



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

WALTER SPENCER DE HOLANDA NETTO

**REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUAL DA LAVAGEM DE CANA: ESTUDO
DE CASO APLICADO À PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL: Análise de
viabilidade teórica, quantificação de benefícios financeiros e redução de
perdas no processo**

Recife

2025

WALTER SPENCER DE HOLANDA NETTO

**REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUAL DA LAVAGEM DE CANA: ESTUDO
DE CASO APLICADO À PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL: Análise de
viabilidade teórica, quantificação de benefícios financeiros e redução de
perdas no processo**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado pelo aluno Walter Spencer de
Holanda Netto, ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia Química.

Orientador: Maurício Alves da Motta Sobrinho

Coorientadora: Nickolly Bukkyo Vieira Serafim

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Netto, Walter Spencer de Holanda.

Reaproveitamento de água residual da lavagem de cana: estudo de caso aplicado à produção de açúcar e etanol: Análise de viabilidade teórica, quantificação de benefícios financeiros e redução de perdas no processo / Walter Spencer de Holanda Netto. - Recife, 2025.

61

Orientador(a): Maurício Alves da Motta Sobrinho

Coorientador(a): Nickolly Bukkyo Vieira Serafim

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Reaproveitamento de água. 2. Indústria sucroalcooleira. 3. Melhoria contínua. 4. Recuperação de açúcar. 5. Análise financeira. I. Motta Sobrinho, Maurício Alves da. (Orientação). II. Serafim, Nickolly Bukkyo Vieira . (Coorientação). IV. Título.

660 CDD (22.ed.)

WALTER SPENCER DE HOLANDA NETTO

**REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA RESIDUAL DA LAVAGEM DE CANA: ESTUDO
DE CASO APLICADO À PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL: Análise de
viabilidade teórica, quantificação de benefícios financeiros e redução de
perdas no processo**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado pelo aluno Walter Spencer de
Holanda Netto, ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Graduação em
Engenharia Química.

Aprovado em: 07/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MAURICIO ALVES DA MOTTA SOBRINHO**
Data: 18/08/2025 21:21:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dr. Maurício Alves da Motta Sobrinho (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO CARLOS DUARTE COELHO**
Data: 11/09/2025 10:58:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Antônio Carlos Duarte Coelho

Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente
 **ARNALDO CESAR DANTAS DOS SANTOS ANDRA**
Data: 15/08/2025 18:32:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Arnaldo César Dantas dos Santos Andrade

Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho, com todo o meu carinho e gratidão, à minha família, que sempre acreditou em mim, até mesmo nos momentos em que duvidei de mim mesmo.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelos conselhos, e por serem meu alicerce em cada passo dessa jornada chamada vida.

À minha noiva, Maria Clara, por todo o amor, paciência e apoio nos momentos mais difíceis. Sua presença me fortalece e me dá motivação para continuar em frente.

Aos meus amigos que, com paciência e companheirismo, me ajudaram a seguir em frente, mesmo quando o cansaço era inegável, vocês o fizeram parecer pequeno quando comparado à nossa vontade.

E a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa conquista. Esse trabalho não é só meu, ele é nosso.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho representa não apenas o fim de um ciclo, mas também a soma dos esforços, apoio, incentivos e amor das pessoas que estiveram ao meu lado durante toda essa jornada.

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a vida, saúde, força e sabedoria nos momentos em que o caminho é árduo.

À minha família, minha base sólida e fonte de amor e ensinamentos. Obrigado por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidava, por vibrarem com cada pequena conquista, mesmo as que eu não fui capaz de vibrar e por me ensinarem o valor do esforço e da honestidade.

Aos meus pais, que sempre foram minha maior inspiração. Vocês me mostraram, com palavras e atitudes, o que significa persistir, lutar e nunca desistir dos próprios sonhos. Cada palavra de incentivo e cada gesto de cuidado me deram forças para seguir em frente.

À minha noiva, Maria Clara, meu amor e minha companheira para a vida. Obrigado por estar ao meu lado com paciência, carinho e compreensão, obrigado por me fazer suportar os dias que pareciam insuportáveis. Seu apoio, suas palavras nos momentos certos e sua confiança em mim foram fundamentais para que eu não desistisse. Esse trabalho também é seu, meu amor.

Aos meus amigos, companheiros de caminhada, que estiveram comigo em diferentes momentos dessa jornada. Seja com palavras de apoio, escuta atenta, e na maioria das vezes com uma boa dose de humor para aliviar o peso das cobranças, vocês fizeram toda a diferença. Sou grato por cada conversa, cada incentivo e cada lembrança dividida, vocês tornaram essa jornada mais leve.

A todos os professores que contribuíram com seu conhecimento e dedicação ao longo do curso, em especial ao meu orientador, por sua paciência e orientação técnica, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Por fim, a todos que, de alguma forma, deixaram sua marca no meu percurso: meu muito obrigado.

"Indo pelo caminho certo, não tem como dar errado."

— Jerônimo Barbosa de Souza - Vovô

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre um projeto de reaproveitamento da água residual da lavagem de cana-de-açúcar na Usina Petribu, com foco nos benefícios financeiros decorrentes da recuperação de açúcar e etanol, e uma posterior tentativa de adequação do projeto a técnicas de melhoria contínua. A indústria sucroalcooleira utiliza volumes significativos de água em seus processos, especialmente na lavagem da cana, gerando efluentes que contêm açúcares lixiviados. O reaproveitamento desta água representa não apenas uma prática ambientalmente responsável, mas também uma oportunidade de recuperação de subprodutos valiosos. A metodologia empregada envolveu a coleta de dados operacionais da usina, incluindo vazão da bomba, tempo de operação, teor de sacarose e açúcares redutores na água de lavagem, seguida de cálculos para quantificar o volume de água reaproveitada, a recuperação de açúcar e o potencial de produção de etanol. Os resultados demonstraram que, ao longo de uma safra de 255 dias, a usina reaproveitaria aproximadamente 15.300 m³ de água, recuperando cerca de 597 t de sacarose e 417 t de açúcares redutores. Considerando a estratégia de conversão da sacarose (80% para açúcar cristal e 20% para açúcares redutores), estimou-se uma produção adicional de aproximadamente 477 t de açúcar cristal e um potencial de 238m³ de etanol, representando um benefício financeiro bruto de aproximadamente R\$ 2,1 milhões por safra. A análise das ações implementadas pela usina revelou características de uma aplicação prática dos princípios do Ciclo PDCA e do Lean Thinking, com foco na identificação e eliminação de desperdícios. Conclui-se que a iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também gera benefícios econômicos significativos, demonstrando como a aplicação de práticas de melhoria contínua pode aumentar a competitividade e a resiliência das usinas sucroalcooleiras.

Palavras-chave: Reaproveitamento de água; indústria sucroalcooleira; melhoria contínua; recuperação de açúcar; análise financeira.

ABSTRACT

This paper presents a case study on a project to reuse wastewater from sugarcane washing at the Petribu Plant, focusing on the financial benefits arising from the recovery of sugar and ethanol, and a subsequent attempt to adapt the project to continuous improvement techniques. The sugar-energy industry uses significant volumes of water in its processes, especially in cane washing, which generates effluents containing leached sugars. Reusing this water represents not only an environmentally responsible practice but also an opportunity to recover valuable by-products. The methodology involved collecting operational data from the plant, including pump flow rate, operating time, and sucrose and reducing sugar content in the wash water. This data was then used to calculate the volume of water reused, the amount of sugar recovered, and the potential for ethanol production. The results demonstrated that over a 255-day harvest, the plant could reuse approximately 15,300 m³ of water, recovering about 597 tonnes of sucrose and 417 tonnes of reducing sugars. Considering a sucrose conversion strategy (80% to crystal sugar and 20% to reducing sugars), an additional production of approximately 477 tonnes of crystal sugar and a potential of 238 m³ of ethanol were estimated. This represents a gross financial benefit of approximately R\$ 2.1 million per harvest. The analysis of the actions implemented by the plant revealed characteristics of a practical application of PDCA Cycle principles and Lean Thinking, with a focus on identifying and eliminating waste. It is concluded that the initiative to reuse sugarcane wash water not only contributes to environmental sustainability but also generates significant economic benefits, demonstrating how the application of continuous improvement practices can increase the competitiveness and resilience of sugar-energy plants.

Keywords: Water reuse; sugar and ethanol industry; continuous improvement; sugar recovery; financial analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Melhoria Contínua: exemplos de metodologias	27
Figura 2 -	Processo de recepção e moagem da cana de açúcar	38
Figura 3 -	Resumo dos cálculos realizados	48
Quadro 1 -	Foco dos estudos já realizados	30
Quadro 2 -	Principais desafios enfrentados na implementação do sistema de reaproveitamento de água de lavagem e suas respectivas soluções	42

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 -	Esquema simplificado do uso da água na indústria sucroenergética	21
Fluxograma 2 -	Representação do fluxo de água de lavagem de cana atual da Usina Petribu	33
Fluxograma 3 -	Passo a passo da obtenção dos valores	35
Fluxograma 4 -	Representação do novo fluxo de água de lavagem de cana da Usina Petribu	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

