

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

CARLOS EDUARDO CASARINI

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO E LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE DE
PROCESSOS E EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

São Carlos

2024

CARLOS EDUARDO CASARINI

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO E LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE DE
PROCESSOS E EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Química, Universidade Federal de
São Carlos - UFSCar, para obtenção do título
de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni
Horta

São Carlos

2024

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO E LÓGICA FUZZY PARA CONTROLE DE PROCESSOS E EQUIPAMENTOS DA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Trabalho de curso de graduação apresentado à
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar,
para obtenção do título de Engenharia Química.

Aprovado em 10/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.º Dr.º Antonio Carlos Luperni Horta
Orientador - UFSCar

Prof.º Dr.º Fabio Bentes Freire
Membro 1 - UFSCar

Prof.º Dr.º Ruy de Sousa Júnior
Membro 2 - UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que sempre esteve ao meu lado durante toda esta jornada acadêmica. Agradeço também ao meu falecido pai, Paulo, que sempre me amou e me orientou a estudar, sei que está feliz pelo momento que estou vivendo. Agradeço de forma especial a minha mãe, Renata, mulher que sempre batalhou e venceu em todos os seus desafios e nunca me deixou desanimar por nem que fosse um segundo, me garantindo amor e muita educação.

À minha amada Isabela Araujo cujas mãos seguraram as minhas nos momentos de dúvida e cujos olhos brilharam de orgulho em cada conquista. Obrigado por dividir a vida comigo.

À minha família, meu avô Benedito, minha avó Maria das Graças, e especialmente minha tia Flávia que sempre me ajuda nos momentos que mais preciso. Também a meu primo Thiago Rafael e minha tia Raquel por sempre estarem ao meu lado.

E também aos meus professores e colegas de curso que em cada momento que compartilhamos deixaram um pedacinho de vocês em mim, me inspirando e incentivando a cada vez mais crescer e me desenvolver, especialmente agradeço aos professores que compõem esta banca examinadora, Fabio e Ruy. Agradeço também ao grande professor Kaká, professor que abriu muitas portas e me mostrou o mundo que eu vinha procurando encontrar ao me comprometer a estudar neste curso. Obrigado por aceitar ser meu orientador e por ter sido meu professor, você tem minha mais profunda admiração e respeito.

Gostaria também de agradecer a empresa Pentagro, na pessoa de André Lins que me apoiou a escrever este artigo e me abriu enormes oportunidades de trilhar minha carreira profissional com muito aprendizado e dedicação.

Por fim, gostaria de dedicar este trabalho ao meu pai *In Memoriam*, que não pode estar comigo nesta etapa, mas tenho certeza que sempre esteve em seus sonhos. Obrigado pai.

DEDICATÓRIA

“Não é a força, mas a perseverança que realiza grandes coisas.” - Samuel Johnson.
Agradeço a todos que me apoiaram e me encorajaram a perseverar, mesmo nas dificuldades. Sem vocês, este trabalho não teria sido possível.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do controle avançado de processos na padronização da concentração de açúcar durante o preparo do mosto fermentativo na indústria sucroenergética. O estudo comparou o controle tradicional com um sistema de controle avançado, utilizando um software específico para modelar o processo e o controle. Foram analisados dois cenários distintos: um com a presença de caldo clarificado e outro utilizando exclusivamente água e melaço. A metodologia incluiu a coleta de dados utilizando um densímetro para medir a densidade do mosto e a análise estatística dos dados com um software apropriado. Os resultados mostraram que o controle avançado proporcionou uma redução significativa na variabilidade da concentração de açúcar em ambos os cenários analisados. O controle avançado resultou em uma maior precisão na manutenção do valor desejado da concentração de açúcar, comparado ao controle tradicional, que apresentou maior variabilidade e valores fora do limite estipulado. Conclui-se que o controle avançado melhora a precisão e a consistência do preparo do mosto fermentativo, mostrando-se mais eficiente do que o controle tradicional. A redução da variabilidade e a amplitude dos valores analisados destacam o impacto positivo da aplicação de controle avançado na automação de processos industriais. Recomenda-se a continuidade das pesquisas e a exploração de outros processos relacionados para promover avanços tecnológicos na indústria sucroenergética.

Palavras-chave: Controle avançado de processo; lógica fuzzy; indústria 4.0; preparo mosto; automação industrial; análise estatística.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the impact of advanced process control on the standardization of sugar concentration during the preparation of fermentative must in the sugar and ethanol industry. The study compared traditional control with an advanced control system, using specific software to model the process and control. Two distinct scenarios were analyzed: one with the presence of clarified juice and another using only water and molasses. The methodology included data collection using a densimeter to measure the must density and statistical analysis of the data with appropriate software. The results showed that advanced control provided a significant reduction in the variability of sugar concentration in both scenarios analyzed. Advanced control led to greater accuracy in maintaining the desired sugar concentration compared to traditional control, which exhibited higher variability and values outside the stipulated limits. It is concluded that advanced control enhances the accuracy and consistency of fermentable wort preparation, proving to be more efficient than traditional control. The reduction in variability and range of analyzed values underscores the positive impact of applying advanced control in industrial process automation. Continued research and exploration of related processes are recommended to promote technological advances in the sugar and ethanol industry.

Keywords: Advanced process control; fuzzy logic; industry 4.0; must preparation; industrial automation; statistical analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados EVEREST Ativo CC.....	30
Tabela 2 – Resultados EVEREST Desabilitado CC.....	30
Tabela 3 – Resultados EVEREST Ativo SC.....	36
Tabela 4 – Resultados EVEREST Desabilitado SC.....	36
Tabela 5 – Operação Preparo do Mosto Com Caldo Clarificado, Melaço e Água EVEREST Ativado.....	46
Tabela 6 – Operação Preparo do Mosto Com Caldo Clarificado, Melaço e Água EVEREST Desativado.....	46
Tabela 7 – Operação Preparo do Mosto Sem Caldo Clarificado, Apenas Melaço e Água EVEREST Ativado.....	47
Tabela 8 – Operação Preparo do Mosto Sem Caldo Clarificado, Apenas Melaço e Água EVEREST Desativado.....	47

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração comparativa: Lógica Clássica x Lógica Fuzzy.....	17
Figura 2 – Ilustração Função de Pertinência de um Processo.	18
Figura 3 – Fluxograma Implementação Fuzzy, onde: Lógica Fuzzy atua na transição entre nível numérico e linguístico para regras e inferências serem aplicadas.	18
Figura 4 – Estrutura da Cana-de-açúcar.	19
Figura 5 – Composição da Cana-de-açúcar, g/100g (%peso/peso).	20
Figura 6 – Esquema da modelagem de °brix do Mosto.....	26
Figura 7 – Informações de Configuração das correntes.	27
Figura 8 – Acoplamento dos Módulos de Controle.....	29
Figura 9 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST ON CC.	31
Figura 10 – Boxplot do °brix EVEREST ON CC.	32
Figura 11 – Teste de Capacidade do EVEREST ON CC.	32
Figura 12 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST OFF CC.	33
Figura 13 – Boxplot do °brix EVEREST OFF CC.....	34
Figura 14 – Teste de Capacidade do EVEREST OFF CC.	34
Figura 15 – Teste de Desvio padrão para EVEREST ON/OFF.	35
Figura 16 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST ON SC.....	37
Figura 17 – Boxplot do °brix EVEREST ON SC.....	37
Figura 18 – Teste de Capacidade do EVEREST ON SC.	38
Figura 19 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST OFF SC.	39
Figura 20 – Boxplot do °brix EVEREST OFF SC.	39
Figura 21 – Teste de Capacidade do EVEREST OFF SC.....	40
Figura 22 – Teste de Desvio padrão para EVEREST ON/OFF.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APC	–	Advanced Process Control
ART	–	Açúcares Redutores Totais
ATP	–	Adenosina Trifosfato
ATR	–	Açúcares Totais Recuperáveis
CC	–	Com Clarificado
CLP	–	Controladores Lógicos Programáveis
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
C ₂ H ₆ O	–	Etanol
IoT	–	Internet of Things
JTT	–	Juice Dillution Tank
LIE	–	Limite Inferior de Especificação
LSE	–	Limite Superior de Especificação
MIMO	–	Multiple Input Multiple Output
MISO	–	Multiple Input Single Output
pH	–	pH
PID	–	Proporcional Integral Derivativo
SC	–	Sem Clarificado
SP	–	SetPoint
SISO	–	Single Input Single Output
TIC	–	Tecnologias da Informação e Comunicação
VC	–	Variável Controlada
VD	–	Variável Distúrbio
VM	–	Variável Manipulada
VP	–	Variável de Processo
°Brix	–	Grau Brix
°Gl	–	Grau Gay-Lussac

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 OBJETIVOS.....	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 CONTROLE DE PROCESSOS.....	13
3.2 CONTROLES CONVENCIONAIS.....	14
3.3 CONTROLE AUTOMÁTICO CONVENCIONAL.....	15
3.4 LÓGICA FUZZY.....	16
3.5 PREPARO DO MOSTO.....	19
3.6 MEL FINAL DE CANA-AÇÚCAR OU MELAÇO.....	20
3.7 O MOSTO.....	21
3.7.1 COMPOSIÇÃO DO MOSTO.....	21
3.8 FERMENTAÇÃO ETANÓLICA.....	22
3.9 INDÚSTRIA 4.0.....	23
3.10 CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS.....	24
3.11 O SIMULADOR PENTAGRO.....	24
4 METODOLOGIA.....	25
4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO.....	25
4.2 COLETA DE DADOS.....	29
5 RESULTADOS.....	30
5.1 CLARIFICADO, MELAÇO E ÁGUA.....	30
5.2 MELAÇO E ÁGUA.....	36
6 CONCLUSÃO.....	41
6.1 SUGESTÃO PARA TEMAS FUTUROS.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
Apêndice A.....	46

1 INTRODUÇÃO

A indústria moderna vem, paulatinamente, se adequando às novas tecnologias desenvolvidas pela sociedade. O impacto dessas mudanças na rotina operacional chegou a um ponto de integração em que, na maioria dos níveis industriais, observa-se um elevado nível tecnológico. Novas tecnologias substituem gradativamente a participação humana nas operações industriais. Assim, componentes eletrônicos foram incorporados a máquinas, controladores lógicos programáveis (CLP) e robôs, além das Tecnologias da Informação e Comunicação TIC, que são responsáveis por integrar processos, máquinas e pessoas (DIEESE, 1994). O próximo passo para a indústria alcançar patamares ainda mais elevados se evidencia dentro do contexto da “Indústria 4.0”, termo também conhecido como quarta revolução industrial, manufatura inteligente, indústria da internet ou indústria integrada (HOFMANN e RÜSCH, 2017).

A modelagem para simulação de processos em ambiente computacional é uma tendência que reforça, dentro da indústria, aspectos de qualidade e segurança operacional. À medida que se torna possível simular operações unitárias cada vez mais representativas da realidade, favorece-se o treinamento de operadores e engenheiros, além de contribuir para a padronização das operações, em conformidade com o rigor das práticas de segurança de processos (SWUSTE et al., 2016).

A simulação de processos utiliza modelos computacionais para gerar informações semelhantes às obtidas diretamente na análise de diferentes operações unitárias de uma planta industrial. Dessa forma, é possível analisar diversos cenários operacionais para avaliar e definir quais variáveis de processo mais afetam os resultados esperados de um bom funcionamento das operações integradas.

Com a simulação modular sequencial, o software de propriedade da empresa Pentagro (Simulador Pentagro) permite representar integradamente toda uma planta industrial dos setores sucroenergético, cítrico e de uma planta de etanol a partir do milho, abrangendo desde as operações unitárias envolvidas na chegada da matéria-prima até o balanço de consumo e tratamento térmico da água utilizada nos processos industriais.

Utilizando valores chave definidos para um bom cenário operacional, os resultados da simulação fornecem uma visualização de como deve ser idealmente o comportamento de uma

unidade produtiva em seu estado estacionário. Com base nessas informações, é possível inferir e interpretar oscilações para mitigar adequadamente as perturbações reais da planta, como, por exemplo, a identificação de ineficiências em determinadas etapas do processo, cujas variáveis não estão aderentes às esperadas pelo resultado da simulação.

Dando continuidade ao visto anteriormente, as simulações operacionais ideais podem ser integradas à comunicação do sistema de automação industrial para possibilitar, em tempo real, a definição de parâmetros para atuação em alguns cenários chave do processo. A empresa Pentagro fornece esse tipo de serviço através do Software Pentagro Everest, que pode atuar diretamente na planta para ajustar o processo de forma mais próxima do comportamento indicado pelos parâmetros operacionais. Essa solução utiliza três tecnologias principais independentes: simulação, lógica fuzzy e otimização em tempo real. Atuando como controle de processos, essa solução integra informações da unidade industrial e utiliza as variáveis de processos (VPs) para inferir, de acordo com a interpretação da lógica de controle, quais valores devem ser executados na planta pelas variáveis manipuladas (VMs) para alcançar ganhos operacionais em termos de estabilidade e produção.

Para esta análise, o caso escolhido foi o controle de preparo do mosto fermentativo, que se refere à etapa de regulação da quantidade de açúcares redutores totais disponíveis para a fermentação, visando à produção de etanol secretado pelas células adicionadas na etapa fermentativa. Neste trabalho, foram abordados os itens de simulação e lógica fuzzy. O item de otimização em tempo real, também desenvolvido pela Pentagro, não se aplica aos controles propostos para este estudo de caso.

2 OBJETIVOS

Avaliar de forma estatística o comportamento identificado de um controle tradicional comparando-o com controle avançado que utiliza lógica fuzzy e simulação de processos.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar o estudo de caso da implementação de controles avançados no preparo do mosto fermentativo;

- Compreender melhor a operação unitária industrial referente ao preparo do mosto fermentativo;
- Avaliar o desempenho da implementação do sistema;
- Breve contribuição para o avanço da indústria 4.0.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho. Informações a respeito do entendimento da lógica fuzzy, o processo de preparação do mosto fermentativo bem como sua importância para a produção de etanol e a aplicação de controle avançado nesta operação. São analisados também aspectos a respeito da instrumentação envolvida neste tipo de controle de processo.

