida a cana cai na esteira, onde é cortada e desfibrada para reduzir os colmos até conseguir uma carga uniforme e de maior densidade que alimenta o primeiro terno de moendas.

#### *4.1.2 Extração do caldo*

Na usina estudada, a extração do caldo ocorre em 6 níveis consecutivos, chamados de ternos. A partir do segundo nível, a cana que veio do primeiro terno é embebida com o caldo oriundo do terno subsequente até chegar ao último terno, que é embebido com água. O objetivo da embebição é diluir o caldo remanescente e aumentar a extração deste.

#### *4.1.3 Preparo de caldo*

O preparo de caldo é um processo de grande importância para se obter um produto final de qualidade, pois é nesta fase do processo que se realiza a purificação do caldo, retirando deste as matérias estranhas solúveis e insolúveis. É nesta fase do processo que ocorre o peneiramento, sulfitação, calagem e decantação.

#### *4.1.4 Preparo do mosto*

O mosto é uma solução de açúcar com concentração ajustada de forma a facilitar sua fermentação. É constituído por uma mistura de caldo e mel final proveniente do processo de obtenção do açúcar. Na usina estudada, a concentração brix é determinada em função do tempo de fermentação, podendo chegar até 26° brix. Quando o brix do mosto está acima do desejado, a solução é diluída com água.

#### *4.1.5 Tratamento do fermento*

No processo de fermentação alcoólica utilizado na empresa em estudo, as leveduras são recuperadas pela centrifugação do vinho que as contém. O vinho levedurado entra na centrífuga que separa o vinho delevedurado, enviado para a dorna volante, do leite de levedura. O tratamento da levedura consiste em adicionar água e ácido sulfúrico até que o pH atinja 2,5 ou 2, conforme necessidade de eliminar alguma infecção bacteriana.

#### *4.1.6 Fermentação*

A fermentação alcoólica é o processo de transformação do açúcar em etanol por ação das leveduras e ocorre em condições de anaerobiose, ou seja, em ausência de oxigênio livre. O leite de levedura é colocado nas dornas e em seguida as leveduras passam a ser alimentadas com o mosto.

Após o término da fermentação, o então chamado vinho levedurado é centrifugado e passa a ser chamado de vinho delevedurado. As leveduras são enviadas para o processo de tratamento e o vinho delevedurado é enviado para a dorna volante, espécie de pulmão onde fica até ser bombeado para as colunas de destilação.

#### *4.1.7 Destilação*

A destilação consiste na separação de líquidos através de seus diferentes pontos de ebulição. À pressão normal, o etanol evapora-se a 78,3°C, enquanto que a água entra em ebulição a 100°C (nível do mar). Isso faz com que o etanol possa ser separado da água.

O vinho delevedurado possui em sua composição de 7 a 12° GL (Gay Lussacy em % de volume) de etanol, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. Na

empresa em estudo, a separação do etanol destes outros materiais é realizada com o auxílio de três colunas de destilação. Nas colunas, o etanol é separado do vinho delevurado e sai com a flegma, vapores entre 40 a 50° GL.

O resultado do processo de destilação é o etanol hidratado com 96°GL, podendo ser comercializado como etanol carburante, utilizado nos automóveis leves. O volume de etanol produzido é medido por hidrômetros e em tanques calibrados. Em seguida ele é encaminhado para tanques onde é estocado até a comercialização e retirada por caminhões.

#### 4.2. Variáveis controladas

Após a avaliação integral do processo de fabricação de etanol usado pela usina, foi possível constatar que as fases de preparo do mosto e fermentação são as que têm maior impacto na produtividade do etanol, e conseqüentemente nos resultados financeiros da empresa. Nesse sentido, foram identificadas as variáveis que indicam o nível de qualidade em cada uma dessas fases. A Tabela 2 descreve em detalhes as variáveis que foram abordadas neste trabalho, juntamente com suas unidades de medida, frequência de coleta, valores-alvo e limites de especificação. As subseções a seguir descrevem detalhadamente cada uma das variáveis.