\$Aç.	Preço do açúcar (R\$/kg)
\$ETOH	Preço do etanol (R\$/L)
A	Quantidade de açúcar a ser recuperado (kg)
AR.Ág.	Teor de açúcares redutores (AR) na água de lavagem
B	Brix da água (%)
d	Número de dias de operação na safra;
DiasSafra	Número de dias de operação na safra
E	Volume de etanol potencialmente produzido (L)
Fe	Fator de conversão de açúcar para etanol (aproximadamente 0,57 L/kg)
M.AR.Ág.	Massa de AR originalmente presente na água de lavagem por safra
M.AR.ETOH	Massa de AR disponível para produção de etanol (soma do AR originalmente presente na água com o AR proveniente da conversão da sacarose)
M.Sac.Ág.	Massa de sacarose na água de lavagem por safra
M.Sac.AR	Massa de sacarose convertida em AR
Pol.Ág.	Teor de sacarose (Pol) na água de lavagem
Prod.ETOH	Potencial de produção de etanol em litros (L)
Q	Vazão da bomba (m ³ /h)
Rec.Aç.	Retorno financeiro, por safra, com a venda do açúcar recuperado
Rec.ETOH	Retorno financeiro, por safra, com a venda do etanol recuperado
Rtotal	Retorno financeiro total (R\$)
T	Tempo de operação diária (h)
V	Volume total de água reaproveitada (m ³)
Vdia	Volume diário de água bombeada
Vsafra	Volume de água bombeada por safra
ρ	Densidade da solução (aproximadamente 1.000 kg/m ³ pode variar com o ° BRIX)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	O SETOR SUCROENERGÉTICO NO BRASIL	18
2.2	A USINA PETRIBU	19
2.3	PRÁTICAS JÁ CONSOLIDADAS NA USINA PETRIBU	19
2.4	A LAVAGEM DE CANA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA	20
2.5	REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA: TÉCNICAS E BENEFÍCIOS	22
2.6	MELHORIA CONTÍNUA: CONCEITOS, PRINCÍPIOS E FERRAMENTAS	25
2.7	ESTUDOS DE CASO SEMELHANTES E RELEVÂNCIA	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	31
3.2	LOCAL DO ESTUDO	31
3.3	COLETA E ANÁLISE DOS DADOS	32
3.4	MÉTODOS DE CÁLCULO	33
3.5	ABORDAGEM PARA IDENTIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE MELHORIA CONTÍNUA	35
4	ESTUDO DE CASO	37
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA USINA PETRIBU	37
4.2	PROCESSO DE LAVAGEM DE CANA NA USINA PETRIBU	37
4.3	INICIATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DE LAVAGEM	39
4.4	DESTINO DA ÁGUA E AÇÚCARES REAPROVEITADOS	40
4.5	IMPLEMENTAÇÃO E EVOLUÇÃO E SEUS DESAFIOS	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA REAPROVEITADA	44
5.2	ESTIMATIVA DE RECUPERAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL	45
5.3	ANÁLISE DO RETORNO FINANCEIRO	47
5.4	IDENTIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE MELHORIA CONTÍNUA	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6.1	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS QUANTITATIVOS	51
6.2	ANÁLISE DO RETORNO FINANCEIRO	52

6.3	IMPLICAÇÕES DA MELHORIA CONTÍNUA NO CONTEXTO DA USINA	53
6.4	COMPARAÇÃO COM LITERATURA	53
6.5	LIMITAÇÕES DO ESTUDO E SUGESTÕES FUTURAS	55
7	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A indústria de cana-de-açúcar desempenha um papel crucial na economia brasileira, principalmente na região Nordeste, sendo o país um dos maiores produtores mundiais de açúcar e etanol. Nesse contexto, a busca por processos mais eficientes e sustentáveis é algo constante, impulsionada tanto por questões econômicas quanto ambientais. A usina de cana-de-açúcar é caracterizada por ser um “sistema fechado”, onde o produto de cada etapa passa para a etapa seguinte, e os subprodutos são aproveitados de alguma forma.

Entre os subprodutos gerados, como bagaço (proveniente da moagem), o mel (oriundo da centrifugação) e o CO₂ (dióxido de carbono, coletado nas dornas de fermentação) que é oriundo da destilação, todos apresentam significativo retorno financeiro, sendo utilizados, respectivamente, na geração de energia, na produção de álcool e na comercialização do gás carbônico. Por outro lado, a gestão hídrica, embora conte com a maioria de seus estudos voltados à questão ambiental, e de redução de perdas através de seu reaproveitamento, raramente é abordada com foco no potencial de gerar receita. Dessa forma, ganha espaço como um desafio significativo, dado o considerável volume de água consumido nas diversas etapas de produção, especialmente na lavagem da cana-de-açúcar.

A água residual gerada nesse processo, se não tratada e reutilizada adequadamente, representa não apenas um desperdício de um recurso natural valioso, mas também uma perda de subprodutos que poderiam ser recuperados, como açúcares e, conseqüentemente, etanol.

O presente trabalho trata de um estudo de caso focado no reaproveitamento da água residual proveniente da lavagem de cana-de-açúcar na Usina Petribu, assim como na tentativa de associar a metodologia utilizada nesse processo, com técnicas de melhoria contínua. A relevância deste estudo se dá pela demonstração prática de como a otimização de processos pode levar a ganhos financeiros significativos, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade das operações industriais. A Usina Petribu, localizada em Pernambuco, é apresentada como um exemplo concreto da implementação de tais práticas, permitindo uma análise detalhada dos impactos e benefícios alcançados.

A problemática principal é a identificação e quantificação dos benefícios financeiros diretos advindos do reaproveitamento dessa água, considerando a recuperação de açúcares que seriam perdidos e seu potencial de conversão em etanol. Além disso, o trabalho busca identificar quais técnicas de melhoria contínua melhor se adequam ou descrevem as ações implementadas pela usina, fornecendo um referencial metodológico que pode ser adaptado por outras unidades do setor.

A justificativa para a realização deste estudo se baseia na crescente necessidade de otimização de recursos na agroindústria, que apesar de ser conhecida como um “ciclo fechado”, onde todos os subprodutos são reaproveitados de alguma forma, ainda necessita da continuidade dessa visão de melhoria contínua, e neste caso, com um enfoque particular nos aspectos financeiros. Em um mercado competitivo, a redução de perdas e o aumento da eficiência operacional são de suma importância para a viabilidade econômica das usinas.

O reaproveitamento da água da lavagem da cana, com a consequente recuperação de seus subprodutos, se relaciona diretamente com esses objetivos, transformando um resíduo em uma fonte de receita, ou em um acréscimo da receita já existente. O objetivo geral deste trabalho é descrever o processo de melhoria aplicado à empresa em questão, quantificar os benefícios esperados e relacionar esse procedimento com técnicas de melhoria contínua, aplicados ao processo de reaproveitamento da água residual da lavagem de cana na Usina Petribu, com foco nos impactos financeiros decorrentes da recuperação do açúcar e etanol presentes nessa água.

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Descrever o processo de lavagem de cana e o sistema de tratamento e reaproveitamento de água implementado na Usina Petribu.
- Quantificar o volume de água reaproveitada e o potencial de recuperação de açúcar e etanol a partir dos dados fornecidos pela usina (vazão da bomba, tempo de operação, Brix da água).
- Realizar uma análise do retorno financeiro obtido com a iniciativa de reaproveitamento.
- Identificar e discutir as técnicas de melhoria contínua que caracterizam as ações desenvolvidas pela usina no contexto do reaproveitamento hídrico.

- Contextualizar os resultados obtidos com a literatura técnica sobre gestão hídrica e melhoria contínua na indústria sucroalcooleira.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão abordados conceitos sobre a indústria sucroalcooleira, o uso da água, técnicas de reaproveitamento, fundamentos da melhoria contínua e estudos correlatos, fornecendo assim, base para o que será tratado no decorrer do trabalho.

2.1 O SETOR SUCROENERGÉTICO NO BRASIL

O setor sucroenergético brasileiro representa um pilar fundamental para a economia do país, destacando-se globalmente pela sua capacidade de produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar. Com uma história que se inicia na época da colonização, a indústria evoluiu de um modelo que, inicialmente, era açucareiro, para um complexo agroindustrial que integra a produção de alimentos e energia renovável. O Brasil consolidou-se como o maior produtor e exportador de açúcar, além de ser um dos líderes na produção de etanol, um biocombustível que desempenha um papel crucial na matriz energética nacional, contribuindo significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

A relevância econômica do setor se manifesta na geração de milhões de empregos diretos e indiretos, impulsionando o desenvolvimento regional em diversas partes do país, especialmente nas regiões Centro-Sul e Nordeste. Além dos produtos principais, o setor também se destaca pela cogeração de energia elétrica a partir do bagaço da cana, um subproduto do processo industrial, o qual adiciona valor à cadeia produtiva e contribui para a segurança energética do país.

No entanto, o setor enfrenta desafios contínuos relacionados à sustentabilidade, como a gestão do uso da água, o tratamento de efluentes, a otimização do uso da terra e a mecanização do corte da cana, que demandam constante inovação e aprimoramento das práticas agrícolas e industriais. A busca por maior eficiência e menor impacto ambiental é incessante, impulsionada por regulamentações mais rigorosas e pela crescente demanda por produtos e processos sustentáveis por parte dos consumidores e mercados internacionais.

2.2 A USINA PETRIBU

A Usina Petribu, localizada em Lagoa do Itaenga, Pernambuco, Brasil, é uma das tradicionais unidades produtoras de açúcar e etanol do Nordeste brasileiro. Com 296 anos de história, é considerada a mais antiga usina em funcionamento do mundo. Trata-se de uma empresa com aproximadamente 5.000 funcionários, que desempenha um papel de extrema importância na economia da Zona da Mata Norte.

Com um recorde de moagem de cana-de-açúcar de 1.800.000 toneladas por safra, a Petribu se dedica à produção de açúcar, etanol, energia e CO₂, utilizando tecnologias modernas que visam otimizar o processo produtivo e garantir a qualidade de seus produtos. Ao longo de sua trajetória, a Usina Petribu tem demonstrado um compromisso com a inovação e a busca por maior eficiência em suas operações.

Embora o foco principal deste trabalho seja o reaproveitamento de água, é importante ressaltar que a usina já possui um histórico de investimentos em tecnologias e práticas que visam aprimorar seus processos e reduzir seu impacto ambiental. Este estudo de caso aprofundará a análise de uma das iniciativas da Usina Petribu, apresentando como a empresa tem enfrentado os desafios e aproveitado oportunidades relacionadas à constante busca por competitividade no cenário sucroenergético brasileiro.