3.1 CONTROLE DE PROCESSOS

O controle de processos desempenha um papel fundamental no desenvolvimento industrial, uma vez que contribui para o aumento da produção, melhoria da qualidade e uniformidade do produto final. Controlar um processo implica intervir sobre o próprio processo ou sobre as condições às quais este está submetido, com o objetivo de alcançar metas específicas, como manter a pressão ou a temperatura em valores pré-determinados, conhecidos como set points, assim preservando o processo em condições operacionais com segurança e eficiência, satisfazendo requisitos ambientais e de qualidade de produto (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2004).

De acordo com Smith e Corripio (1997), alguns termos e conceitos são essenciais para a compreensão de sistemas de controle de processos:

- **Variável Controlada (VC):** Refere-se à variável que se deseja manter em um determinado valor. Exemplos comuns incluem pressão, temperatura, nível, pH e concentração.
- **Variável de Processo (VP):** É o valor real medido da variável no processo em um dado momento, podendo também ser referida como a própria variável controlada.

- **Set Point (SP):** Denota o valor desejado para a variável de processo. Por exemplo, se um trocador de calor de mosto precisa manter a temperatura em $32,5^{\circ}\text{C}$, este será o set point a ser alcançado e mantido pelo sistema de controle.
- **Variável Manipulada (VM):** É a grandeza que pode ser ajustada para assegurar que a VP permaneça no valor especificado pelo SP.
- **Variável de Distúrbio (VD):** São variáveis que interferem na VP, desviando-a do set point e causando possíveis instabilidades no processo.
- **Erro (Offset):** Corresponde à diferença entre a VP e o SP, podendo ser positivo ou negativo. O objetivo principal de qualquer sistema de controle é minimizar ou eliminar este erro.
- **Perturbações:** São alterações inevitáveis em qualquer processo, podendo ser classificadas em perturbações de carga, que afetam diretamente a VP, e mudanças no set point, que ocorrem quando o valor desejado para a VP é alterado.
- **Sistema em Malha Aberta:** Caracteriza-se pela ausência de realimentação da saída para a entrada do sistema, tornando-o menos adaptável a mudanças e distúrbios.
- **Sistema em Malha Fechada:** Possui uma conexão entre a saída e a entrada por meio de realimentação, permitindo um controle mais preciso e adaptativo diante de variações e distúrbios no processo.

3.2 CONTROLES CONVENCIONAIS

Os controles convencionais de forma geral são comumente um sistema de entrada e saída único, conhecido como SISO (Single Input, Single Output), e geralmente utiliza-se em malhas de controle proporcional-integral-Derivativa (PID) com o objetivo de estabilizar o processo, rejeitando distúrbios. Neste contexto, a variável controlada é monitorada e seu set point pode ser utilizado como grau de liberdade em camadas superiores de controle. É importante evitar o uso de variáveis manipuladas que possam saturar durante a operação, pois

isso pode resultar na perda de controle e exigir uma reconfiguração das malhas (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 2006).

Conforme destacado na literatura de controle de processos, uma boa variável de controle secundária deve atender a critérios específicos: (i) ser de fácil medição; e (ii) ser facilmente controlável por meio de uma variável manipulada que tenha um efeito direto, rápido e significativo sobre o processo (SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2005). Para fins de estabilização, a medição deve ser capaz de detectar rapidamente modos instáveis, e para a rejeição de perturbações locais, a sistema de sensores deve estar posicionada estrategicamente próxima a uma perturbação significativa.

3.3 CONTROLE AUTOMÁTICO CONVENCIONAL

Em qualquer planta de processo, é indispensável a implementação de um sistema básico de controle para manter a estabilidade operacional, e o mesmo princípio se aplica aos modelos de plantas simuladas. Sistemas de processo reais estão sujeitos a influências do ambiente e de outros sistemas, como utilidades e processos a montante, podendo desviar-se das condições operacionais desejadas na ausência de controle adequado. Em simulações de processos, o sistema de controle de variáveis é necessário para assegurar a estabilidade do processo, visto que pequenos desvios ou erros de cálculo podem tornar o modelo instável e afastá-lo das condições pretendidas. Além disso, simulações dinâmicas podem ser utilizadas para testar o comportamento de diferentes estruturas de controle e configurações, permitindo a exploração de diversos aspectos do controle de processos, incluindo estabilidade, robustez e precisão de diferentes esquemas e configurações de controladores (LUYBEN, 1996).

Ao configurar um esquema de controle, é crucial considerar quais saídas são mais importantes para serem mantidas estáveis, quais entradas estão disponíveis para controle e quais são mais adequadas para este fim (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2004). Diversos critérios podem influenciar essa decisão, incluindo requisitos de qualidade do produto, restrições de segurança, consumo de energia e capacidade dos equipamentos. Geralmente, existem restrições sobre os insumos, como limites máximos de fluxo, precisões e capacidades de compressores. Para as saídas, especificações precisas são necessárias para garantir o funcionamento adequado das operações a jusante.

A partir de um estudo de otimização, é possível determinar os valores de entrada e saída que proporcionam o melhor desempenho geral do processo. O objetivo do controle de processos é manter as variáveis do processo nesses valores ótimos, o que requer a definição clara dos valores ótimos e das restrições de entrada. Variáveis que podem manter o processo operando de forma ideal, ou pelo menos dentro de um intervalo aceitável quando controladas em um set point constante, são de particular interesse. A seleção adequada dessas variáveis elimina a necessidade de novas otimizações em face de distúrbios, configurando um esquema de controle conhecido como controle auto otimizado (SKOGESTAD e POSTLETHWAITE, 2005).

3.4 LÓGICA FUZZY

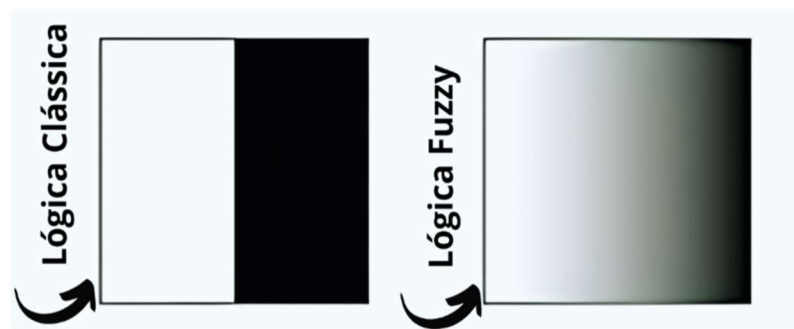
A lógica fuzzy, também conhecida como lógica difusa, constitui uma metodologia de interpretação de dados que permite à modelagem incorporar aproximações de raciocínios flexíveis, assemelhando-se à capacidade humana de atuar em ambientes caracterizados por imprecisão e ambiguidade (SANCHEZ, 2009). Esta lógica foi proposta em 1965 pelo professor Lotfi A. Zadeh, do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Berkeley, Califórnia, por meio do artigo intitulado “Fuzzy Sets”. Neste contexto, o objetivo principal era quantificar situações vagas ou subjetivas, comuns na comunicação humana, de modo a possibilitar sua compreensão e tratamento numérico via programação computacional (SHAW, 2010).

Para tanto, diferentemente da lógica clássica, conhecida como lógica booleana, que se caracteriza por sua natureza binária ao reconhecer valores como “verdadeiro” ou “falso”, a lógica fuzzy se distingue por ser multivalorada, validando diversos valores dentro de um intervalo gradiente (SHAW e SIMÕES, 2007). A partir dos conceitos de conjuntos fuzzy e do estabelecimento de um conjunto rigoroso de regras, essa lógica tornou-se a base para a elaboração de modelagens e algoritmos destinados ao controle de processos industriais. Isso permitiu uma implementação e projeto menos complexos, facilitando a solução de problemas de controle com intervenções difíceis (GUDWIN e GOMIDE, 1994).

Nesse contexto, a estruturação do conjunto fuzzy expande o âmbito da teoria tradicional dos conjuntos, na qual um elemento tem apenas duas possibilidades: pertencer ou não a um determinado agrupamento. Por outro lado, na teoria dos conjuntos fuzzy, um elemento pode ser associado a qualquer valor dentro de um intervalo entre 0 e 1. Essa estimativa indica o grau de

pertinência ou pertencimento do elemento ao conjunto em questão, permitindo que ele tenha um grau de pertinência a um determinado conjunto, resultando em um gradiente entre o determinado intervalo. Sob essa perspectiva, a pertinência total de um elemento ao conjunto é representada pelo valor 1, a não pertinência total pelo valor 0, e qualquer valor intermediário é considerado como uma pertença parcial ao conjunto como demonstra a Figura 1 (BRESSAN, 2008).

Figura 1 – Ilustração comparativa: Lógica Clássica x Lógica Fuzzy.



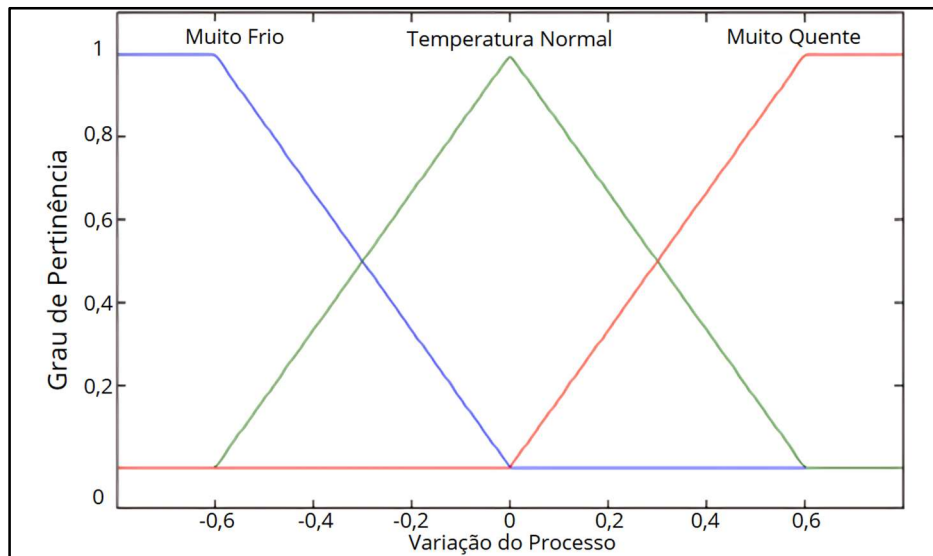
Fonte: Adaptado de Kohagura, 2007

Sendo assim, a representação de um determinado conjunto fuzzy dentro do intervalo característico $[0, 1]$ é realizada por meio de funções de pertinência, as quais são responsáveis pela definição das fronteiras do conjunto em questão. Assim, qualquer função que tenha como domínio definido “U” e imagem $[0, 1]$ pode ser utilizada como uma função de pertinência, Figura 2. O gráfico de tal função é gerado pela agregação da grandeza, que é uma variável linguística em consideração (no eixo das abscissas) com o grau de pertencimento ao conjunto de valores linguísticos (no eixo das ordenadas) (OLIVEIRA JUNIOR, 1999).

Com a noção de função de pertinência estabelecida, avança-se para a fundamentação da execução processual fuzzy, a qual é composta por três etapas cruciais para a resolução de problemas em sistemas de controle: fuzzyficação, inferência e defuzzyficação. Na primeira etapa, a fuzzyficação do problema implica a definição das variáveis fuzzy, o que inclui a especificação das funções de pertinência e a delimitação das regiões envolvidas no problema. Posteriormente, na fase de inferência, ocorre a interpretação e o discernimento, nos quais são tomadas as decisões (JUNGES, 2006). Nesse contexto, com base em informações obtidas e processadas de acordo com regras rigorosas. Finalmente, na etapa de defuzzyficação, as variáveis inferidas são convertidas em valores numéricos, correspondentes aos valores

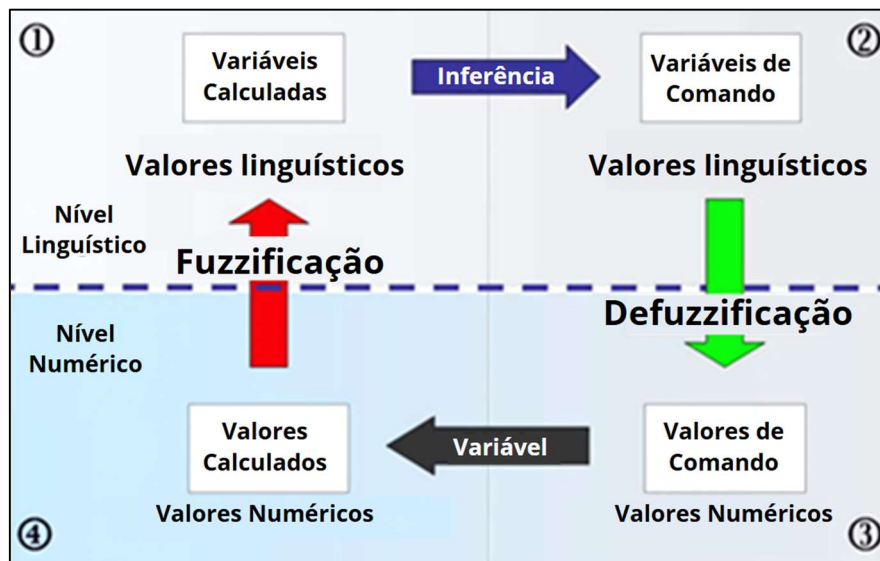
previamente fuzzyficados, permitindo a continuação da ação necessária. A Figura 3 a seguir ilustra, de forma resumida, as etapas fundamentais relacionadas à lógica fuzzy.

Figura 2 – Ilustração Função de Pertinência de um Processo.



Fonte: Adaptado de Silveira *et al.*, 2018

Figura 3 – Fluxograma Implementação Fuzzy, onde: Lógica Fuzzy atua na transição entre nível numérico e linguístico para regras e inferências serem aplicadas.