Etapa	Variável	Frequência	Valor-alvo	Limites Inferior de especificação (LIE)	Limites Superior de especificação (LSE)	Gráfico
Preparo do Mosto	Brix do mosto (%)	6h	24	16	Não tem	Amplitudes móveis
Fermentação	Viabilidade celular na dorna (%)	2h	70	60	100	Amplitudes móveis
Fermentação	Tempo de fermentação (h)	-	8	4	12	Amplitudes móveis
Fermentação	Temperatura do vinho em fermentação (°C)	1h	33	32	34	Amplitudes móveis
Fermentação	Teor alcoólico do vinho (°GL)	4h	10	8	Não tem	Amplitudes móveis
Fermentação	Eficiência da fermentação (%)	diário	80	60	100	Amplitudes móveis

Tabela 2 - Esboço das variáveis controladas pelo CEP

##### 4.2.1 Brix do mosto

Brix do mosto é a quantidade de sólidos solúveis aparentes contidos no mosto. O brix é uma das variáveis utilizadas para calcular a eficiência da fermentação. Na usina estudada, a concentração brix é determinada com base na qualidade da fermentação, mais precisamente na velocidade de fermentação. Busca-se encontrar um ponto de equilíbrio, pois tanto o excesso quanto a falta de açúcar durante o processo impacta diretamente na eficiência da fermentação.

##### 4.2.2 Viabilidade celular na dorna

Como o próprio nome já diz, o principal objetivo do cálculo da viabilidade celular é representar em porcentagem as células viáveis, ou seja, as que estão saudáveis e podem ser reutilizadas no processo de fermentação. Esse controle é feito a fim de monitorar a qualidade das células, pois quando a viabilidade celular está abaixo do normal, isso indica uma possível



infecção na dorna. Em tais casos, a dorna deve ser tratada rapidamente, pois isso afeta diretamente a produção do etanol.

#### 4.2.3 Tempo de fermentação

O tempo de fermentação é cronometrado a fim de saber quanto tempo foi gasto para terminar o processo de fermentação. É através do tempo de fermentação que os operadores julgam a qualidade do fermento em processo, podendo inclusive aumentar ou diminuir o grau brix do mosto.

#### 4.2.4 Temperatura do vinho em fermentação

As leveduras utilizadas no processo de fermentação são extremamente sensíveis a baixas ou altas temperaturas. Em virtude dessa sensibilidade é necessário medir a temperatura do vinho que está em processo fermentativo, pois temperaturas baixas retardam o processo fermentativo e temperaturas altas matam as leveduras e causam perdas por evaporação alcoólica.

#### 4.2.5 Teor alcoólico do vinho

O teor alcoólico do vinho deleiturado é analisado para que se saiba o grau alcoólico do vinho fermentado. Posteriormente, esse valor é utilizado para calcular a eficiência da destilação e da fermentação.

#### 4.2.6 Eficiência da fermentação

O objetivo da eficiência da fermentação é indicar como está o processo de fermentação, informando se a quantidade de etanol produzida na dorna é a esperada.

### 4.3. Limites de controle e índice C<sub>pk</sub>

Tanto o gráfico de X quanto o gráfico MR foram utilizados na análise das variáveis mostradas na Tabela 2, tendo em vista que não é possível formar subgrupos com as amostras coletadas no processo de produção do etanol. Os dados foram coletados e mensurados de acordo com as frequências e unidades de medida indicadas na Tabela 2. Vale ressaltar que a coleta de dados sofreu algumas interrupções, devido a chuvas e paradas de equipamentos. Os dados foram coletados dos boletins diários informados pelos analistas de laboratório da empresa estudada. O número de amostras coletadas para cada variável pode ser visto na Tabela 3. Tais amostras foram usadas para calcular os limites de controle e o índice C<sub>pk</sub> da capacidade do processo, conforme apresentados na Tabela 3.

Variável	Nº Amostras	Gráfico X			Gráfico MR			C <sub>pk</sub>	PFE
		LSC	LM	LIC	LSC	LM	LIC		
Brix do mosto (%)	40	26,50	22,77	19,04	4,59	1,40	0	1,82	2,58E-08
Viabilidade celular na dorna (%)	26	83,19	68,75	54,31	17,74	5,43	0	0,61	0,03450
Tempo de fermentação (hrs)	78	11,38	7,95	4,51	4,23	1,29	0	1,15	0,00049
Temperatura do vinho em fermentação (°C)	264	40,46	34,90	29,34	6,83	2,09	0	0	0,74550
Teor alcoólico do vinho (°GL)	163	10,93	9,24	7,56	2,07	0,63	0	0,73	0,01351
Eficiência da fermentação (%)	53	120,43	87,56	54,70	40,40	12,35	0	0,84	0,00600

Tabela 3 - Limites de controle e índice C<sub>pk</sub>

## **5. Discussão dos resultados**

Nesta seção discutimos os resultados apresentados na Tabela 3, avaliando criticamente os limites de controle e o índice de Cpk em função dos limites de especificação. Outro ponto tratado na Tabela 3 é a porcentagem esperada de amostras fora de especificação (PFE), calculada com base na estimativa de dispersão de cada variável e tomando como pressuposto que as variáveis seguem a distribuição normal de probabilidade. As subseções a seguir dizem respeito a cada uma das variáveis da Tabela 3, tratando tanto dos resultados numéricos quanto das possíveis causas de variação.