2.3 PRÁTICAS JÁ CONSOLIDADAS NA USINA PETRIBU

A Usina Petribu, em sua busca contínua por excelência operacional e sustentabilidade, tem implementado e consolidado diversas práticas que refletem seu compromisso com a gestão eficiente de recursos e a minimização de impactos ambientais. Essas iniciativas formam a base sobre a qual novos projetos, como o de reaproveitamento de água, são desenvolvidos.

No que tange à gestão de recursos e eficiência operacional, a usina adota medidas para otimizar o consumo de energia, utilizando o bagaço da cana para geração de vapor (utilizado em diversas etapas do processo produtivo) e cogeração de eletricidade, o que não apenas reduz a dependência de fontes externas, mas também transforma um resíduo em um valioso subproduto.

Além disso, há um foco constante na otimização dos processos industriais, desde a moagem até a cristalização e destilação, buscando reduzir perdas e aumentar a produtividade. Em termos de programas de sustentabilidade e meio ambiente, a Usina Petribu possui políticas de gestão de resíduos que incluem o uso da torta de filtro como fertilizante aplicado no plantio da cana, promovendo a ciclagem de nutrientes e reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos. O controle de emissões atmosféricas, a política de créditos de carbono e a gestão de efluentes (incluindo o projeto de reaproveitamento de água) também são realizados na empresa, com monitoramento constante para garantir o cumprimento das normas ambientais.

Nesse contexto, percebe-se que a cultura de melhoria contínua, embora não formalizada sob um único programa como Lean ou Six Sigma, está intrinsecamente presente no dia a dia da operação. A usina incentiva a identificação de oportunidades de aprimoramento por parte de seus colaboradores e investe na capacitação da equipe para que possam contribuir ativamente para a otimização dos processos. A adoção de sistemas de monitoramento de indicadores de desempenho permite a análise de dados e a tomada de decisões baseadas em evidências, impulsionando a busca por soluções inovadoras.

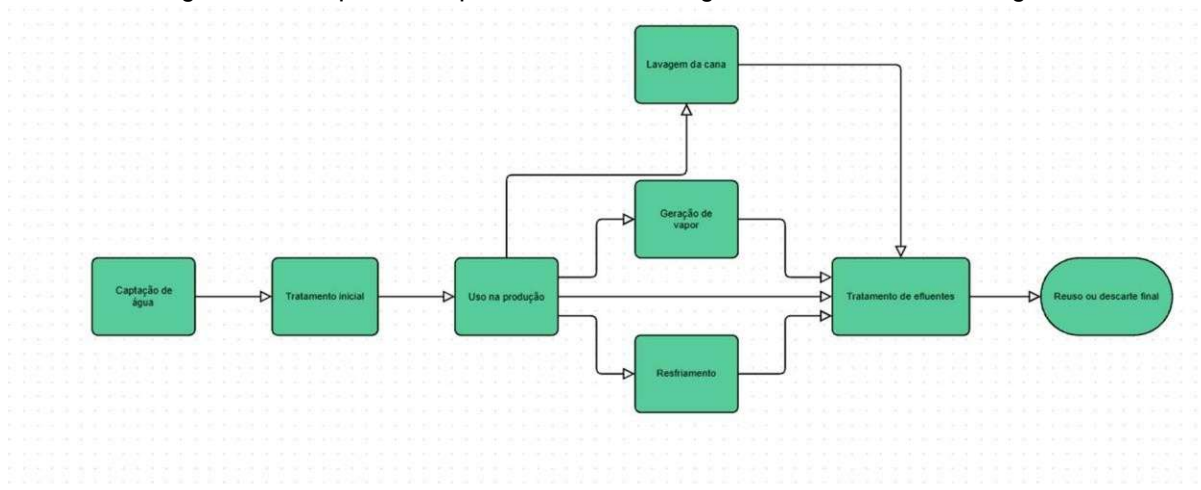
Esses investimentos em tecnologia e inovação, juntamente com as práticas consolidadas de gestão, posicionam a Usina Petribu como uma organização que busca constantemente aprimorar suas operações, tornando o projeto de reaproveitamento de água um passo natural em sua jornada rumo a uma maior sustentabilidade e eficiência industrial. Este contexto de práticas já estabelecidas é fundamental para compreender a viabilidade e o impacto do estudo de caso apresentado neste trabalho.

2.4 A LAVAGEM DE CANA NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A indústria sucroalcooleira no Brasil é um setor de grande importância econômica e social, posicionando o país como um dos líderes globais na produção de açúcar e etanol. Historicamente, a expansão do agronegócio esteve intrinsecamente ligada à disponibilidade de recursos naturais, entre os quais, a água se destaca como insumo fundamental em diversas etapas do processo produtivo. Além de sua

aplicação direta na produção de açúcar, a água também é amplamente utilizada nas plantas industriais integradas à usina, como na destilaria (lavagem de dornas) e na geração de gás carbônico (lavagem do CO₂).

Fluxograma 1 - Esquema simplificado do uso da água na indústria sucroenergética



Fonte: O autor (2025)

Como é visto no Fluxograma 1, a água é de extrema importância para o processo produtivo do açúcar a partir da cana, sendo utilizado em diversas etapas. Desde a irrigação da lavoura de cana-de-açúcar, quando aplicável, até as operações industriais de extração, processamento e fermentação, a água é utilizada em volumes consideráveis. Uma das etapas que tradicionalmente demanda um volume expressivo de água é a lavagem da cana colhida. Este processo visa remover impurezas minerais (terra, areia, pedras) e vegetais (palhas, folhas) que acompanham a matéria-prima e que podem prejudicar a eficiência da moagem e a qualidade dos produtos finais (HUGOT, 1986; REIN, 2007). Estudos realizados por Buarque *et al.* (2003) em 10 parques industriais do estado de Alagoas demonstraram que o consumo de água no setor sucroalcooleiro varia significativamente, desde 0,7m³ até 12,2m³ por tonelada de cana esmagada. Esta ampla variação decorre das condições climáticas locais e das diferenças nos processos produtivos, especialmente pela existência ou não de recirculação de água em determinadas etapas. Segundo Nascimento *et al.* (2016), a água utilizada na lavagem da cana representa cerca de 25% do consumo total de água nas usinas, acarretando custos consideráveis para captação e outorga. Marcondes (2018) complementa que o setor canavieiro está entre os maiores consumidores de água para o desenvolvimento de suas atividades, sendo

responsável por aproximadamente 23% da demanda por água no estado de São Paulo.

A água utilizada na lavagem da cana, ao entrar em contato com a matéria-prima e suas impurezas, transforma-se em um efluente conhecido como "água de lavagem de cana". Durante o processo de tombamento da carga de cana, a planta passa pela mesa niveladora, que é necessária para desfazer certos aglomerados de cana que dificultariam sua lavagem, entre outros equipamentos próprios do setor de recepção. Durante esse primeiro processo de uma usina, a cana tem sua estrutura levemente danificada, o que não influencia diretamente no processo, mas acaba facilitando a retirada da sacarose, que antes estava protegida por sua composição natural. Já na etapa de lavagem da cana, este efluente (água) carrega consigo não apenas os resíduos sólidos removidos, mas também uma quantidade significativa de açúcares lixiviados da própria cana, principalmente sacarose. A quantidade de açúcar perdida nesta etapa pode variar consideravelmente dependendo de fatores como o sistema de colheita (manual ou mecanizada, com ou sem queima), o tempo decorrido entre o corte e o processamento, as condições da cana (inteira ou picada) e a intensidade do processo de lavagem (REIN, 2007).

A geração deste efluente rico em matéria orgânica e sólidos suspensos representa um desafio ambiental e uma perda econômica para as usinas. O descarte inadequado pode levar à contaminação de corpos hídricos, enquanto a perda de açúcares impacta diretamente o rendimento industrial (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Nas últimas décadas, a crescente conscientização ambiental e a busca por maior eficiência econômica têm impulsionado o setor sucroalcooleiro a adotar práticas mais sustentáveis na gestão de seus recursos hídricos. A redução do consumo de água fresca e o tratamento e reuso de efluentes tornaram-se prioridades. No contexto da lavagem da cana, isso se traduz na busca por sistemas de limpeza a seco ou com menor consumo de água, por meio de uma pré-lavagem, do reaproveitamento da água utilizada no processo e, fundamentalmente, do desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento e reaproveitamento da água de lavagem, visando não apenas a recirculação da água no processo, mas a recuperação dos açúcares dissolvidos (MORAES *et al.*, 2015).

2.5 REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA: TÉCNICAS E BENEFÍCIOS

O reaproveitamento da água na indústria sucroalcooleira, especialmente da água de lavagem da cana, envolve uma série de técnicas que visam remover impurezas e recuperar componentes valiosos. As abordagens podem variar desde sistemas simples de decantação e peneiramento até processos mais sofisticados envolvendo tratamento físico-químico e biológico. A escolha da técnica ou combinação de técnicas depende da qualidade desejada para a água de reuso e dos objetivos específicos da usina, como a maximização da recuperação de açúcares ou a minimização do impacto ambiental (SILVA *et al.*, 2019). Entre as técnicas comumente empregadas, destacam-se:

- **Gradeamento e desarenação:** utilizada para separar sólidos suspensos mais finos pela ação da gravidade. A eficiência pode ser aumentada com o uso de coagulantes e floculantes, que aglomeram as partículas menores, facilitando sua sedimentação (HUGOT, 1986). Omena *et al.* (2011), em estudo realizado na Usina Coruripe em Alagoas, observaram que o circuito de água de lavagem de cana apresentava taxa de aplicação de 5,6 m³/TC (tonelada de cana), com elevada fração de água de reposição (92,5% da demanda).
- **Filtração:** emprega meios porosos para remover partículas ainda menores. Existem diversos tipos de filtros, como os de areia, de tela ou membranas, cada um com sua especificidade e capacidade de retenção.
- **Flotação:** técnica que utiliza a introdução de bolhas de ar para levar partículas suspensas à superfície, onde são removidas. É eficaz para remover óleos, graxas e sólidos de baixa densidade.
- **Processos Biológicos:** como lodos ativados ou reatores anaeróbios, são utilizados para remover matéria orgânica dissolvida, incluindo os açúcares. Entretanto, para o objetivo de recuperação de açúcar, esses processos seriam contraproducentes se aplicados antes da extração dos açúcares.
- **Clarificação e Tratamentos Avançados:** para fins específicos, como a recuperação de açúcar para reincorporação ao processo principal, podem ser necessários tratamentos mais avançados para garantir a qualidade da água e do açúcar recuperado, evitando contaminações (ARAÚJO, 2017 – Tese UFPE). Dentre os quais pode-se citar a clarificação físico-química, que envolve a

adição de coagulantes (como sais de alumínio ou ferro) e floculantes (polímeros) que desestabilizam as partículas em suspensão e promovem sua aglomeração em flocos maiores e mais densos. Esses flocos podem então ser removidos por decantação ou flotação. A água clarificada é então utilizada, por exemplo, para a lavagem de filtros ou para a preparação de soluções em outras etapas do processo. A escolha dos produtos químicos e suas dosagens é crítica para otimizar a formação de flocos e a eficiência da remoção de impurezas; e a troca iônica, que emprega resinas para substituir íons indesejáveis na água por outros menos prejudiciais. É eficaz na remoção de sais e na desmineralização da água, sendo importante para garantir a qualidade da água de processo e evitar incrustações. Porém, a influência que os métodos citados teriam na qualidade do açúcar final, ainda não pode ser mensurada com segurança.

Entre os benefícios do reaproveitamento da água de lavagem da cana destacam-se:

Benefícios Econômicos: O principal benefício financeiro é a recuperação dos açúcares que seriam perdidos. Estes açúcares podem ser reintegrados ao processo de produção de açúcar ou, mais comumente, direcionados para a fermentação, aumentando a produção de etanol sem a necessidade de processar mais cana. Além disso, a redução do consumo de água fresca diminui os custos de captação e tratamento, e a minimização do volume de efluentes a serem tratados ou descartados também gera economia (SINDACUCAR, 2024 – adaptado de "Cana de Tudo", que discute a economia circular no setor). Bonassa *et al.* (2015) identificam a água de lavagem como um dos principais subprodutos gerados na indústria alcooleira, destacando seu potencial de aproveitamento para geração de valor.

Benefícios Ambientais: A redução da captação de água de mananciais preserva os recursos hídricos, um aspecto cada vez mais crítico frente às mudanças climáticas e ao aumento da demanda por água. O tratamento e reuso dos efluentes diminuem o lançamento de poluentes nos corpos receptores, reduzindo o impacto ambiental da atividade industrial e contribuindo para a conformidade com as legislações ambientais (MORAES *et al.*, 2015). O Relatório de Impacto ao Meio Ambiente da LDC Bioenergia (2010) destaca a importância da gestão adequada dos

efluentes líquidos industriais, incluindo a água de lavagem de cana, para a minimização dos impactos ambientais da atividade.

Aumento da Eficiência Operacional: A recirculação da água e a recuperação de subprodutos otimizam o uso dos insumos e reduzem perdas, contribuindo para uma operação mais eficiente e otimizada.

Embora a literatura técnica e científica sobre o reaproveitamento de água na indústria sucroalcooleira seja extensa, a maioria dos estudos foca nos aspectos ambientais e na redução do consumo de água. A redução das perdas da sacarose por lixiviação junto às impurezas da cana é mencionada, mas com menor ênfase na quantificação dos benefícios financeiros diretos advindos da recuperação de açúcares e sua conversão em produtos de valor comercial. Esta lacuna reforça a relevância de estudos como o presente trabalho, que busca quantificar o retorno financeiro da iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana na Usina Petribu.

Uma alternativa tecnológica emergente que vem ganhando espaço no setor é a lavagem a seco da cana-de-açúcar. Segundo Marcondes (2018), com o aumento da mecanização da colheita, a lavagem convencional tornou-se menos indicada, uma vez que ocorre maior perda de sacarose. Porém, o uso de máquinas para efetuar o corte da cana, ainda é uma técnica emergente no estado de Pernambuco (a colheita é mecanizada, mas parcialmente), diferentemente da região Sudeste, devido ao fato de o terreno no Nordeste ser consideravelmente mais acidentado, diminuindo assim, a eficiência do corte realizado pelas máquinas neste tipo de relevo. A autora destaca que a lavagem a seco possui várias vantagens, como economia de água, aumento da capacidade de moagem, redução no volume de torta de filtro e a utilização da palha como combustível suplementar de energia. Esta tecnologia utiliza sopradores e peneiramentos para separar a palha antes de a cana ir para o picador, eliminando a necessidade de água no processo de limpeza.

2.6 MELHORIA CONTÍNUA: CONCEITOS, PRINCÍPIOS E FERRAMENTAS

A Melhoria Contínua é uma filosofia de gestão que busca o aperfeiçoamento constante de processos, produtos e serviços através de pequenas e incrementais mudanças realizadas de forma sistemática e participativa por todos os colaboradores

de uma organização. Originada no Japão, especialmente com os conceitos desenvolvidos pela Toyota (Sistema Toyota de Produção), a melhoria contínua se baseia na premissa de que sempre há uma forma melhor de realizar uma tarefa e que a busca por essa otimização deve ser incessante (KAIZEN. O que é Kaizen? 2023 - leanproduction.com/kaizen).

Os princípios fundamentais da Melhoria Contínua incluem:

- **Foco no Cliente:** Entender e atender às necessidades e expectativas dos clientes (internos e externos).
- **Envolvimento de Todos:** A melhoria é responsabilidade de todos na organização, desde a alta gerência até o chão de fábrica.
- **Abordagem de Processo:** Entender os processos como uma sequência de atividades que agregam valor e buscar sua otimização.
- **Tomada de Decisão Baseada em Dados:** Coletar e analisar dados para identificar problemas, causas raízes e monitorar os resultados das melhorias.
- **Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act):** Uma metodologia iterativa para implementar melhorias. planejar (Plan), executar (Do), verificar (Check) e agir (Act) corretivamente ou para padronizar.
- **Prevenção de Erros:** Focar na prevenção de problemas em vez de apenas na sua correção.
- **Padronização:** Uma vez que uma melhoria é implementada e validada, ela deve ser padronizada para garantir sua sustentabilidade.

Diversas ferramentas e metodologias podem ser utilizadas no âmbito da Melhoria Contínua, tais como:

- **PDCA (Ciclo de Deming):** Como mencionado, é a espinha dorsal de muitas iniciativas de melhoria.
- **Kaizen:** Termo japonês que significa "mudança para melhor" ou "melhoria contínua". Envolve a realização de pequenos eventos de melhoria focados (eventos Kaizen) ou uma cultura de sugestões e pequenas melhorias diárias.
- **Lean Manufacturing (Produção Enxuta):** Foca na eliminação de desperdícios (Muda, palavra japonesa que se refere à perdas, desperdícios) em todas as formas

(superprodução, espera, transporte, processamento excessivo, estoque, movimentação, defeitos).

- **Six Sigma:** Uma metodologia disciplinada e baseada em dados para eliminar defeitos e reduzir a variabilidade nos processos (DMAIC: Definir, Medir, Analisar, Melhorar – Improve, Controlar).
- **FMEA (Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos):** Ferramenta proativa para identificar potenciais falhas em um processo ou produto e suas consequências, permitindo a implementação de ações preventivas.
- **5S (Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke):** Metodologia para organizar o local de trabalho, promovendo eficiência, segurança e qualidade.
- **Diagrama de Ishikawa (Espinha de Peixe):** Ferramenta para identificar as possíveis causas de um problema.
- **Benchmarking:** Comparar processos e práticas com os de outras organizações (líderes de mercado ou de outros setores) para identificar oportunidades de melhoria.

Figura 1 - Melhoria Contínua: exemplos de metodologias



Fonte: upflux (2025)

A Figura 1 ilustra diversas metodologias voltadas à melhoria contínua de processos, cada uma com foco específico. Dentre elas, destacam-se o Ciclo PDCA (Planejar, Fazer, Verificar, Agir) e o DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar), que oferecem abordagens estruturadas para a otimização. O Lean visa a redução de desperdícios e a melhoria da eficiência, enquanto o Six Sigma foca na eliminação de defeitos por meio de técnicas estatísticas. Outras metodologias importantes incluem a Teoria das Restrições (TOC) para identificar gargalos; o 5S para organização e padronização do ambiente; o Kaizen, que promove mudanças incrementais com envolvimento dos funcionários; e a Gestão da Qualidade Total (TQM), que propõe uma abordagem abrangente da qualidade.

No contexto do reaproveitamento de água na Usina Petribu, a identificação da técnica de melhoria contínua mais adequada envolverá o PDCA e a análise das ações implementadas e seus resultados.

2.7 ESTUDOS DE CASO SEMELHANTES E RELEVÂNCIA

A literatura técnica apresenta diversos estudos de caso sobre o reaproveitamento de água e a aplicação de práticas de gestão ambiental e melhoria de processos na indústria sucroalcooleira. Muitos desses trabalhos focam nos benefícios ambientais da redução do consumo de água e do tratamento de efluentes (MORAES *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2019). Outros exploram os ganhos de eficiência e a recuperação de subprodutos, embora nem sempre com um detalhamento financeiro tão específico quanto o proposto neste estudo, realizado neste trabalho.

Um estudo relevante foi realizado por Omena *et al.* (2011) na Usina Coruripe, localizada no município de Coruripe-AL, onde a demanda de água para lavagem de cana é uma das maiores. Os autores realizaram um balanço hídrico e uma avaliação da qualidade dessas águas, com o objetivo de avaliar opções de reuso interno para minimizar a quantidade de água captada pela usina. Constatou-se que o circuito de água de lavagem de cana tinha taxa de aplicação de 5,6 m³/TC (metros cúbicos por tonelada de cana), com elevada fração de água de reposição, correspondendo a 92,5% da demanda.