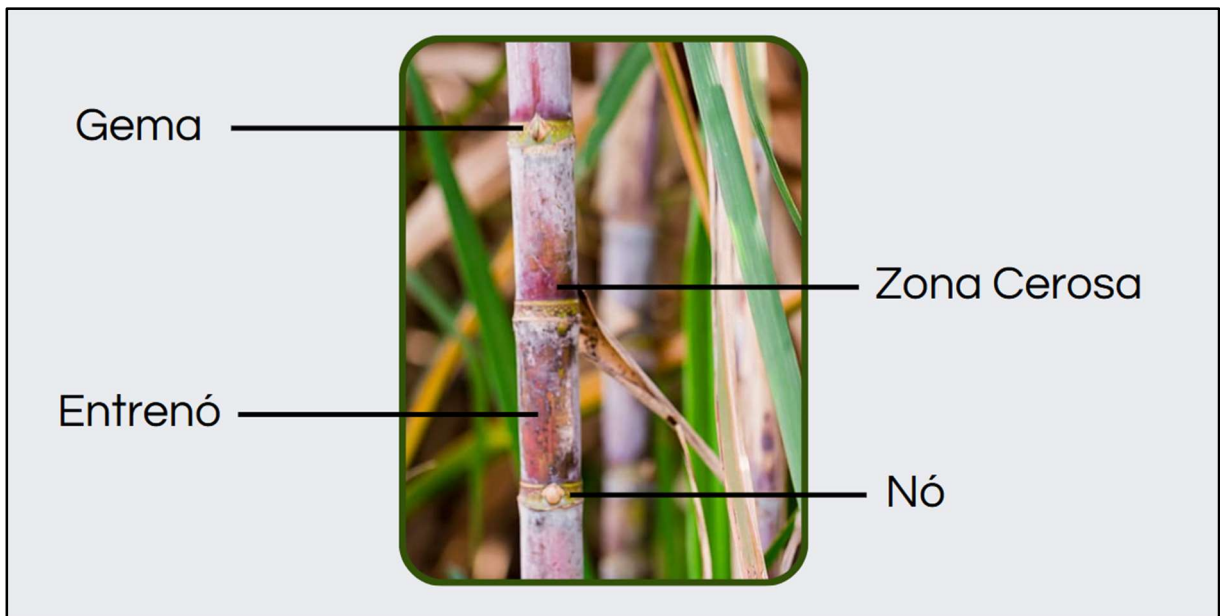
Fonte: Adaptado Junges, 2006

3.5 PREPARO DO MOSTO

No setor sucroenergético brasileiro a produção de etanol é realizada a partir de uma fermentação envolvendo um substrato composto majoritariamente por água e melaço de cana-de-açúcar, podendo também ser utilizado caldo tratado para obtenção deste bioproduto.

A cana-de-açúcar é uma planta originária da Ásia Meridional e pertence à família das gramíneas, seu caule ou colmo (Figura 4) repleto de caldo açucarado é amplamente utilizado na indústria sucroenergética na recuperação de sacarose (NÓBREGA, 2009).

Figura 4 – Estrutura da Cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado Nóbrega, 2009

De acordo com Nóbrega, a cana-de-açúcar cultivada em quase todas as regiões do Brasil pode ser aproveitada integralmente dentro da indústria, onde seu bagaço pode ser utilizado como alimento animal, matéria prima de diversos tipos de papel, fármacos e síntese de bioprodutos, além de ter como uso principal uso a queima do material para cogeração na forma de eletricidade e vapor para utilidades. O melaço, proveniente do cozimento para recuperação da sacarose, pode ser matéria prima para obtenção de ácido cítrico, ácido lático, glutamato monossódico e leveduras (NÓBREGA, 2009).

A composição química da cana (Figura 5) varia de acordo com a região onde o cultivo foi realizado a depender também de outros fatores físicos dentro de uma mesma região, como idade, sanidade, temperatura, tratamentos culturais, climas, solos, umidade, precipitação pluvial, adubação e outros. Ainda de acordo com Nóbrega, dentre todos os componentes o de maior interesse para a indústria é a sacarose, componente que influencia diretamente no ATR (Açúcares Totais Recuperáveis) promovendo maiores rendimentos agroindustriais nos momentos de plena maturação (NÓBREGA, 2009).

Figura 5 – Composição da Cana-de-açúcar, g/100g (%peso/peso).

Componente	Percentual	Subcomponente	Percentual
Fibra	8,0 a 14,0		8,0 a 14,0
Caldo	86,0 a 92,0	Água	75,0 a 82,0
		Sólidos em Solução (°Brix)	18,0 a 25,0
Açúcares nos sólidos em solução do caldo	15,5 a 23,5	Sacarose	14,5 a 23,5
		Dextrose(glicose)	0,3 a 1,1
		Levulose(frutose)	0,0 a 0,7
Não- açúcares nos sólidos em solução do caldo	1,5 a 2,5	Mérias nitrogenadas, aminoácidos, sais minerais, substâncias pécticas, gomas, mucilagens, ácidos livres, matérias corantes, gorduras e ceras.	1,5 a 2,5

Fonte: Adaptado de Nóbrega, 2009

3.6 MEL FINAL DE CANA-AÇÚCAR OU MELAÇO

Após as operações unitárias envolvidas no processo de cozimento do xarope de açúcar e centrifugação das massas cozidas para recuperação da sacarose em formato de cristais de açúcar, obtém-se o resíduo conhecido como mel final ou melaço. Sua composição pode variar dependendo da especificação do açúcar produzido. O melaço, devido à sua composição complexa, requer um manejo cuidadoso para garantir uma fermentação eficiente e a produção de etanol de alta qualidade. A presença de impurezas e compostos não-açucarados pode representar desafios, que são abordados com técnicas de pré-tratamento e ajustes no processo de fermentação (LIMA et al., 2001). Este subproduto apresenta propriedades como ser rico em

açúcares que por consequência o torna com elevado °brix e escasso de nutrientes em sua composição.

3.7 O MOSTO

O mosto pode ser feito a partir de diversas matérias primas, como por exemplo um mix de caldo-de-cana tratado conhecido como caldo clarificado, melação e água, podendo em raras ocasiões se utilizar xarope também para a composição do mosto (REBELATO, MADALENO e RODRIGUES, 2014). O mosto é preparado e enviado para as dornas de fermentação onde receberá o fermento diluído para iniciar o processo fermentativo.

Segundo Vasconcelos (2010), é necessário o controle na preparação do mosto devido à:

- Caso haja baixa concentração de açúcares no mosto, a fermentação será curta e com menor teor alcoólico no meio fermentado (vinho bruto); favorece o crescimento celular em detrimento ao produto primário etanol; aumenta o consumo vapor e de água, pois para destilar um vinho com °Gl menor é necessário maior quantidade de vapor de água na base da coluna A; com baixa eficiência demandam maior volume de dornas;
- Mostos com elevada concentração de açúcares conduzem a fermentação incompleta devido a inibição por substrato, gerando açúcar residual no vinho bruto, demoram mais tempo para finalizar a fermentação, favorecem incrustações nos aparelhos de destilação devido ao açúcar residual em altas temperaturas poder caramelizar, reduzindo a eficiência da destilação (GORAK e SORENSEN, 2014).

3.7.1 COMPOSIÇÃO DO MOSTO

O controle da adição de açúcar é de suma importância para que o processo fermentativo etanoico ocorra com alta eficiência, visto que a quantidade de açúcares redutores totais (ART) e a quantidade de etanol liberado na solução podem a partir de determinadas concentrações inibir do processo metabólico das leveduras. De acordo com Vasconcelos (2010) utilizar um controle de alimentação adequado favorece o tempo de fermentação por consequência impacta na eficiência fermentativa sem que seja preciso, necessariamente, realizar modificações na engenharia do processo. No caso da produção de etanol, busca-se atingir o limiar entre elevar ao máximo a concentração de açúcares e manter o mínimo de açúcar residual ao fim da fermentação, desta forma maximizando a produção de etanol. Para se manter o processo

fermentativo na sua faixa regular, o °brix do mosto pode flutuar em torno de uma faixa de 18 a 24 °brix, a depender também dos objetivos operacionais da fermentação.

3.8 FERMENTAÇÃO ETANÓLICA

O processo fermentativo ocorre a partir de uma transformação de açúcares em álcool etílico (C_2H_6O) e dióxido de carbono (CO_2). Com reação catalisada por enzimas este processo é realizado principalmente por leveduras a um nível citoplasmático, onde a conversão do substrato disponível fornece energia para a célula da levedura na forma de ATP propiciando o crescimento e reprodução do organismo. Segundo Lima et al., 2001 o processo de fermentação pode ser dividido em três fases: Preliminar, tumultuosa e complementar. A primeira fase se inicia quando o substrato e as células se misturam, nesta etapa ocorre grande multiplicação celular e pequena elevação de temperatura, com baixa produção de CO_2 .

A fase tumultuosa se inicia com a elevação da quantidade de CO_2 liberado, levando a formação de bolhas e espuma de acordo com Venturini Filho (2010). Nesta etapa ocorre grande elevação na temperatura devido a reação exotérmica do metabolismo microbológico e formação de etanol, por conta disto é aplicado nesta fase a correção de temperatura por trocadores de calor nas dornas de fermentação. Esta fase dura até que se reduza o desprendimento de CO_2 .

Para a fase complementar o meio fermentativo sofre queda na temperatura e a mistura se assenta na dorna, com abrupta redução do teor de açúcares no meio até que se tenha completado a etapa fermentativa (BASSO et al., 2001).

No processo Melle-Boinot o mosto é adicionado ao fermento após a preparação da dorna com o fermento, desta forma expõe as leveduras a riscos menores de inibição por repressão catabólica (PACHECO, 2010). As células de levedura utilizadas neste método são provenientes do reaproveitamento da fermentação anterior, passando por uma etapa adicional de tratamento, onde após as células serem separadas do vinho por centrifugação obtém-se o creme de levedura e o vinho delevedurado, sendo este creme destinado para as dornas de tratamento, conhecidas como cubas, onde serão tratadas por ácido sulfúrico e água para diluição e controle de contaminação. É desejado regular o pH da mistura que seguirá para as cubas dentro de uma faixa de 2,5 a 3,0, com o consumo específico de ácido podendo variar de acordo com as necessidades de tratamento devido a contaminação por bactérias das células de levedura (Venturini Filho 2010). Cerca de 90% das leveduras são reaproveitadas de uma batelada para

outra quando a linha produtiva não é acoplada com sangria de leveduras para secagem e produção de fermento.

As leveduras utilizadas comumente na indústria são submetidas a cenários extremos onde a alta produção de etanol pode ser um fator que inibe o crescimento do fungo, na maioria das espécies de levedura esta inibição ocorre a 110 g/L de etanol. A espécie amplamente utilizada devido a sua grande relevância biotecnológica é a *Saccharomyces cerevisiae*.

Esta espécie atua em diversos segmentos industriais como produção de alimentos e bebidas alcoólicas no mundo todo, inclusive no Brasil com aplicação no setor de biocombustíveis renováveis, sendo ponto focal de diversos estudos que favorecem sua utilização no processo fermentativo alcoólico (SHULER, KARGI, 2002).

No início da safra, ocorre a multiplicação do fermento até que se atinja nível necessário, com solução de caldo de cana com graduação de 6 a 10 °brix. É utilizado neste processo alguns aditivos para ajudar na multiplicação rápida, como sulfato de amônio, sulfato de magnésio, potássio, zinco, fósforo, entre outros. Quando ocorre perda de viabilidade ou morte por envelhecimento das leveduras, o processo de multiplicação é refeito para se manter a concentração necessária dada a quantidade de mosto a ser fermentado. A concentração típica de inóculo no início da fermentação varia de 10^6 a 10^7 células/mL de mosto, aumentando até casas acima de 10^8 células por mL (PACHECO, 2010).

3.9 INDÚSTRIA 4.0

A sociedade vive um momento conhecido como a quarta revolução industrial ou indústria 4.0. Conceito iniciado na Alemanha em 2011, empregando ao processo produtivo tecnologias integradas para garantir desempenho inteligente, virtual e digital (ORTIZ, 2020).

Rojko, 2017 atribui que a indústria 4.0 pode ser percebida como uma evolução natural dos sistemas de produção industrial provocada pela tendência de digitalização, e para Fernandes, 2020 a quarta revolução industrial promovida por tecnologias digitais, proporciona eficiência na cadeia produtiva, racionalizando o uso de recursos e entregando soluções adaptadas tecnologicamente.

Esta interconexão de informações na perspectiva atual contribui para o aumento de eficiência devido à natureza hiper conectada, com tecnologia de medições, informatizada e flexível da indústria 4.0 (BAKSHI e PAULSON, 2022).

3.10 CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS

A aplicação de controle avançado vem evoluindo com o avanço das tecnologias IoT (Internet of Things) e métodos de sensoriamento avançados. Com estas informações sendo fornecidas em tempo real, cada vez mais é possível integrar processos complexos com tecnologia para operação (SEBORG, EDGAR e MELLICHAMP, 2004).

Considerando esta situação, nota-se que estratégias convencionais podem ser ainda mais robustas ao migrar de estratégias de controle de entrada única e saída única (SISO) para estratégias de controle multivariável (MIMO ou MISO) ou controle adaptativo, controle preditivo ou ainda sistemas de controle inteligente. O controle avançado, ou simplesmente APC (Advanced Process Control), abrange diferentes tipos de ferramentas e estratégias de controle de processos para sanar lacunas que advêm de controles discretos, ao se descrever matematicamente com parâmetros e variáveis de processo, pode se aplicar operações automatizadas e flexíveis da planta (MEHTA e REDDY, 2015).

O controle avançado deve ser implementado partindo de critérios organizacionais e operacionais da indústria estando de acordo com estratégias que levem em consideração características e especificidades do processo a ser controlado, podendo combinar um ou mais métodos de controle para se adequar a infraestrutura da planta e objetivo almejado. Algumas estratégias são comumente utilizadas na indústria, como controle preditivo, mas vagarosamente outras estratégias têm ganhado notoriedade com o passar dos anos, como controle baseado em lógica fuzzy e controle ideal biologicamente inspirado (VASCONCELLOS, 2017; XI LI e LIN, 2013).