### **5.1 Brix do Mosto**

Durante o cálculo dos limites de controle, um ponto foi encontrado fora de controle, o que pode ser um indício de instabilidade no processo. O cálculo do Cpk foi baseado no LIE e mostrou que o processo está confiável. Caso o processo se mantenha estável, são esperados  $2,57 \times 10^{-8}$  dos pontos abaixo do LIC.

Na usina estudada, a concentração brix é determinada com base na qualidade da fermentação, mais precisamente na velocidade de fermentação. Por isso, quanto menor for o tempo gasto na fermentação maior será o brix do mosto. Portanto, partindo do princípio de que a operação do processo de concentração e aplicação do mosto esteja correta, o controle do brix do mosto depende da reação do processo de fermentação, com isso não existe limite superior de especificação.

### **5.2 Viabilidade celular na dorna**

Como todas as amostras coletadas ficaram dentro dos limites de controle, isto é um indício de que o processo está estável. Para o cálculo do Cpk foi utilizado o LIE, pois subentende-se que o processo não pode apresentar uma viabilidade maior que 100%. O Cpk indicou uma baixa capacidade do processo. Caso o processo permaneça com os mesmos índices de variabilidade, a porcentagem esperada de pontos abaixo da especificação é de 3,45%

Os principais fatores que podem afetar a viabilidade celular na dorna em fermentação são temperaturas impróprias ou infecção bacteriana. Contudo, a técnica de brainstorming não foi suficiente para se chegar à causa raiz do problema que está causando o aumento da temperatura. A empresa necessita, portanto, de um estudo mais aprofundado sobre as causas desse problema, que afeta diretamente a viabilidade celular.

### **5.3 Tempo de fermentação**

O processo parece estar estável e sua média está próxima do valor-alvo. Além disso, durante o cálculo dos limites de controle, nenhum ponto esteve fora dos limites. O cálculo do Cpk mostrou que o processo está razoavelmente capaz e a porcentagem de amostras fora de especificação é de aproximadamente 0,049% ou seja, 490 pontos fora dos limites de especificação à cada 1 milhão de amostras.

Em se tratando de tempo, do ponto de vista da empresa estudada, o baixo tempo de fermentação é considerado como um ponto positivo, pois torna possível fermentar uma quantidade maior de vinho por dia.

### **5.4 Temperatura do vinho em fermentação**

A temperatura em fermentação apresenta vários indícios de instabilidade. Primeiramente, durante o cálculo dos limites, 6 pontos estiveram fora de controle. Outro fator

que leva à instabilidade é a média da variável estar acima do limite superior de sua especificação. Como consequência disso, o Cpk para esta variável é zero e a porcentagem de pontos esperados fora de controle é de 74,54%.

A temperatura fora dos limites de especificação pode levar à morte das células de levedura e reduzir a viabilidade celular. Após o brainstorming com a equipe, foi possível verificar que os principais fatores que levam ao aumento da temperatura do vinho em fermentação são a falta de mais uma resfriadeira e a falta de atenção dos operadores.

### 5.5 Teor alcoólico do vinho delevurado

A variável teor alcoólico possui uma média abaixo do valor alvo e, consequentemente, há uma probabilidade maior de que as amostras estejam abaixo do LIE. Durante o cálculo dos limites de controle, 3 pontos que estiveram fora dos limites e foram retirados para recalculá-los os limites de controle.

Levando em consideração que o teor alcoólico é a concentração de etanol no vinho delevurado, subentende-se que quanto maior o teor, mais produtivo é o processo. Portanto, não existe limite superior de especificação para esta variável. Sendo assim, o Cpk é calculado com base no LIE. Pode-se dizer que o processo é incapaz, pois apresentou Cpk de aproximadamente 0,74. Com o cálculo do PFE, espera-se 1,35% das amostras abaixo do LIE.

Há um deslocamento da média do processo, fazendo com que o mesmo fique próximo do LIE. O motivo de as amostras de teor alcoólico estarem próximas do LIE pode estar ligadas ao processo de fermentação. É necessário um estudo mais aprofundado para determinar com maior precisão as causas de tal desvio.

### 5.6 Eficiência

Após a coleta das amostras iniciais, o cálculo dos limites de controle resultou em 2 pontos fora dos limites. Com a remoção dos pontos fora de controle os limites foram recalculados. Como o processo não tem limite superior de especificação, já que é impossível ter mais do que 100% de eficiência, o Cpk foi calculado em função do LIE, chegando no valor 0,84. Isso indica que o processo é incapaz de produzir com a eficiência determinada nos limites de especificação.