Apesar dessa alta taxa de reposição, a carga orgânica dessa água, medida como DQO (demanda química e oxigênio), apresentava valores inferiores aos citados

na literatura, indicando um potencial de otimização do sistema. Nascimento *et al.* (2016) destacam a importância dos separadores sólido-líquido para a remoção de particulados na água de lavagem de cana, visando sua recirculação. Os autores enfatizam que a recirculação da água de lavagem requer tratamentos para manutenção da qualidade e eliminação de partículas capazes de provocar desgaste em bombas e tubulações.

Este estudo reforça a necessidade de investimentos em tecnologias de tratamento para viabilizar o reaproveitamento da água de maneira eficiente. Uma abordagem alternativa é apresentada por Marcondes (2018), que discute o processo de lavagem a seco da cana-de-açúcar como uma solução para eliminar o consumo de água nesta etapa. A autora argumenta que, com o aumento da mecanização da colheita, a lavagem convencional tornou-se menos indicada devido à maior perda de sacarose. A lavagem a seco, utilizando sopradores e peneiramentos, apresenta vantagens como economia de água, aumento da capacidade de moagem, redução no volume de torta de filtro e aproveitamento da palha como combustível.

Bonassa *et al.* (2015) abordam os subprodutos gerados na produção de bioetanol, incluindo a água de lavagem, e apresentam soluções para diminuir o impacto ambiental e gerar novos produtos a partir destes resíduos. Os autores destacam que a produção de cana-de-açúcar no Brasil é objetivada para atender às necessidades e metas ligadas à produção de etanol do mercado interno e externo, e que o aproveitamento adequado dos subprodutos pode contribuir significativamente para a sustentabilidade e rentabilidade do setor. Buarque *et al.* (2003) analisam os critérios de demandas hídricas para a outorga de uso da água no setor sucroalcooleiro, destacando a importância do conhecimento preciso do consumo de água pelos diversos setores da sociedade para a gestão adequada dos recursos hídricos.

Os autores apontam que a carência de informações sobre o consumo de água dificulta a análise dos pedidos de outorga em mananciais, sejam eles superficiais ou subterrâneos, e que o setor sucroalcooleiro é um importante consumidor de água. Por exemplo, Oliveira *et al.* (2013) discutem os impactos ambientais da agroindústria canavieira e as tecnologias para mitigação, incluindo o reúso da água. Documentos setoriais, como o "Cana de Tudo" (SINDACUCAR, 2024), destacam a evolução do setor bioenergético em direção à sustentabilidade e à economia circular, onde o

reaproveitamento de todos os coprodutos, incluindo a água e os açúcares nela contidos, é fundamental. A tese de Araújo (2017) da UFPE, embora focada na purificação do caldo, aborda princípios de separação e tratamento que podem ser análogos aos necessários para o tratamento da água de lavagem visando a recuperação de sacarose. No Quadro 1, constam as características principais dos estudos dos autores citados.

Quadro 1 - Foco dos estudos já realizados

Autor	Foco do estudo
Omena <i>et al.</i> (2011)	Reuso interno da água
Nascimento <i>et al.</i> (2016)	Remoção de particulados - para reuso interno
Marcondes (2018)	Lavagem a seco
Bonassa <i>et al.</i> (2015)	Apontamento dos subprodutos gerados

Fonte: O autor (2025).

A especificidade do presente estudo se caracteriza pela combinação da análise técnica do processo de reaproveitamento de água de lavagem de cana com uma avaliação detalhada dos retornos financeiros diretos, assim como a identificação da filosofia de melhoria contínua que embasa as práticas adotadas pela Usina Petribu. Esta perspectiva contribui para preencher uma lacuna na literatura, que tradicionalmente prioriza os aspectos ambientais do reaproveitamento de água, ao fornecer um exemplo prático e quantificado dos benefícios econômicos que pode servir de referência para outras usinas que buscam otimizar sua gestão hídrica e financeira.

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho representa um estudo de caso descritivo e analítico, com abordagem qualiquantitativa. O estudo de caso foi escolhido como método por permitir uma investigação, apesar de embasada na teoria, empírica, pois é aprofundada de um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes (YIN, 2015).

No presente trabalho, o fenômeno investigado é a associação de técnicas de melhoria, contínua, aplicadas ao reaproveitamento da água residual da lavagem de cana na Usina Petribu, com foco nos benefícios financeiros decorrentes da recuperação de açúcar e etanol.

A abordagem qualiquantitativa se justifica pela natureza do objeto de estudo, que demanda tanto uma compreensão dos processos e técnicas implementados (aspecto qualitativo) quanto a mensuração dos resultados obtidos em termos de volume de água reaproveitada, teor de açúcares nela presente, e por conseguinte, quantidade de açúcar recuperado, potencial de produção de etanol e retorno financeiro (aspecto quantitativo).

A pesquisa também possui caráter descritivo, pois busca detalhar o processo de lavagem de cana e o sistema de reaproveitamento de água implementado na usina, e analítico, ao examinar os dados coletados para identificar a técnica de melhoria contínua aplicada e quantificar os benefícios financeiros obtidos.

3.2 LOCAL DO ESTUDO

O estudo foi realizado na Usina Petribu, localizada em Lagoa do Itaenga, Pernambuco, Brasil. A Usina Petribu é uma tradicional produtora de açúcar e etanol do Nordeste brasileiro, com 296 anos de história, sendo a mais antiga usina ainda em funcionamento do mundo. A escolha desta usina como objeto de estudo se deve à implementação de um sistema de reaproveitamento da água residual da lavagem de cana, o que permite a análise dos benefícios financeiros desta prática e a associação das técnicas aplicadas às técnicas de melhoria contínua mencionadas.

3.3 COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos diretamente pela Usina Petribu e incluem:

- Vazão da bomba que bombeia a água de lavagem;
- Tempo de operação diária da bomba;
- Brix da água de lavagem (indicador da concentração de sólidos solúveis);
- Descrição do sistema de lavagem de cana antes da implementação do reaproveitamento;
- Detalhes do sistema de reaproveitamento implementado;
- Informações sobre o destino da água reaproveitada e dos açúcares recuperados;
- Valores de mercado do açúcar e do etanol para cálculo do retorno financeiro.

Além dos dados primários adquiridos na usina, foram utilizados dados secundários provenientes da literatura técnica e científica para contextualização, comparação e fundamentação teórica. Estes incluem livros de referência no setor sucroalcooleiro, como os de E. Hugot e Peter Rein, artigos científicos sobre reaproveitamento de água e melhoria contínua, e documentos técnicos do setor.

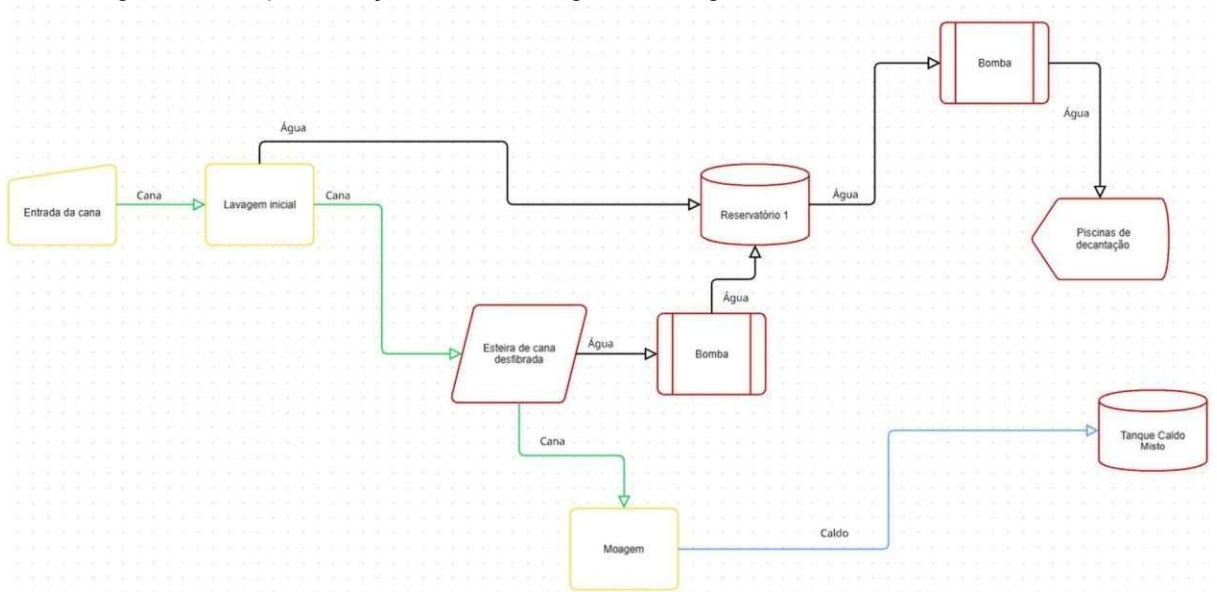
A análise dos dados foi realizada em etapas, combinando métodos qualitativos e quantitativos:

- Definição do sistema de lavagem de cana e do processo de reaproveitamento da água residual;
- Identificação dos fluxos de água e açúcares no sistema;
- Cálculo do volume total de água reaproveitada, com base na vazão da bomba e no tempo de operação;
- Estimativa da quantidade de açúcar recuperado, utilizando o brix da água e o volume total;
- Cálculo do potencial de produção de etanol a partir do açúcar recuperado, considerando fatores de conversão padrão da indústria;
- Análise preliminar do retorno financeiro, multiplicando as quantidades de açúcar e etanol pelos seus respectivos valores de mercado;
- Identificação das características das ações implementadas pela usina;

- Comparação com os princípios e ferramentas das principais técnicas de melhoria contínua (PDCA, Kaizen, Lean Manufacturing, Six Sigma etc.);
- Determinação da técnica ou combinação de técnicas que melhor descreve a abordagem adotada.