3.11 O SIMULADOR PENTAGRO

O Software de propriedade da empresa Pentagro fornece ferramentas para modelagem de todo o ciclo de uma planta agroindustrial, partindo de operações unitárias para simular por completo uma planta de processos através de um gêmeo digital; esta ferramenta utiliza de sistemas de equações fenomenológicos e fundamentos termodinâmicos para modelar em estado estacionário equipamentos e correntes de uma agroindústria. Este sistema é parte fundamental da tecnologia de controle avançado e otimização.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo será descrito a metodologia utilizada neste artigo, apresentando o ambiente de trabalho com informações compiladas, os métodos envolvidos na coleta de dados e demais informações para descrição do sistema de estudo.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O preparo do mosto é composto de 3 elementos principais, água, melão e caldo clarificado, cada um proveniente de uma etapa específica do processo.

O caldo clarificado é proveniente dos decantadores de caldo tem °brix e volume não padronizado para ser adicionado nas dornas de fermentação, por este motivo, é possível realizar algumas operações a fim de garantir esta padronização do mosto fermentativo. Neste trabalho, o foco será na padronização do °brix, sendo o volume de mosto controlado via outras tecnologias fora do escopo desta análise.

Utilizando o software Simulador Pentagro©, foi modelado a etapa industrial do preparo do mosto de acordo com o observado na Figura 6.

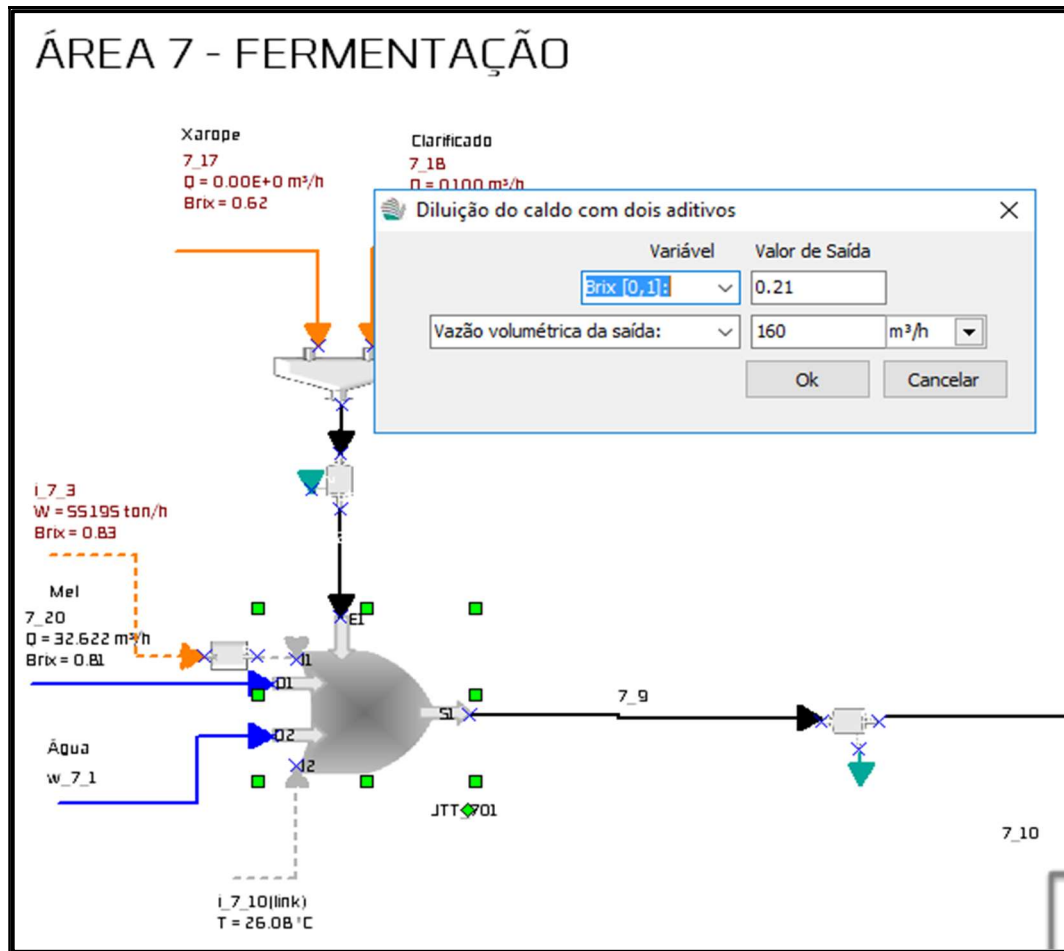
Na Figura 6 a corrente w_7_1 trata a respeito da corrente que define a água necessária para esta solução, a corrente 7_20 define a quantidade necessária de melão para compor este mosto e a corrente 7_18 nos informa se está sendo utilizado para o processo caldo clarificado proveniente dos decantadores.

Podemos observar algumas informações relevantes ao processo analisado. Com esta simulação é possível atribuir informações coletadas diretamente da comunicação industrial às correntes de xarope, clarificado, mel e água indicadas na Figura 6.

Além disto, é possível inferir os objetivos que o operador da área de fermentação deseja (Campo de seleção na caixa de diálogo suspensa da imagem) para o °brix do mosto e vazão de saída para alimentar as dornas de fermentação na corrente 7_9 da Figura 6.

A diluição é realizada através de um diluidor através de um JDT (Juice Dillution Tank) que recebe dois aditivos, água e mel. O sistema realiza um balanço de massa e energia para calcular a demanda necessária para cada um dos aditivos a fim de regular o °brix na saída do diluidor considerando uma resolução de um sistema não linear por método iterativo.

Figura 6 – Esquema da modelagem de °brix do Mosto.



Fonte: Repositório Pentagro, 2024

Como podemos identificar na Figura 6 acima, existem diversas correntes mapeadas, através delas conseguimos estruturar pelo balanço de massa a quantidade necessária de água e mel que serão necessários para compor o mosto na especificação correta de forma preditiva e ajustada aos diversos parâmetros dos componentes envolvidos neste processo.

A respeito das informações fornecidas para cada corrente, por exemplo na Figura 7 abaixo, podemos identificar todas as configurações disponíveis para ajustar fatores físicos e propriedades de cada um dos aditivos utilizados para a diluição.

Podemos observar no esquema do modelo apresentado que a composição do sistema apresenta um terceiro aditivo que pode ser utilizado em alguns casos pouco usuais, que é o aditivo xarope. Este aditivo é um aditivo rico em sacarose que preferencialmente é utilizado para separação do açúcar após o cozimento, porém o modelo está preparado para identificar e considerar este aditivo caso venha a ser utilizado, porém não é o foco deste trabalho.

Figura 7 – Informações de Configuração das correntes.

ÁREA 7 FERMENTAÇÃO

Corrente

Valores da Corrente

Vazão Mássica: 44.972023 ton/h Cp: 2.60198 kJ/kg.K ART: 24.82219 ton/h ART: 55.194737 %

Temperatura: 100 °C Entalpia: 229.9805 kJ/kg POL: 44.36 % Vazão Vol.: 32.62193 m³/h

Pressão: 1 bar Potência: 2.872969 MW AR: 8.5 % %Fases: 80.58 19.42 0
Sol Liq Gas/Vap

Componentes

Agua

Fração Mássica [0,1]:

Adicionar Modificar Adicionar Componente

Nome	Fração Mássica [0,1]	Cp (kJ/kg.K)	Densidade (kg/m³)	Entalpia (kJ/kg)	Outras Informações
Caldo	1.000000	2.601980	1378.582565	229.9805005	Brix=0.805800; Pureza=0.550509; Impurez...

Ok Cancelar

Fonte: Repositório Pentagro, 2024

A forma pela qual o aditivo mel será controlado é proveniente de uma variação no °brix da solução diluída de mosto, o equipamento utilizado para esta leitura é um densímetro Touché.

O densímetro Touché é um equipamento utilizado para medir a densidade de líquidos de forma precisa e eficiente. Sua operação é baseada no princípio de deslocamento de fluidos, onde o aparelho calcula a densidade ao medir a flutuação de um corpo imerso no líquido.

Este equipamento consiste em um tubo vertical, onde é inserido um flutuador calibrado. Esse flutuador é sensível a variações de densidade no líquido, deslocando-se verticalmente de acordo com a força de empuxo exercida pelo fluido. O equipamento é geralmente composto por:

- Tubo de medição: Um cilindro vertical onde o fluido é inserido. Este tubo é transparente, permitindo a observação direta do flutuador.
- Flutuador: Um corpo calibrado que se desloca dentro do tubo conforme a densidade do líquido muda. A posição do flutuador está diretamente relacionada à densidade do fluido.

- Sistema de leitura: Alguns modelos mais avançados do densímetro Touche podem incluir sensores eletrônicos para leitura automática da posição do flutuador, transmitindo os dados para uma interface digital.

Para realizar a medição, o fluido é introduzido no tubo de medição do densímetro. O flutuador se ajusta à posição em que a força de empuxo se iguala à força gravitacional. A densidade do líquido é então determinada pela posição do flutuador em relação à escala graduada, ou através da leitura digital nos modelos eletrônicos.

O densímetro Touche é amplamente utilizado em diversas indústrias, como a química, petroquímica, alimentícia, e farmacêutica, onde a determinação precisa da densidade é essencial para o controle de qualidade e processos produtivos. Por exemplo, na produção de etanol, o densímetro pode ser utilizado para medir a densidade do mosto fermentativo, garantindo que o processo de fermentação ocorra de maneira eficaz.

Para garantir a precisão das medições, é importante que o densímetro seja calibrado regularmente e utilizado em condições controladas de temperatura, pois a densidade dos líquidos pode variar com a temperatura.

O software de Controle Pentagro Everest[®] possui comunicação direta com este sensor e através dele e diversos outros variáveis busca atuar na vazão de melão através de um Set-Point-Remoto (SPR) escrito no PID da bomba de melão.

Os módulos fuzzy e alguns outros detalhes além da Figura 8 não pode ser descrito nesta metodologia por conter informações de caráter sigiloso sobre suas regras e funções de pertinência aplicadas.

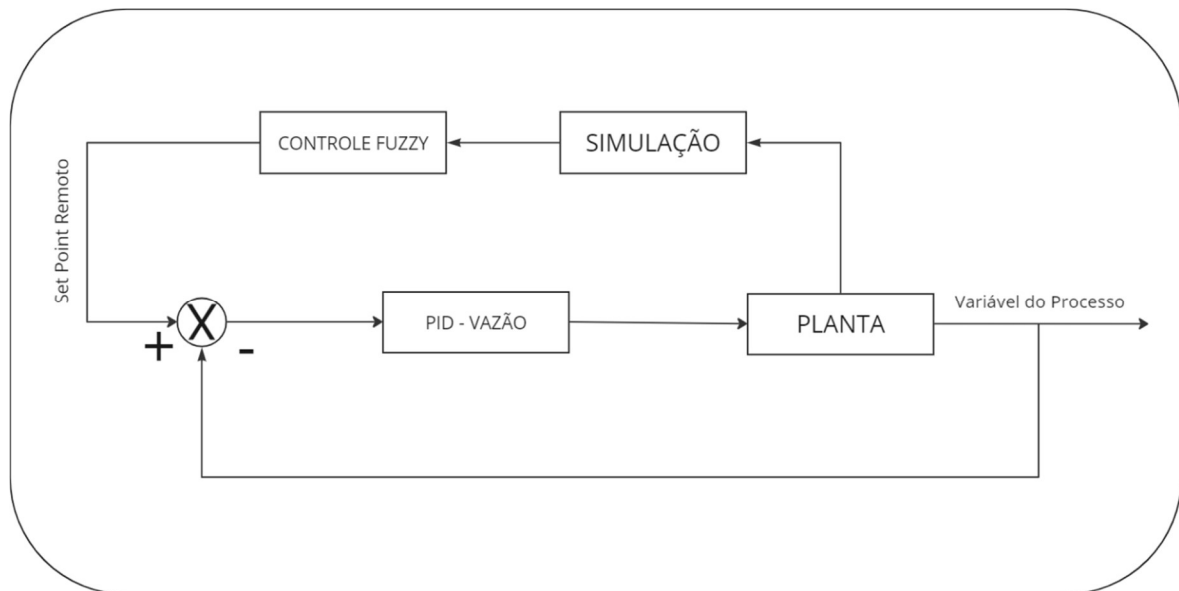
O controle do Pentagro Everest para o preparo do mosto é um controle do tipo MIMO modulados através de equacionamentos existentes no balanço e define ao processo o quanto de água será necessária para manter a solução em estado estacionário de vazão e °brix do mosto. Este equacionamento permite antecipar e ajustar de acordo com mudanças de cenários operacionais qual será o novo ponto de operação do sistema em questão.

O acoplamento do controle ao processo segue o seguinte diagrama de controle avançado, Figura 8. A fins comparativos, para este estudo de caso foi realizado a comparação de cenários equivalentes de diluição, para sermos mais assertivos no que se diz respeito a eficiência da atuação do controle, mitigando oscilações devido a distúrbios externos.

Devido a esta premissa acima mencionada, estabeleceu-se os dois cenários a serem avaliados neste estudo, o primeiro sendo a diluição do melão observando a vazão de caldo clarificado em dois patamares, o primeiro dele com a vazão de caldo clarificado sendo igual a

zero m³/h e o segundo com a vazão de caldo clarificado sendo em média 100 a 150 m³/h, porém priorizando a estabilidade identificada. Esta premissa possibilita filtrar para que seja possível diferenciar o desempenho do controle avançado em relação ao controle tradicional.

Figura 8 – Acoplamento dos Módulos de Controle.



Fonte: Autoria Própria, 2024

4.2 COLETA DE DADOS

Este trabalho busca apresentar através de uma análise de dados que correspondem a aplicação de controle avançado de processos em um caso real descaracterizado na indústria sucroenergética.

Para obtermos resultados confiáveis, foi estabelecido um método comparativo entre o processo industrial de preparo do mosto fermentativo com diferentes composições, sendo elas:

- 1 - Água, melaço e caldo clarificado;
- 2 - Água e melaço.