Um potencial causador da alta variação nesta variável seriam as interrupções da produção, que podem ser causadas pela chuva, falta de matéria-prima ou equipamentos danificados. Por isso, é importante que a empresa invista na manutenção de seus equipamentos e também aperfeiçoe seu processo logístico ligado ao tempo de corte até extração, principalmente em períodos chuvosos, pois a cana depois de cortada deve ser moída em até 48 horas.

## 6. Conclusão

Este trabalho apresentou uma aplicação de ferramentas do Controle Estatístico de Processo (CEP) ao processo de produção de etanol. Para este fim, o processo produtivo foi analisado para identificar as variáveis que mais afetam a produtividade da usina. Nesse sentido, foi determinado que o preparo do mosto e a fermentação são as fases do processo que mais têm influência na produtividade. Portanto, a aplicação de gráficos de controle e cálculo da capacidade do processo se iniciaram em variáveis da qualidade oriundas dessas fases.

Com base na análise dos dados coletados, pode-se concluir que o processo da usina como um todo está com um alto índice de variabilidade. Das seis variáveis analisadas, quatro apresentaram um índice Cpk inferior a 1 (um), o que indica que as fases de produção da usina

estão obtendo frequentemente resultados fora da especificação. O caso mais grave constatado foi o da temperatura do vinho em fermentação, para o qual o índice de capacidade resultou em zero. Uma baixa capacidade nesta variável pode ter um impacto significativo na produtividade da usina, uma vez que altas temperaturas podem matar as leveduras e diminuir a viabilidade celular. Isso pode ter causado os baixos índices de capacidade para a viabilidade celular na dorna, teor alcoólico do vinho e eficiência da fermentação.

De fato, a aplicação do CEP em si não é suficiente para melhorar o processo produtivo. Mas para o caso da usina, a realização deste trabalho possibilitou a identificação das áreas que necessitam de melhoria. Com base nos dados, pode-se determinar, por meio de brainstorming com os funcionários, as causas de variabilidade no processo. Esse é o primeiro passo para o delineamento de ações de melhoria. Os limites de controle encontrados neste trabalho reforçam a necessidade de melhorar ainda mais o processo como um todo antes de colocar os gráficos de controle em prática. Em outras palavras, antes de usar os gráficos de controle, é necessário conduzir ações de melhoria para tentar reduzir ao máximo a variabilidade do processo, de forma a obter melhores limites de controle. Para melhorar o processo, sugere-se a aplicação de ferramentas como o diagrama de causa e efeito ou FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) na identificação de problemas e oportunidades de melhoria. Caso a empresa opte por seguir esse caminho, investimentos deverão ser feitos na atualização, manutenção ou até mesmo troca de equipamentos, além de capacitação do pessoal no uso de técnicas estatísticas.

#### Referências

- BACCARIN, J. G.** *A desregulamentação e o desempenho do complexo sucroenergético no Brasil*. São Carlos. Dissertação de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- BOMFIM, O. S.** *Controle estatístico do processo aplicado a produção de etanol*. Rede Metrológica de Alagoas, Maceió, 2005.
- CAULCUTT, R.** *Statistical process control (SPC)*. Assembly Automation, Vol. 16, No. 4, pp. 10-14, 1996.
- CORRÊA, A. L.** *Gangorra no setor sucroenergético*. Jornal Valor Econômico. Abril.2009.
- COSTA, A. F. B; EPPRECHT, E. K. & CARPINETTI, L.C.R.** *Controle Estatístico de Qualidade*. 2º Ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- GIL, A. C.** *Como Elaborar Projeto de Pesquisa*. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- MONTGOMERY, D. C.** *Introduction to statistical quality control*. 4ª Ed. New York: John Wiley, 2001.
- SAMOHYL, R. W; GILIOLI, R; CARVALHO, M. C; BOUER, G; FERREIR, J. J. A; PALADINI, E. P & MIGUEL, P. A. C.** *Gestão da Qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- SOARES V. L. M. P.** *Aplicação e implantação do controle estatístico de processo em pintura industrial*. Florianópolis, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- SOARES, G. M. V. P.** *Aplicação do controle estatístico de processos em indústria de bebidas: Um estudo de caso*. Florianópolis. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- VIEIRA S.** *Estatística para a Qualidade*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1999.
- XIE, M.; GOH, T.N.** *Statistical techniques for quality*. The TQM Magazine Vol. 1, n. 4, p. 238-241, 1999.