No Fluxograma 2, está representado o funcionamento atual, do processo de lavagem de cana na Usina Petribu

Fluxograma 2 - Representação do fluxo de água de lavagem de cana atual da Usina Petribu



Fonte: O autor (2025)

3.4 MÉTODOS DE CÁLCULO

Para a quantificação dos benefícios financeiros do reaproveitamento da água de lavagem de cana, foram utilizados os seguintes métodos de cálculo:

$$V = Q \cdot t \cdot d$$

(1)

Em que:

V = Volume total de água reaproveitada (m³)

Q = Vazão da bomba (m³/h)

t = Tempo de operação diária (h)

d = Número de dias de operação na safra;

$$\square = \square \square \square \square \square \square 10 \square 0,8 \quad (2)$$

Onde:

A = Quantidade de açúcar a ser recuperado (kg)

V = Volume total de água reaproveitada (m³)

B = Brix da água (%)

ρ = Densidade da solução (aproximadamente 1.000 kg/m³ pode variar com o °Brix)

10 = Fator de conversão de percentual para kg/m³

0,8 = Fator de conversão de sacarose para açúcar cristal

$$\square = \square \square \square \square \quad (3)$$

Sendo:

E = Volume de etanol potencialmente produzido (L)

A = Quantidade de açúcar recuperado (kg)

Fe = Fator de conversão de açúcar para etanol (aproximadamente 0,57 L/kg)

$$\square\square\square\square\square = (\square \square \$\square_{\text{ç.}}) + (\square \square \$\square\square\square\square) \quad (4)$$

Onde:

R_{total} = Retorno financeiro total (R\$)

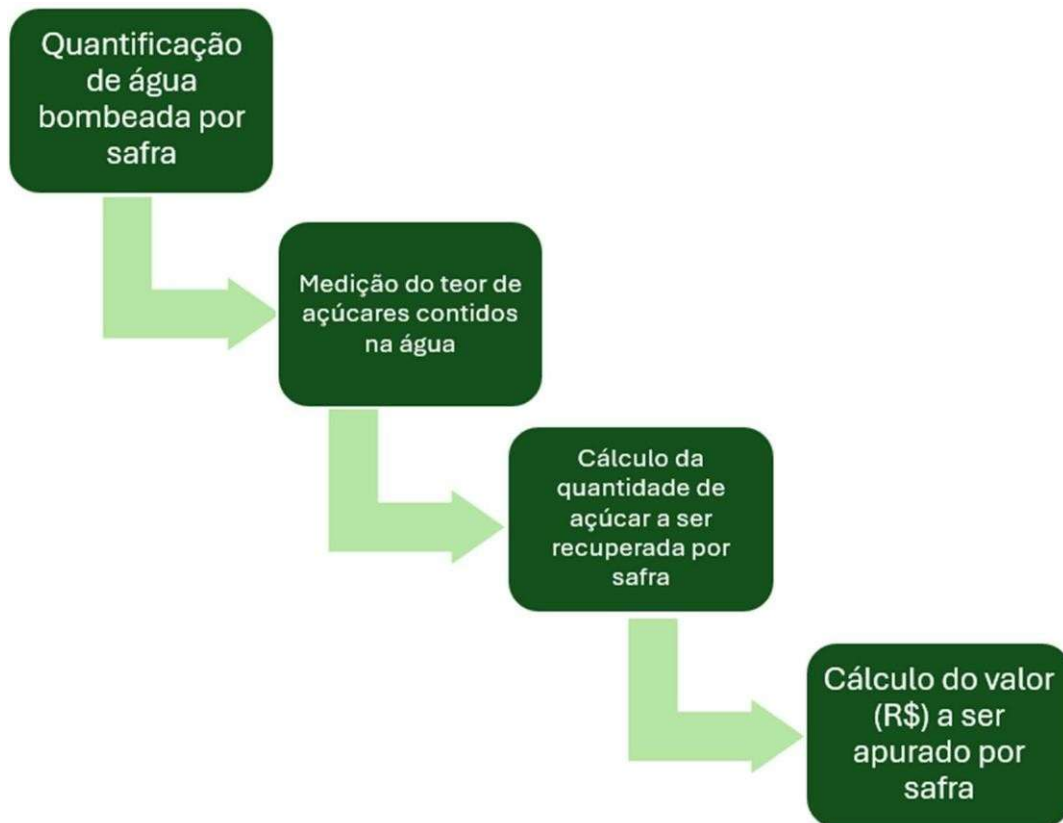
A = Quantidade de açúcar recuperado (kg)

\$Aç. = Preço do açúcar (R\$/kg)

E = Volume de etanol potencialmente produzido (L)

\$ET|OH = Preço do etanol (R\$/L)

Fluxograma 3 - Passo a passo da obtenção dos valores recuperados



Fonte: O autor (2025).

No Fluxograma 3, constam as etapas realizadas para a obtenção dos valores a serem recuperados.

Estes cálculos permitem uma estimativa conservadora dos benefícios financeiros diretos do reaproveitamento da água de lavagem de cana, considerando apenas a recuperação de açúcares. Benefícios adicionais, como a redução no consumo de água, custos com tratamento de efluentes e geração de CO₂ (subproduto da geração de etanol, também comercializado pela empresa), não foram quantificados neste estudo devido à limitação de dados disponíveis, mas são reconhecidos como potenciais ganhos adicionais.

3.5 ABORDAGEM PARA IDENTIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE MELHORIA CONTÍNUA

Para identificar qual técnica de melhoria contínua melhor se aplica ou descreve as ações implementadas pela Usina Petribu no contexto do reaproveitamento da água de lavagem de cana, foi adotada uma abordagem comparativa. As características das ações implementadas foram analisadas e comparadas com os princípios, ferramentas e metodologias das principais técnicas de melhoria contínua, incluindo:

PDCA (Plan-Do-Check-Act):

- Presença de ciclos de planejamento, execução, verificação e ação corretiva;
- Abordagem sistemática para resolução de problemas;
- Foco na melhoria incremental e contínua;

Kaizen:

- Implementação de pequenas melhorias incrementais;
- Envolvimento de equipes multifuncionais;
- Foco na eliminação de desperdícios e na simplificação de processos;

Lean Manufacturing:

- Identificação e eliminação de desperdícios (Muda);
- Otimização do fluxo de valor;
- Busca pela perfeição através da melhoria contínua;

Six Sigma:

- Abordagem baseada em dados para redução de variabilidade;
- Uso de metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*);
- Foco na redução de defeitos e na melhoria da qualidade;
- Análise de elementos de outras metodologias ou de abordagens híbridas que possam caracterizar as ações implementadas.

A identificação da técnica mais adequada foi realizada através da análise do processo de implementação do sistema de reaproveitamento, das ferramentas utilizadas, da abordagem adotada para resolução de problemas e dos resultados obtidos. Esta análise permite não apenas classificar as ações dentro de um referencial teórico de melhoria contínua, mas também compreender como estas técnicas podem ser aplicadas em contextos similares em outras usinas do setor.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA USINA PETRIBU

A Usina Petribu é uma tradicional empresa do ramo sucroenergético, localizada no Nordeste brasileiro, especificamente no estado de Pernambuco. Com uma história que remonta a várias décadas de operação, a usina tem se destacado por buscar constantemente a modernização de seus processos e pela implementação de práticas mais sustentáveis e economicamente eficientes, através do implemento da tecnologia alinhado à valorização do capital humano.

A unidade industrial da Petribu processa anualmente um volume significativo de cana-de-açúcar, produzindo açúcar e etanol como produtos principais, além de energia elétrica a partir da queima do bagaço e CO₂ proveniente da fabricação de álcool. Como é característico do setor sucroalcooleiro, a usina opera sazonalmente, com a moagem concentrada no período de safra, que na região Nordeste geralmente ocorre entre setembro e março.

A Usina Petribu, assim como outras unidades do setor, enfrenta desafios relacionados à gestão de recursos hídricos, tanto pela necessidade de garantir o abastecimento de água para seus processos industriais quanto pela responsabilidade de minimizar o impacto ambiental de seus efluentes. Nesse contexto, a busca por soluções que permitam o reaproveitamento da água e a recuperação de subprodutos valiosos, como açúcares dissolvidos, representa uma estratégia alinhada tanto com objetivos econômicos quanto ambientais.

4.2 PROCESSO DE LAVAGEM DE CANA NA USINA PETRIBU

O processo de lavagem de cana na Usina Petribu segue princípios similares aos adotados em outras usinas do setor, com adaptações específicas às suas condições operacionais. A lavagem é realizada para remover impurezas minerais (terra, areia) e vegetais (palhas, folhas) que acompanham a cana colhida e que podem prejudicar o processo de extração e a qualidade dos produtos.

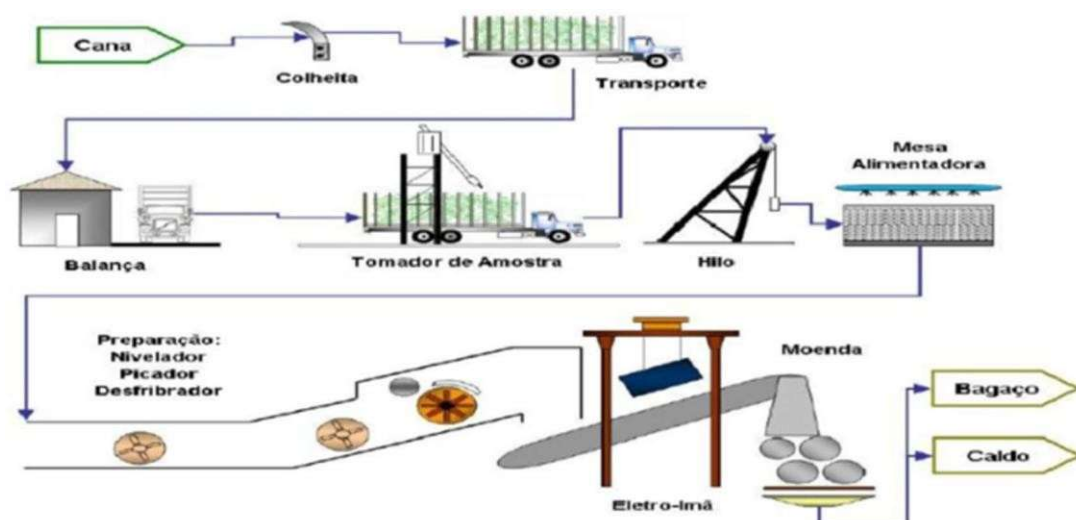
O sistema de lavagem consiste em mesas alimentadoras onde a cana é depositada e submetida a jatos de água que removem as impurezas. Em seguida, a

cana limpa passa pelo desfibrador, e é transportada até o *donelly*, para posteriormente ir à moenda. A água utilizada neste processo, após entrar em contato com a cana, carrega consigo não apenas as impurezas removidas, mas também açúcares lixiviados da própria cana, principalmente quando esta apresenta danos físicos, como cortes ou esmagamentos.