Buscando que a análise seja representativa, estabeleceu-se algumas premissas afim de mitigar diferenças entre a composição dos materiais utilizados neste preparo, são elas:

- Vazão de Caldo Clarificado estável no cenário 1;
- Vazão de Caldo Clarificado zerada no cenário 2;
- SP de °brix fixo em 21;

- Volume amostral equivalente para ambos os itens 1 e 2.

Para se avaliar os resultados utilizou-se uma análise estatística através do software minitab® para se avaliar através de um teste de hipóteses verificando se a aplicação do controle avançado surtiu efeito dentro do processo industrial, reduzindo o desvio padrão da variável de processo °brix do mosto. Bem como também se realizou um estudo de capacidade envolvendo a aplicação do Pentagro EVEREST em dois diferentes cenários de composição do mosto fermentativo.

5 RESULTADOS

Utilizaremos algumas abreviaturas para facilitar estas análises, são elas, Caldo Clarificado (CC), Sem Clarificado (SC), ativado (ON) e desativado (OFF).

Para esta análise, os dados utilizados estão disponíveis na tabela em apêndice. Também foi disponibilizado através de um link o acesso para consulta completa.

Os resultados obtidos nas análises realizadas para o cenário de preparo do mosto utilizando como matéria prima água, caldo clarificado e melão estão descritos a partir do item 5.1.

5.1 CLARIFICADO, MELAÇO E ÁGUA

A Tabela 1 e Tabela 2 resumem as análises de melão, água e clarificado:

Tabela 1 – Resultados EVEREST Ativo CC.

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
°Brix EVEREST ATIVO CC	1625	21,13	0,9066	19,71	24,55	20,82

Fonte: Autoria Própria, 2024

Tabela 2 – Resultados EVEREST Desabilitado CC.

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
°Brix EVEREST DESATIVAO CC	1393	20,65	18,756	16,82	26,63	20,49

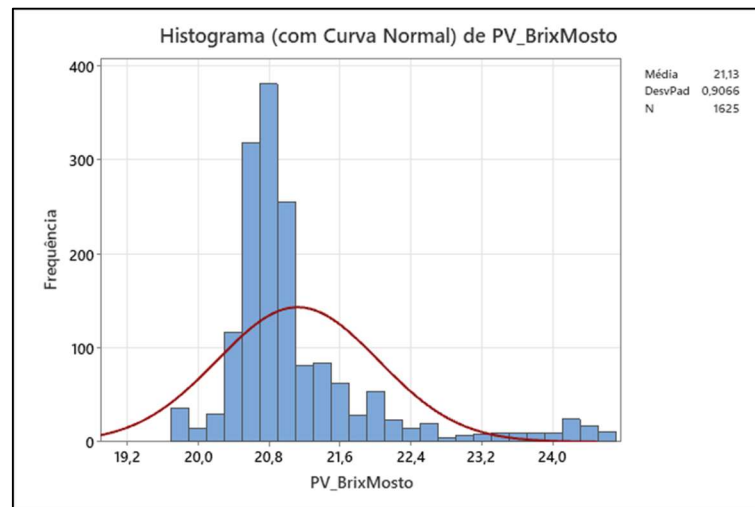
Fonte: Autoria Própria, 2024

Ao comparar estes dois resultados das Tabelas 1 e 2 notamos que o desvio padrão teve uma significativa redução ao cair de 1,8756 para 0,9066, o que configura uma redução de

51,66% no desvio padrão deste controle de °brix no que diz respeito a configuração de operação com Caldo Clarificado.

Ainda a respeito do cenário com CC do EVEREST Ativado, de forma visual, podemos observar na Figura 9, descrita abaixo que o sistema segue uma similaridade com a curva normal e que possui elevada frequência de valores ponderados em torno de 20,8°brix.

Figura 9 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST ON CC.

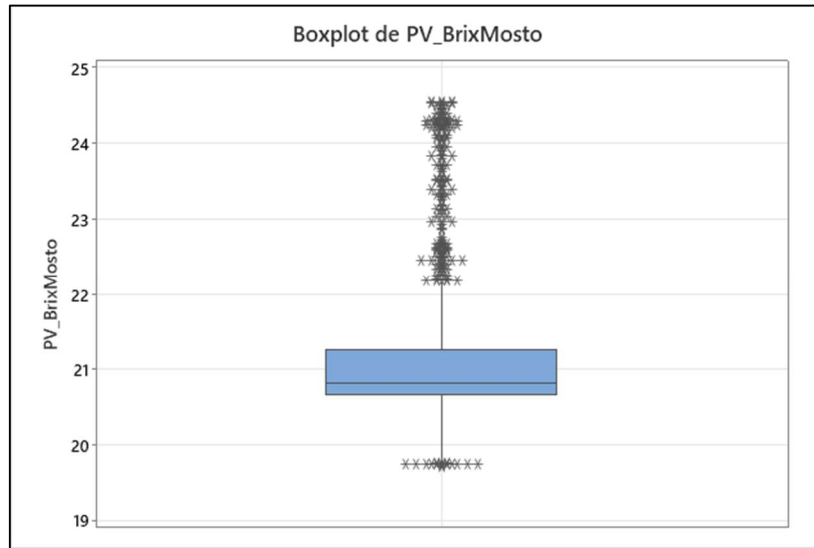


Fonte: Autoria Própria, 2024

O boxplot da Figura 10 evidencia a existência de alguns pontos que se distanciam significativamente do padrão geral dos dados, representando em linhas gerais, perturbações no sistema que não se adequam aos dados preponderantemente analisados, mas que não foram removidos de nossas análises em nenhum dos casos analisados para o preparo do mosto CC. Conforme evidenciado pela mediana a maioria das observações se acumulam em torno do valor do setpoint e com baixa variabilidade.

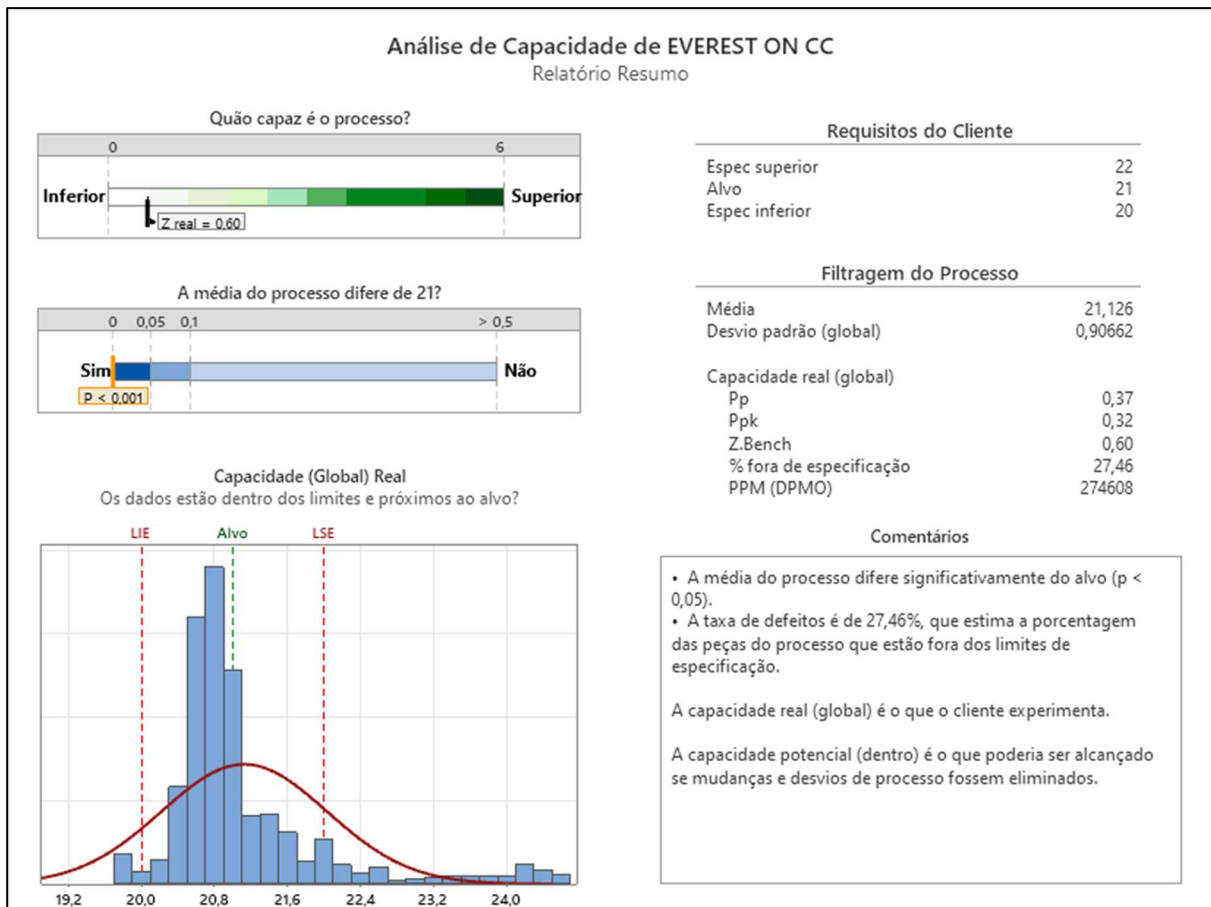
Para a análise de capacidade visualizada na Figura 11, foi estabelecido como margem de especificação para avaliar o quão capaz o EVEREST foi em relação a taxa de itens fora dos limites. Com esta análise, podemos observar que a taxa de defeitos observada para o caso ativado e CC foi de 27,46%.

Figura 10 – Boxplot do °brix EVEREST ON CC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

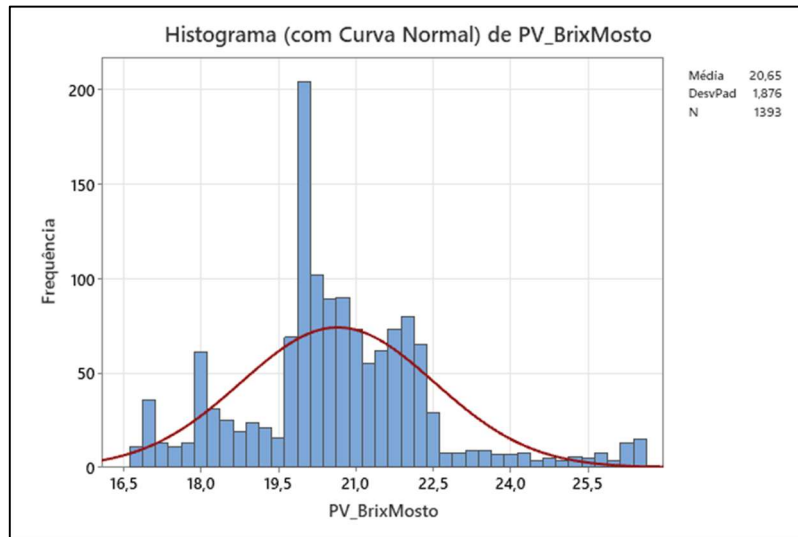
Figura 11 – Teste de Capacidade do EVEREST ON CC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Já em relação ao EVEREST desativado, ao observarmos de forma visual o que ocorre, temos os seguintes resultados na Figura 12.

Figura 12 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST OFF CC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

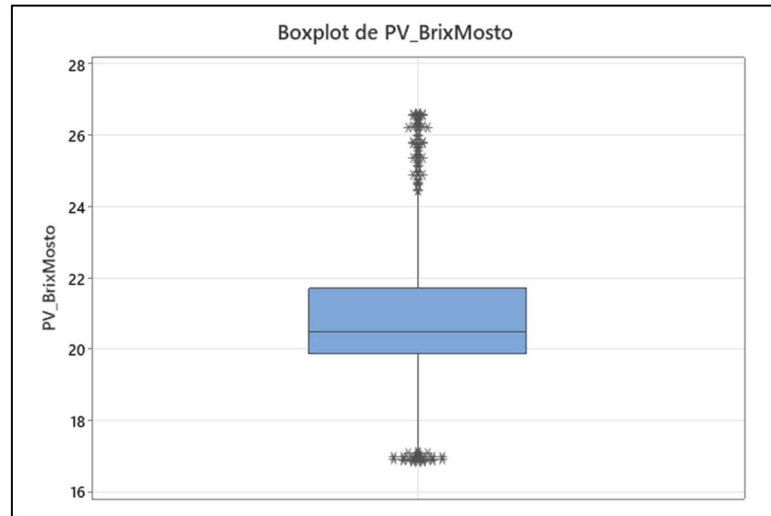
Identificamos na Figura 12 nitidamente que a frequência de valores próximos a 21°brix é bem menor em relação ao identificado no cenário com EVEREST ativo, isto remete diretamente na curva normal, a qual apresenta uma amplitude maior em relação à média observada.

Com a visualização do boxplot da Figura 13, podemos identificar a maior variabilidade entre os valores do primeiro e do terceiro quartil, como sendo significativamente maiores do que em relação ao identificado no cenário com o EVEREST ativado.

Na Figura 14, ao verificar dentro dos mesmos limites de especificação utilizados no cenário com EVEREST ativo, visualizamos um significativo aumento em relação a taxa de defeitos que ocorrem neste cenário, favorecendo o aumento da amplitude da curva normal observada.

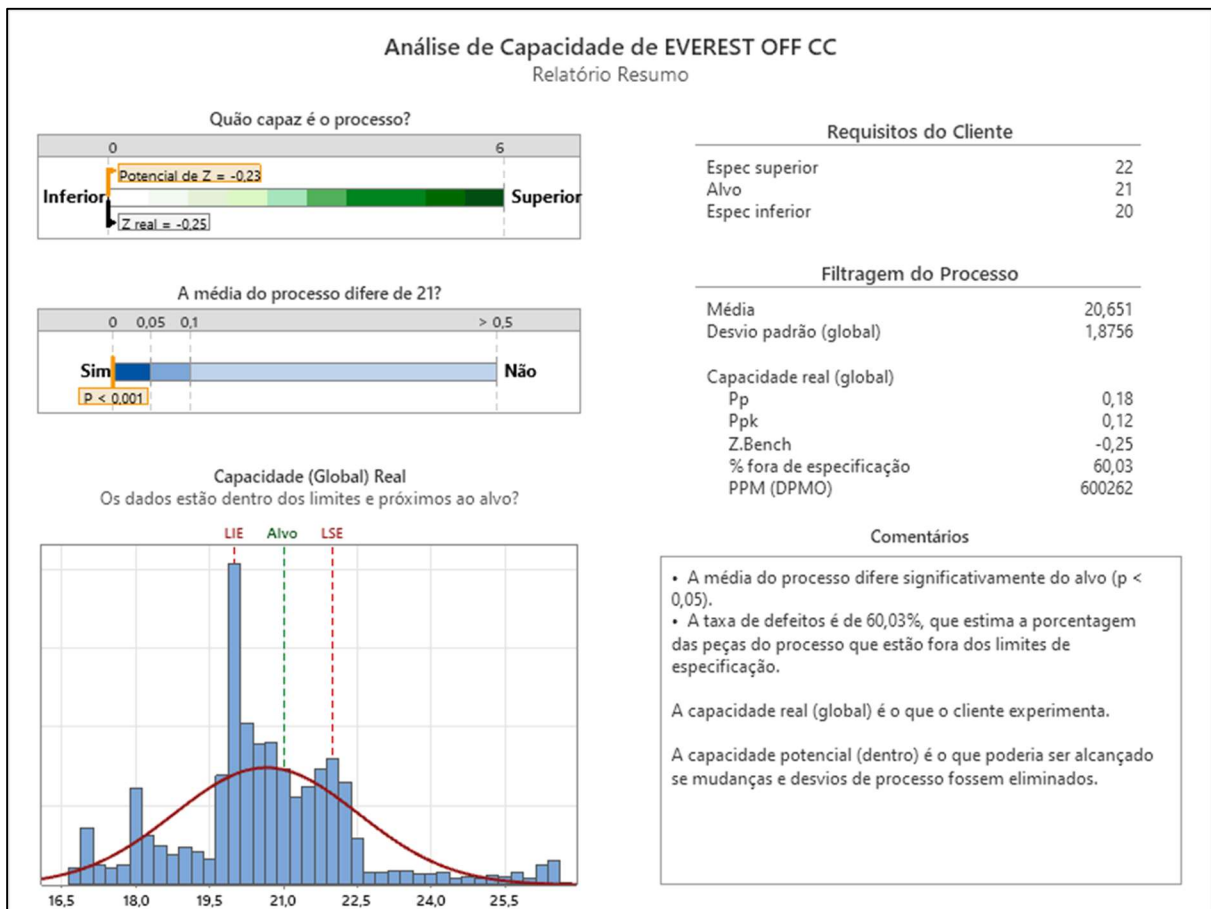
Seguindo para a visualização da capacidade para o EVEREST desabilitado, de acordo com a Figura 14.

Figura 13 – Boxplot do °brix EVEREST OFF CC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Figura 14 – Teste de Capacidade do EVEREST OFF CC.

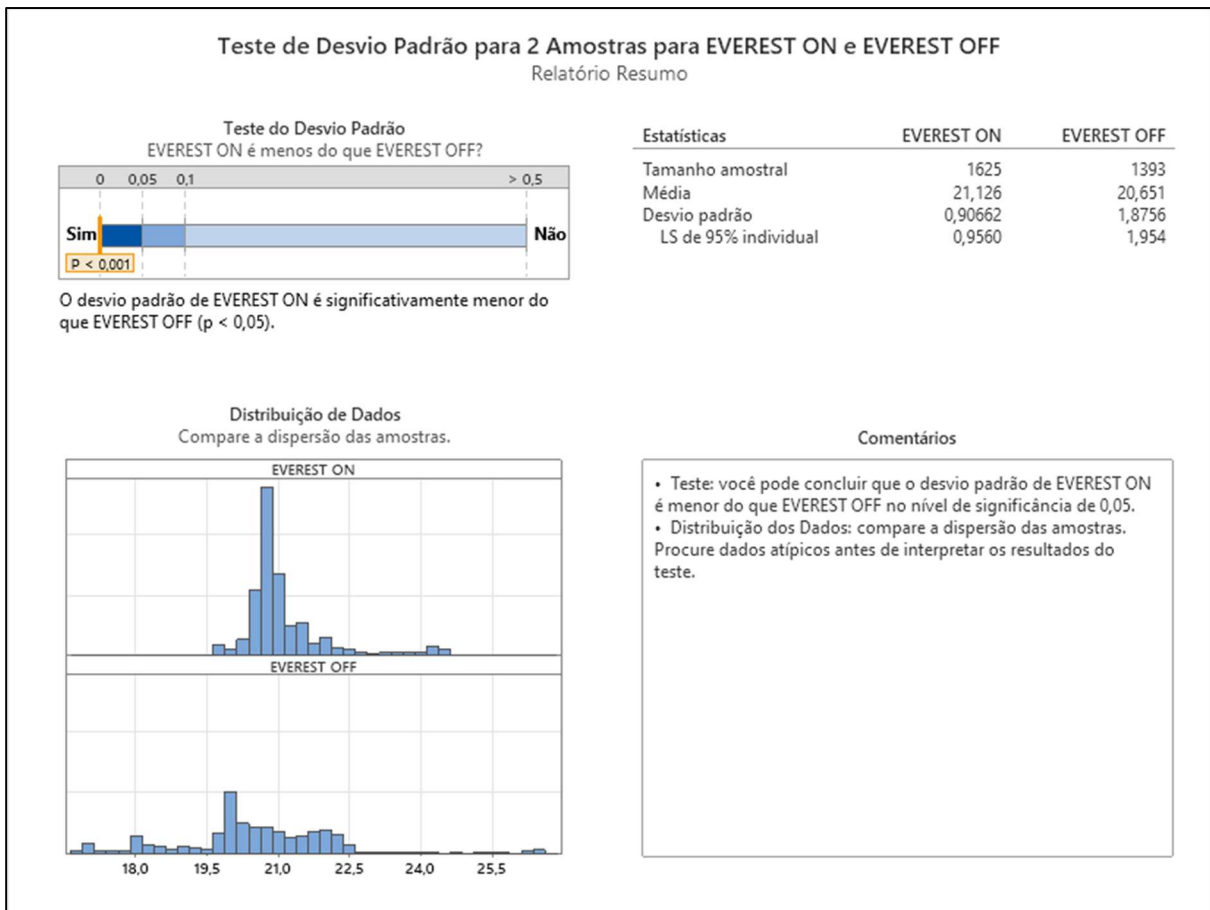


Fonte: Autoria Própria, 2024

Nesta etapa, ao olharmos para ambas as análises realizadas seguindo uma análise de variância, podemos identificar através da hipótese de que ao habilitar o controle avançado EVEREST ocorre uma redução no desvio padrão da variável observada Na Figura 15.

De acordo com a Figura 15, podem-se concluir que para um nível de significância de 0,05 o EVEREST quando ativado na composição do mosto como sendo água, caldo clarificado e melão, reduz o desvio padrão.

Figura 15 – Teste de Desvio padrão para EVEREST ON/OFF.



Fonte: Autoria Própria, 2024

5.2 MELAÇO E ÁGUA

Na sequência (Tabela 3 e 4), analisando o cenário onde a composição do mosto é modificada, removendo totalmente a utilização de clarificado para compor o mosto fermentativo, seguiremos a análise com água e melaço compondo o mosto.

Tabela 3 – Resultados EVEREST Ativo SC.

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
°Brix EVEREST ATIVO SC	2931	20,86	0,2639	19,43	21,52	20,85

Fonte: Autoria Própria, 2024

Tabela 4 – Resultados EVEREST Desabilitado SC.

Variável	N	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Mediana
°Brix EVEREST DESATIVAO SC	3096	20,95	0,4451	18,29	22,14	21,01

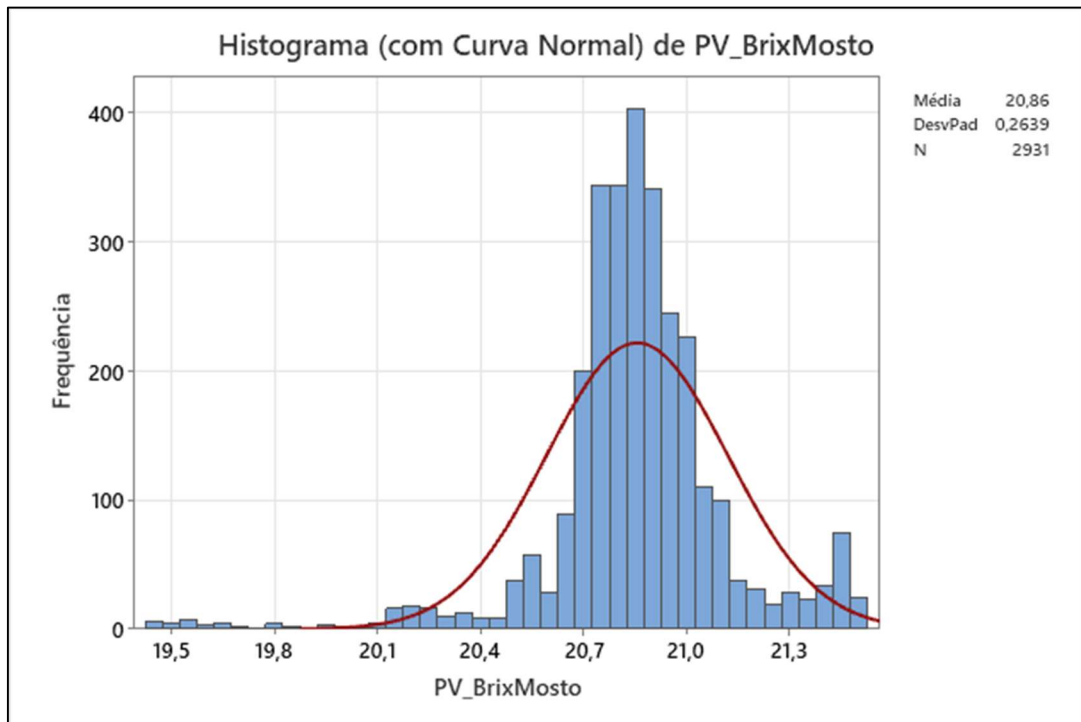
Fonte: Autoria Própria, 2024

Novamente ao comparar os dois resultados das Tabelas 3 e 4 nota-se de forma bem evidente que o desvio padrão teve uma significativa redução ao cair de 0,4451 para 0,2639, o que configura uma redução de 40,71% no desvio padrão deste controle de °brix no que diz respeito a configuração de operação com água e melaço.

Ainda a respeito do cenário com SC do EVEREST Ativado, de forma visual, podemos observar na Figura 16 que o sistema segue uma similaridade com a curva normal e que possui elevada frequência de valores ponderados em torno de 21°brix, com frequência ainda maior que quando EVEREST estava ativo no cenário CC.

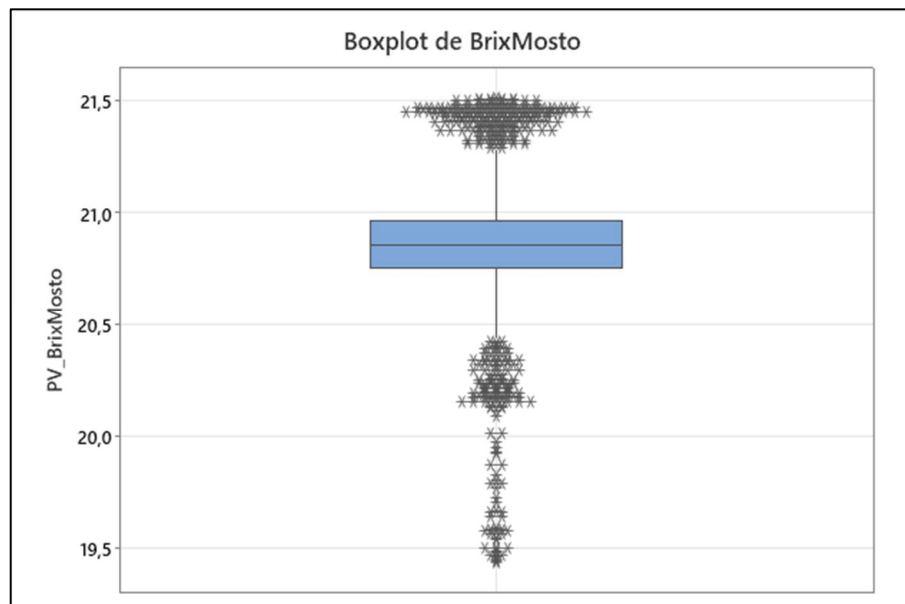
O boxplot da Figura 17 evidencia que frequentemente observa-se a existência de alguns outliers que representam em linhas gerais, perturbações no sistema que não se adequam aos dados preponderantemente analisados, mas que também não foram removidos de nossas análises em nenhum dos casos analisados para o preparo do mosto SC.