Tradicionalmente, esta água residual, conhecida como "água de lavagem de cana", é direcionada para piscinas de decantação, onde os sólidos mais grosseiros são sedimentados, e posteriormente era descartada ou parcialmente reutilizada (como é feito na Usina Petribu), sem um aproveitamento efetivo dos açúcares nela dissolvidos. Este procedimento representava não apenas um desperdício de água, mas também uma perda significativa de açúcares que poderiam ser recuperados e convertidos em produtos de valor comercial.

A água da lavagem de cana contém uma alta quantidade de impurezas, o que dificultaria muito o seu tratamento para reinserção no processo produtivo. Observou-se que a esteira que transporta a cana até o *donelly* carrega a cana ainda molhada, e na parte de baixo da esteira, acumula-se um volume considerável de água. Essa água é bombeada para o reservatório da água de lavagem e segue para as piscinas de decantação.

Figura 2 - Processo de recepção e moagem da cana de açúcar



Fonte: Researchgate.net (2025)

Na Figura 2, o *donelly* não é representado, visto que sua função é apenas armazenar a cana desfibrada para manter um certo controle no nível da moagem, e

não modifica a cana de alguma forma, ao contrário dos equipamentos que são efetivamente ilustrados na figura (desfibrador, moenda).

4.3 INICIATIVA DE REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA DE LAVAGEM

Reconhecendo o potencial de melhoria neste processo, a Usina Petribu implementou uma iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana, mais precisamente, a água da esteira de cana desfibrada, visando a recuperação dos açúcares dissolvidos. Esta iniciativa envolveu modificações no sistema existente, com a instalação de equipamentos e a reorganização dos fluxos de água. O sistema de reaproveitamento implementado consiste nas seguintes etapas:

Captação da Água de Lavagem: A água utilizada na lavagem da cana, após passar pelas mesas alimentadoras, é coletada em canaletas e direcionada para um sistema de tratamento preliminar;

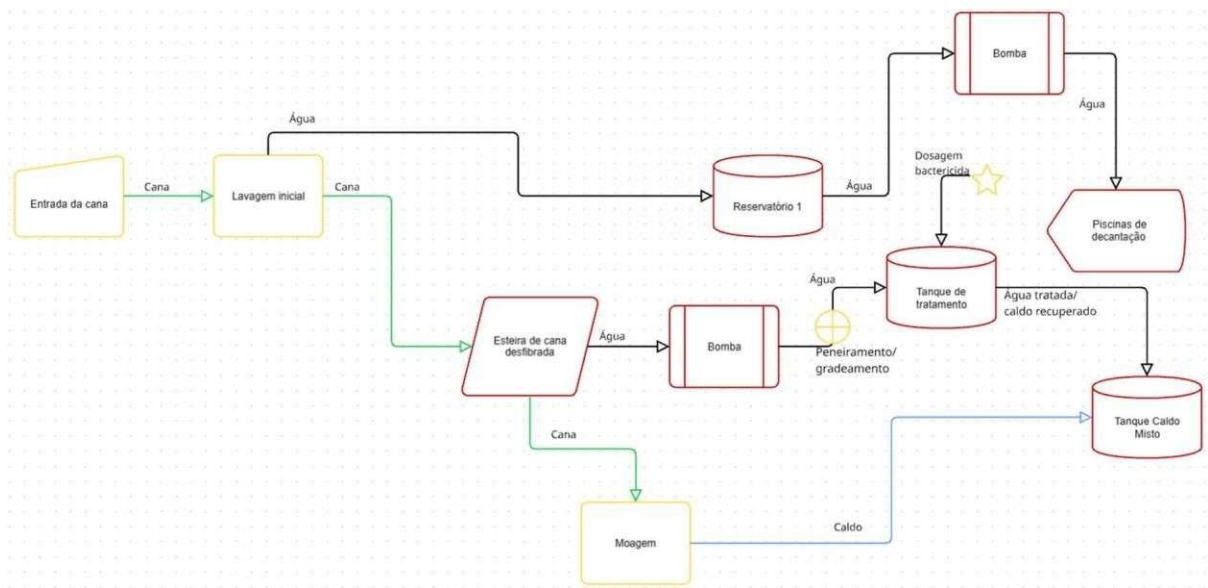
Tratamento Preliminar: A água coletada passa por um processo de gradeamento para remoção de sólidos grosseiros, como palhas, bagacilhos e outros resíduos vegetais. Este tratamento visa proteger os equipamentos subsequentes e facilitar as etapas posteriores de tratamento;

Medição e Controle: O sistema inclui medidores de vazão e amostradores para monitoramento contínuo da quantidade e qualidade da água, incluindo a determinação do Brix (indicador da concentração de açúcares dissolvidos);

Bombeamento para Reaproveitamento: Após o tratamento preliminar, a água é bombeada para reintegração ao processo produtivo desde o início, antes da dosagem de bactericida, que ocorre no caldo misto, e deve ser automaticamente ajustada por válvulas comandadas por medidores de vazão, do caldo misto proveniente da moenda, e de água a ser reaproveitada, sendo assim direcionada para etapas onde os açúcares nela contidos podem ser recuperados e aproveitados.

No Fluxograma 4, está representada a proposta do novo layout do processo de lavagem da cana, incluindo o reaproveitamento da água que escoar da esteira de cana desfibrada.

Fluxograma 4 - Representação do novo fluxo de água de lavagem de cana da Usina Petribu



Fonte: O autor (2025)

Os dados operacionais deste sistema, obtidos na usina, incluem:

- **Vazão da bomba:** Medida em metros cúbicos por hora (m^3/h), representa a capacidade de bombeamento da água de lavagem tratada;
- **Tempo de operação diária:** Número de horas por dia em que o sistema de bombeamento opera durante a safra;
- **Brix da água:** Percentual de sólidos solúveis (principalmente açúcares) presentes na água de lavagem, medido em graus Brix.

Estes dados são fundamentais para a quantificação do volume total de água reaproveitada e da quantidade de açúcares recuperados, permitindo assim a análise dos benefícios financeiros da iniciativa.

4.4 DESTINO DA ÁGUA E AÇÚCARES REAPROVEITADOS

A água de lavagem reaproveitada, contendo açúcares dissolvidos, pode ter diferentes destinos dentro do processo produtivo da usina, dependendo de fatores como a concentração de açúcares, o volume disponível e as necessidades operacionais do momento. Os principais destinos incluem:

Incorporação ao Processo de Extração: A água pode ser direcionada para o processo de embebição das moendas, onde os açúcares nela contidos são incorporados ao caldo extraído, aumentando o rendimento da extração. Porém segundo Hugot (1986) e Rein (2007), a água de embebição precisa estar em uma temperatura específica, para deixar a água residual da lavagem a essa temperatura, seria necessário um trocador de calor, o que aumentaria o investimento inicial necessário.

Direcionamento para a Fermentação: Alternativamente, em momentos que o Brix da água esteja muito baixo devido a variáveis climáticas, a água pode ser enviada diretamente para o processo de fermentação, onde os açúcares são convertidos em etanol pelas leveduras. Esta opção é particularmente interessante quando a concentração de açúcares é relativamente baixa ou quando há impurezas que poderiam afetar a qualidade do açúcar, mas não comprometem a produção de etanol.

Tratamento Adicional para Recuperação de Açúcar: Em alguns casos, a água pode passar por processos adicionais de clarificação e concentração para recuperação direta do açúcar nela dissolvido, que é então reincorporado ao processo principal de produção de açúcar.

A escolha do destino mais adequado para a água reaproveitada e os açúcares nela contidos depende de uma análise técnica e econômica que considera fatores como a qualidade da água, a concentração de açúcares, os custos de processamento adicional e o valor relativo dos produtos (açúcar e etanol) no momento. No caso específico da Usina Petribu, o destino predominante da água de lavagem reaproveitada é passar por peneiramento prévio e, posteriormente, ser incorporada ao processo produtivo desde o início, resultando em aumento da produção, tanto de açúcar como de etanol. Isso permite maximizar o retorno financeiro da iniciativa considerando as condições operacionais e de mercado enfrentadas pela empresa.

4.5 IMPLEMENTAÇÃO E EVOLUÇÃO E SEUS DESAFIOS

A implementação da iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana na Usina Petribu não foi um evento pontual, mas sim um processo evolutivo que

envolveu diferentes etapas e ajustes ao longo do tempo. Este processo pode ser descrito em termos de fases:

- **Fase de Diagnóstico:** Identificação do potencial de melhoria no sistema de lavagem de cana, com quantificação preliminar das perdas de água e açúcares.
- **Fase de Planejamento:** Definição das modificações necessárias no sistema existente, dimensionamento dos equipamentos, estabelecimento de metas e indicadores de desempenho.
- **Fase de Implementação:** Instalação dos equipamentos, reorganização dos fluxos de água, treinamento da equipe operacional.
- **Fase de Monitoramento e Ajustes:** Acompanhamento dos resultados, identificação de problemas e oportunidades de melhoria, implementação de ações corretivas para a otimização do sistema.
- **Fase de Padronização:** Estabelecimento de procedimentos operacionais padronizados para garantir a continuidade e eficácia do sistema de reaproveitamento.