Figura 16 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST ON SC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

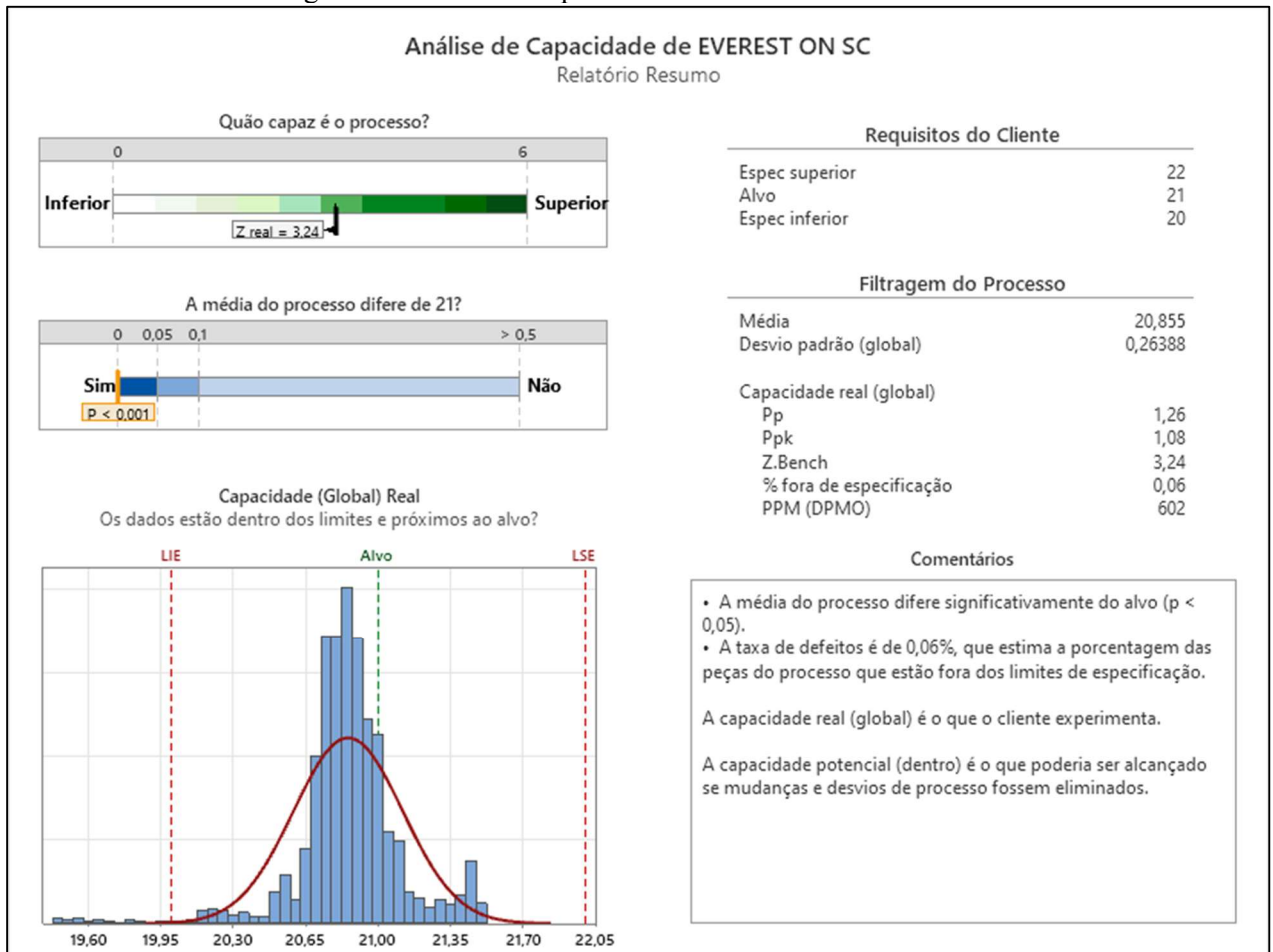
Figura 17 – Boxplot do °brix EVEREST ON SC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

A análise de capacidade da Figura 18, em relação à taxa de defeitos, podemos observar que a taxa de defeitos resultante para o caso ativado e SC foi de 0,06%. Valor baixo, que mostra grande volume de pontos dentro dos limites de especificação no cenário água e melão.

Figura 18 – Teste de Capacidade do EVEREST ON SC.



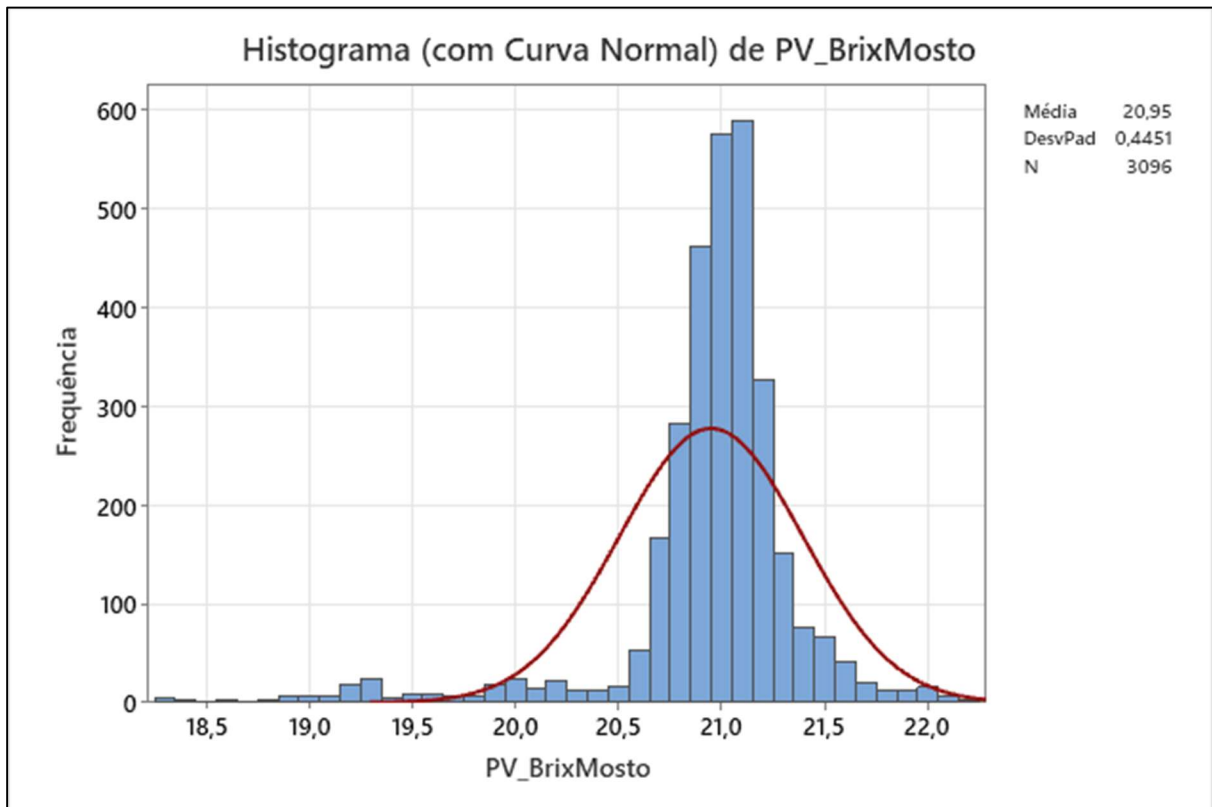
Fonte: Autoria Própria, 2024

Já em relação ao EVEREST desativado, ao observarmos de forma visual o que ocorre, temos os seguintes resultados apresentados na Figura 19.

Para este caso observado na Figura 19, fica nitidamente representado que a frequência de valores próximos a 21°Brix é bem maior em relação ao identificado no cenário com EVEREST ativo, isto evidencia que para o cenário melaço e água, apesar de um desvio padrão maior com EVEREST desativado, o número de leituras com valores próximos de 21°Brix para esta composição foi maior.

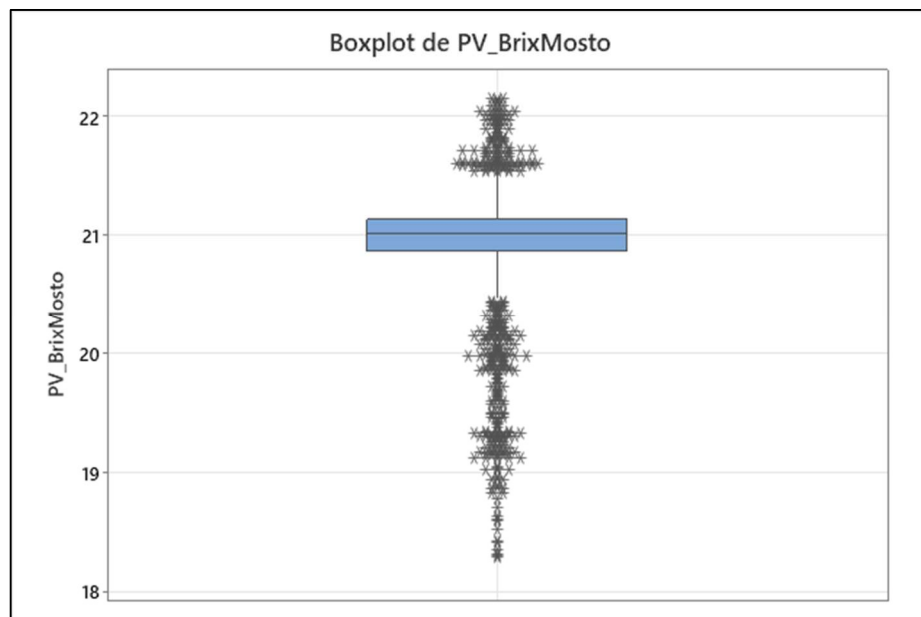
Com a visualização do boxplot da Figura 20, podemos identificar que existe uma pequena variabilidade entre os valores do primeiro e do terceiro quartil, sendo significativamente menores e com mediana maior do que em relação ao identificado no cenário com o EVEREST ativado.

Figura 19 – Histograma do °brix com Curva Normal EVEREST OFF SC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

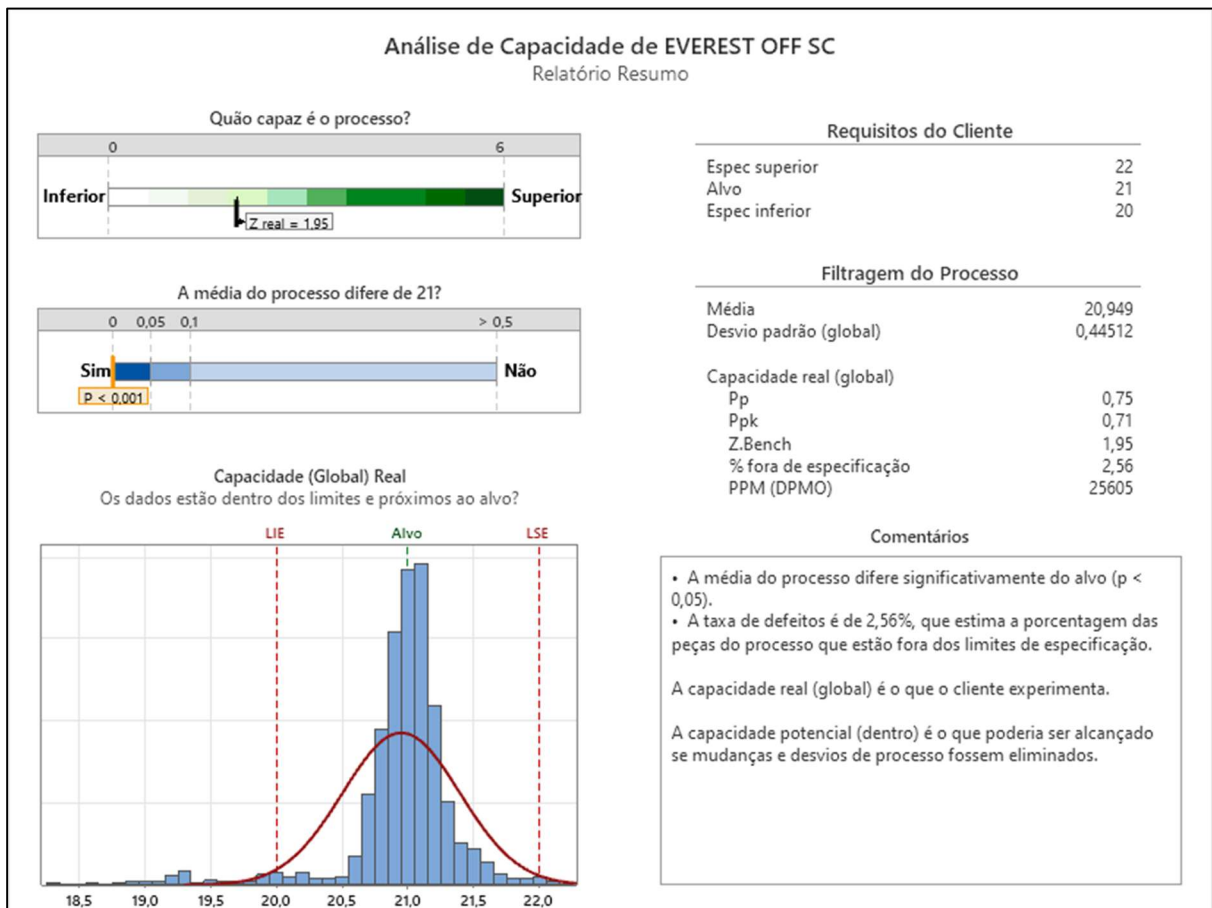
Figura 20 – Boxplot do °brix EVEREST OFF SC.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Seguindo para a visualização da capacidade para o EVEREST desabilitado, temos os resultados apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Teste de Capacidade do EVEREST OFF SC.



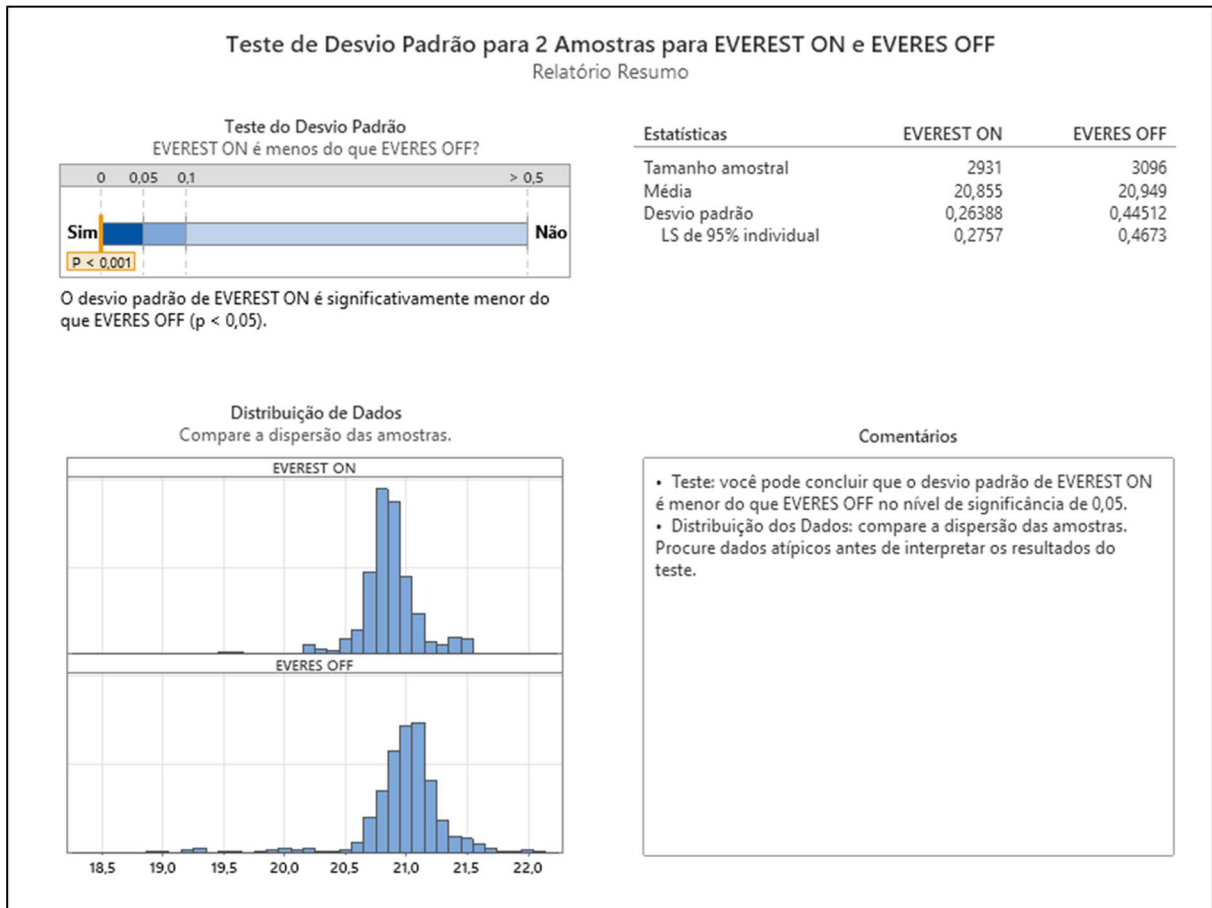
Fonte: Autoria Própria, 2024

Ao verificar dentro dos mesmos limites de especificação, utilizados no cenário com EVEREST ativo, visualizamos na Figura 21 um significativo aumento em relação a taxa de defeitos que ocorrem neste cenário, apesar da maior frequência de valores próximos ao valor de 21°Brix, quando comparado pela quantidade de valores fora dos limites definidos, observamos que o EVEREST estando ativo foi superior.

Nesta etapa, ao olharmos para os resultados obtidos e seguindo uma análise de variância, podemos identificar através da hipótese de que ao habilitar o controle avançado EVEREST

ocorre uma redução no desvio padrão da variável observada, como demonstra a Figura 22 abaixo.

Figura 22 – Teste de Desvio padrão para EVEREST ON/OFF.



Fonte: Autoria Própria, 2024

Com estas análises temos dados suficientes para verificar que em um nível de significância de 0,05 o EVEREST quando ativado na composição do mosto como sendo água e melação, reduz o desvio padrão. Reforçando novamente o resultado observado anteriormente.

6 CONCLUSÃO

Neste presente trabalho foi observado alguns resultados preliminares em relação ao desempenho e performance da malha de controle do preparo do mosto fermentativo, esta análise nos forneceu material para dimensionar o impacto causado por novas tecnologias que

corroboram para o avanço da indústria 4.0 no Brasil e também apresentar como o conceito de lógica fuzzy e modelagem industrial podem favorecer no âmbito acadêmico e empresarial novas pesquisas e novas técnicas para se alcançar níveis ainda mais altos de automação.

Os dados aqui demonstrados contribuem a favor da tendência à integração de informações industriais para fortalecer a tomada de decisão, seja por operadores ou seja por sistemas autônomos de controle e apresentam uma nova perspectiva a respeito da mudança que este tipo de tecnologia traz para o setor industrial. Ressalta-se a necessidade contínua de pesquisa e desenvolvimento para viabilizar iniciativas que permitam novos sistemas de controle e impulsionam o progresso da indústria sucroenergética rumo à excelência operacional e sustentabilidade.

Com base nos resultados, que evidenciaram reduções no desvio padrão de 51,66% no cenário com clarificado e 40,71% no cenário sem clarificado, e nas teorias levantadas a respeito da etapa industrial de preparo do mosto, nota-se que o sistema atende bem aos requisitos necessários para acompanhamento da produção, tendo capacidade plena de atuar de forma ainda mais avançada ao integrar ao seu balanço informações fundamentais do processo produtivo as quais por muitas vezes impactam diretamente na performance de controles convencionais.

A temática a respeito de controle avançado de processos tem muito potencial na indústria e vem crescendo rapidamente ao longo dos últimos anos, principalmente com a revolução que a internet possibilitou para este tipo de tecnologia.

6.1 SUGESTÃO PARA TEMAS FUTUROS

Como tema para trabalhos futuros existem muitos caminhos para seguir, mesmo em sequência da etapa de preparo do mosto, existem processos como diluição de fermento e controle de alimentação que podem ser explorados para conseguir atingir o produto final desejado nesta etapa industrial, seja pela fermentação alcoólica para produção de etanol, ou para produção de creme de levedura para produção de levedos desidratados para comercialização.

O preparo do mostro abraçou uma pequena fatia para demonstrar o grande potencial que esta tecnologia atribui para o avanço tecnológico na indústria atual.

REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, K. J., & HÄGGLUND, T. (2006). "Advanced PID Control". ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- BAKSHI, Bhavik R.; PAULSON, Joel A. Sustainability and Industry 4.0: Obstacles and Opportunities. 2022 American Control Conference (ACC), 2022. p. 2449-2460.
- BASSO et al. In. LIMA, U. A.; BASSO, L.C. e AMORIM. Biotecnologia Industrial – Vol.3: Processos Fermentativos e Enzimáticos. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 2001. p.82.
- BRESSAN, G. M.; KOENIGKAN, L. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E.; KARAM, D. A classification methodology for the risk of weed infestation using fuzzy logic. Weed Research, v. 48, n.5, p. 470-479, 2008.
- CONSIDINE, Douglas M. Encyclopedia of instrumentation and control. New York: McGraw-Hill, 1971.
- DIEESE. Trabalho e reestruturação produtiva: 10 Anos de Linha de Produção. São Paulo: DIEESE, 1994.
- FERNANDES, Michel de Mattos. Controle de processos como um serviço: uma abordagem para a indústria 4.0. 2020. 87p. Engenharia Química - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2020.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R.R. Modelagem, controle, sistemas e lógica Fuzzy. SBA Controle e Automação, vol. 4, n. 3, 1994.
- GORAK, Andrzej; SORENSEN, Eva. Distillation: Fundamentals and Principles. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2014. 450 p. (Green Chemistry and Chemical Engineering).
- HOFMANN, E. & RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. Computers in Industry. Elsevier, 2017.
- JUNGES, L.C.D. Introdução a Lógica Fuzzy. 2006. Disponível em: <s2i.das.ufsc.br/tikiwiki/apresentações/lógica-fuzzy.pdf> Acesso em: 27 Ago. 2024
- KOHAGURA, T. Lógica Fuzzy e suas aplicações. 2007, 61f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2007.
- LIMA, U. A., BASSO, L. C., AMORIM, H. V., Produção de Etanol. In: LIMA, et al., (Coord.). Biotecnologia Industrial. Processos Fermentativos e Enzimáticos. Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, v.3, cap. 1, p.1-43, 2001.
- LUYBEN, W. L. (1996). "Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers" (2nd Edition). McGraw-Hill.

- MEHTA, Bodh Raj; REDDY, Y. Jaganmohan. Industrial process automation systems: design and implementation. Elsevier Inc., 2015.
- NOBREGA, I. C. da C., Apostila de tecnologia de produtos Agropecuários - Tecnologia Pós colheita da cana-de-açúcar. Universidade Federal Rural de Pernambuco - Departamento de tecnologia rural, Recife-PE, 2009.
- OLIVEIRA JUNIOR, H. A., 1999, Lógica Difusa: Aspectos práticos e aplicações. 1 ed. Rio de Janeiro, Interciência.
- ORTIZ, Jesús Hamilton (Ed). Industry 4.0: Current status and future trends. IntechOpen Limited, 2020.
- PACHECO, T. F.. Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente. Dissertação (Mestrado) - Universidade federal de Uberlândia, 2010.
- REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M.; Avaliação do desempenho ambiental dos processos industriais de usinas sucroenergéticas: um estudo na bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu. Revista de administração da UNIMEP, v. 12, n. 3, p. 122-151, 2014.
- ROJKO, Andreja. Industry 4.0 concept: Background and overview. International journal of interactive mobile technologies, v. 11, n. 5, 2017.
- SANCHEZ, E. C. M. Controle por Aprendizado Acelerado e Neuro-Fuzzy de Sistemas Servo-Hidráulicos de Alta Frequência. 2009. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2009.
- SEBORG, Dale E.; EDGAR, Thomas F.; MELLICHAMP, Duncan A. Process Dynamics and Control. 2ª.ed. John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. Controle e Modelagem Fuzzy. FAPESP, Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo, 2010.
- SHULER, M. L.; KARGI, F., Bioprocess Engineering – Basic Concepts, Anaerobic Process – Ethanol ProductionE, 17 (2): 515 – 518, 2002.
- SILVEIRA, Graciele. GARCIA, Raphael. PEREIRA, Naara. Um Estudo sobre o Risco de Ataque Cardíaco via Teoria dos Conjuntos Fuzzy. Revista Eletrônica Paulista de Matemática, São Paulo, v. 13, dez. 2018. Disponível em: <www.researchgate.net/publication/329796071_Um_estudo_sobre_o_risco_de_ataque_cardiaco_via_teorias_de_conjuntos_fuzzy>. Acesso em: 27 Ago. 2024
- SIMÕES, M. G., SHAW, I. S., 207, Controle e Modelagem Fuzzy. 2 ed. São Paulo, Blucher/FAPESP.
- SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. 2. ed. New York: Wiley, 2005.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B. Principles and Practice of Automatic Process Control. 2. ed. New York: Wiley, 1997.

SWUSTE, P. et al. Process safety indicators, a review of literature. Journal of Loss Prevention in Process Industries, v. 40, p. 162-173, março 2016.

VASCONCELLOS, Brunna Santana de. Proposta de procedimento para projeto de controladores fuzzy multivariáveis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

VASCONCELOS, J.N., Fermentação Etanólica. In: SANTOS, F., BORÉM, A., CALDAS, C., Cana-de-Açúcar - Bioenergia, Açúcar e Álcool. Editora UFV, Minas Gerais, 2010.

VENTURINI FILHO, W. G.. Bebidas alcoólicas: Ciência e tecnologia. São Paulo: Blucher, 2010.

APÊNDICE A – Tabelas Análises Com Clarificado e Sem Clarificado

Neste Apêndice estão disponíveis os dados utilizados para avaliação dos resultados através do link abaixo, nele está disponível na íntegra os dados utilizados para realizar as análises estatísticas deste trabalho:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/12oLUqXbDLabV4azaSBzTTXsZ7RRErKv/edit?usp=sharing&ouid=109856596997356365635&rtpof=true&sd=true>

Abaixo demonstro trecho da tabela para ciência de como a mesma está estruturada, sendo que para tal tabela SP_BrixMosto representa os SetPoint desejados pelo operador, PV_BrixMosto representa os valores aferidos pelo equipamento Touché na planta e a PV_VazaoClarificado representa os valores de vazão indicada pelo transmissor de vazão.

Tabela 5 – Operação Preparo do Mosto Com Caldo Clarificado, Melaço e Água EVEREST Ativado.

timezone	SP_BrixMosto	PV_BrixMosto	DV_VazaoClarificado
16:30:03	21,00	21,67	133,47
16:30:08	21,00	21,69	133,80
16:30:09	21,00	21,69	133,85
16:30:13	21,00	21,73	133,74
16:30:18	21,00	21,76	134,11
16:30:23	21,00	21,79	134,65
16:30:28	21,00	21,81	135,39
16:30:33	21,00	21,88	135,13
16:30:38	21,00	21,95	134,98

Fonte: Repositório Pentagro, (2024)

Tabela 6 – Operação Preparo do Mosto Com Caldo Clarificado, Melaço e Água EVEREST Desativado.

timezone	SP_BrixMosto	PV_BrixMosto	DV_VazaoClarificado
10:34:47	21,00	20,80	121,46
10:50:08	21,00	20,82	121,26
10:34:37	21,00	20,85	121,20
10:34:42	21,00	20,83	121,20
10:34:42	21,00	20,83	121,16
10:34:57	21,00	20,74	121,15
10:47:48	21,00	20,19	121,12
10:47:43	21,00	20,14	121,12
10:50:13	21,00	20,78	121,12

Fonte: Repositório Pentagro, (2024)

Tabela 7 – Operação Preparo do Mosto Sem Caldo Clarificado, Apenas Melaço e Água EVEREST Ativado.

timezone	SP BrixMosto	PV BrixMosto	DV VazaoClarificado
13:00:04	21,00	21,52	0,05
13:00:09	21,00	21,50	0,04
13:00:14	21,00	21,51	0,06
13:00:19	21,00	21,51	0,06
13:00:24	21,00	21,50	0,05
13:00:25	21,00	21,50	0,04
13:00:29	21,00	21,49	0,05
13:00:34	21,00	21,48	0,05
13:00:39	21,00	21,50	0,04

Fonte: Repositório Pentagro, (2024)

Tabela 8 – Operação Preparo do Mosto Sem Caldo Clarificado, Apenas Melaço e Água EVEREST Desativado.

timezone	SP BrixMosto	PV BrixMosto	DV VazaoClarificado
01:14:02	21,00	19,12	0
01:14:02	21,00	19,12	0
01:14:07	21,00	19,16	0
01:14:12	21,00	19,17	0
01:14:17	21,00	19,17	0
01:14:22	21,00	19,21	0
01:14:27	21,00	19,23	0
01:14:32	21,00	19,25	0
01:14:32	21,00	19,25	0

Fonte: Repositório Pentagro, (2024)