Esta abordagem sistemática e iterativa para a implementação da iniciativa reflete características de metodologias de melhoria contínua, como o ciclo PDCA (*Plan-Do-Check-Act*), e será analisada mais detalhadamente no capítulo de Resultados para identificação da técnica de melhoria contínua que melhor descreve as ações desenvolvidas pela usina.

A implementação e operação do sistema de reaproveitamento da água de lavagem de cana na Usina Petribu enfrentaram diversos desafios técnicos e operacionais, para os quais foram desenvolvidas soluções específicas. Os principais desafios e suas respectivas soluções, estão dispostos no Quadro 2:

Quadro 2 - Principais desafios enfrentados na implementação do sistema de reaproveitamento de água de lavagem e suas respectivas soluções

Variabilidade na Qualidade da Água de Lavagem	
Desafio	A concentração de açúcares e impurezas na água de lavagem pode variar significativamente dependendo de fatores como a qualidade da cana, as condições climáticas e a intensidade da lavagem.
Solução	Implementação de um sistema de monitoramento contínuo do brix e outros parâmetros de qualidade, permitindo ajustes operacionais em tempo real.
Remoção de Sólidos Suspensos	
Desafio	A presença de sólidos suspensos na água de lavagem pode causar entupimentos e reduzir a eficiência dos equipamentos.
Solução	Instalação de sistemas eficientes de peneiramento e sedimentação, com manutenção preventiva regular.
Integração com o Processo Existente	
Desafio	A incorporação da água de lavagem reaproveitada ao processo produtivo sem comprometer a qualidade dos produtos.
Solução	Análise detalhada dos pontos de integração, com testes progressivos e monitoramento dos impactos na qualidade.
Sazonalidade da Operação	
Desafio	A operação intermitente durante a safra e a necessidade de preservação dos equipamentos na entressafra.
Solução	Desenvolvimento de procedimentos específicos para início e fim de safra, incluindo limpeza, conservação e manutenção dos equipamentos.

Fonte: O autor(2025)

A superação destes desafios foi fundamental para o sucesso da iniciativa e demonstra a capacidade da equipe da Usina Petribu em aplicar princípios de resolução de problemas e melhoria contínua em seu ambiente operacional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise dos dados fornecidos pela Usina Petribu e da aplicação da metodologia descrita anteriormente. Os resultados abrangem a quantificação do volume de água reaproveitada, a estimativa da recuperação de açúcar e do potencial de produção de etanol, a análise do retorno financeiro da iniciativa e a identificação da técnica de melhoria contínua observada.

5.1 QUANTIFICAÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA REAPROVEITADA

Com base nos dados operacionais fornecidos pela Usina Petribu, o volume de água de lavagem de cana reaproveitado foi calculado. Considerou-se:

- Volume diário de água bombeada: 59,9 m³/dia
- Número de dias de operação na safra: 255 dias

O volume total de água reaproveitada durante uma safra foi calculado como:

$$V_{\text{safra}} = V_{\text{dia}} \times \text{DiasSafra} \quad (5)$$

Sendo:

V_{dia}: Volume diário de água bombeada

DiasSafra: Número de dias de operação na safra

V_{safra}: Volume de água bombeado por safra

V_{safra} = 59,9 m³/dia x 255 dias = 15.274,29 m³ por safra

Este volume representa a quantidade de água que deixou de ser captada de fontes primárias ou que deixou de ser descartada como efluente bruto, contribuindo para a gestão hídrica da usina.

5.2 ESTIMATIVA DE RECUPERAÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL

A quantidade de sacarose e açúcares redutores (AR) recuperados da água de lavagem foi estimada utilizando os teores fornecidos e o volume total reaproveitado.

Considerou-se:

- Teor de sacarose (Pol) na água de lavagem: 3,79 %
- Teor de açúcares redutores (AR) na água de lavagem: 1,85 %
- Densidade da solução (ρ): Aproximadamente 1032 kg/m³ (considerando uma solução de brix = 8)

A massa de sacarose na água de lavagem por safra foi calculada como:

$$M_{\text{Sac.Ág.}} = V_{\text{Lavagem}} \times (\text{Pol.Ág.} \cdot \rho) \cdot \frac{100}{100} \quad (6)$$

Em que:

M.Sac.Ág.: Massa de sacarose na água de lavagem por safra

Pol.Ág.: Teor de sacarose (Pol) na água de lavagem

ρ : Densidade da solução - aproximadamente 1032 kg/m³ (considerando uma solução de brix = 8)

M.Sac.Ág. = 15.274,29 m³ por safra $\times$ (3,79 / 100) $\times$ 1032kg/m³ = 597.223,04 kg de sacarose por safra

A massa de AR originalmente presente na água de lavagem por safra (M_AR_agua) foi calculada como:

$$M_{\text{AR.Ág.}} = V_{\text{Lavagem}} \times (\text{AR.Ág.} \cdot \rho) \cdot \frac{100}{100} \quad (7)$$

Em que:

M.AR.Ág.: Massa de AR originalmente presente na água de lavagem por safra

AR.Ág.: Teor de açúcares redutores (AR) na água de lavagem

ρ : Densidade da solução - aproximadamente 1032 kg/m³ (considerando uma solução de Brix = 8)

M.AR.Ág. = 15.274,29 m³ por safra $\times$ (1,85 / 100) $\times$ 1032 kg/m³ = 291.616,66 kg de AR por safra

Considerando a conversão da sacarose recuperada, onde 80% é convertida em açúcar cristal e 20% em açúcares redutores (AR) para fins de produção de etanol: Massa de sacarose convertida em açúcar cristal:

$$\square = M. \text{ Sac. } \acute{R}g. \square 0,8 \quad (8)$$

Em que:

A = Quantidade de açúcar a ser recuperado (kg)

M.Aç.Cristal = 597.223,04 $\times$ 0,80 = 477.778,44 kg de açúcar cristal por safra

$$\square. \square\square\square. \square\square = M. \text{ Sac. } \acute{R}g. \square 0,20/0,95 \quad (9)$$

Em que:

M.Sac.AR: Massa de sacarose convertida em AR

0,20/0,95: (conversão estequiométrica de sacarose para açúcares redutores)

M.Sac.AR = M.Sac.Ág. $\times$ (0,20/0,95) = 125.731,17 kg de AR (da sacarose).

$$\square. \square\square. \square\square\square\square = \square. \square\square. \acute{R}\square + M. \text{ Sac. } AR \quad (10)$$

Em que:

M.AR.ETOH: Massa de AR disponível para produção de etanol (soma do AR originalmente presente na água e o AR proveniente da conversão da sacarose)

M.AR.ETOH = 291.616,66 kg + 125.731,17 kg = 417.833,86 kg de AR para ETOH por safra

$$\square = \square. \square\square. \square\square\square\square \square 0,57 \quad (11)$$

Sendo:

E = Volume de etanol potencialmente produzido (L)

0,57: Fator de conversão de L de etanol por kg de AR

$$\text{Prod. ETOH} = M_{\text{AR_total_etanol}} \times 0,57 \text{ L/kg} = 238.165,30 \text{ L de etanol/safra.}$$

Estes resultados indicam a quantidade de produtos valiosos (açúcar cristal e etanol) que foram recuperados ou tiveram sua produção potencializada através da iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem.

5.3 ANÁLISE DO RETORNO FINANCEIRO

A análise do retorno financeiro foi realizada com base na quantidade de açúcar cristal recuperado e no potencial de produção de etanol, utilizando os seguintes valores de mercado (utilizados como exemplo para este cálculo, devendo ser ajustados conforme os preços praticados pela usina no período de análise):

- Preço do açúcar cristal: R\$ 155/SC (saco de 50 kg) (valor obtido no tempo em que o trabalho foi escrito)
- Preço do etanol: R\$ 2,70/L (valor exemplificativo)

O retorno financeiro com a venda do açúcar cristal recuperado por safra foi calculado como:

$$\square\square\square. \square\text{ç.} = \square \square \$\text{Aç.} \quad (12)$$

Em que:

Rec.Aç.: Retorno financeiro, por safra, com a venda do açúcar recuperado

\$Aç.: Preço do açúcar cristal

$$\text{Rec.Aç.} = 477.778,44 \text{ kg} \times \text{R\$ } 155/\text{SC} \times 1\text{SC}/50 \text{ kg} = \text{R\$ } 1.481.113,15 \text{ por safra}$$

O retorno financeiro com a venda do etanol produzido a partir do AR total por safra foi calculado como:

$$\square\square\square. \square\square\square\square = E \square \$\text{ETOH} \quad (13)$$

Em que:

Rec.ETOH: Retorno financeiro, por safra, com a venda do etanol recuperado

\$ETOH: Preço do litro de etanol

\$ETOH = 238.165,30 L × R\$ 2,70/L = R\$ 643.046,31 por safra

O retorno financeiro total direto (R_total) da iniciativa, considerando a venda hipotética dos produtos recuperados/produzidos, seria a soma de R_acucar e R_etanol:

$$R_{total} = R_{acucar} + R_{etanol} \quad (14)$$

Em que:

Rtotal: Retorno financeiro, por safra, com as vendas do açúcar e do etanol recuperados

Rtotal = R\$ 1.481.113,15 + R\$ 643.046,31 = R\$ R\$ 2.124.159,46 por safra.

É importante ressaltar que este cálculo representa o benefício bruto da recuperação dos subprodutos. Para uma análise financeira completa, seria necessário considerar os custos de implantação e operação do sistema de reaproveitamento (energia da bomba, manutenção, insumos para tratamento etc.). No entanto, com os dados disponíveis, focou-se no benefício direto da recuperação.

Na figura 3, constam os valores obtidos, para os dados da bomba, com as análises laboratoriais do teor de açúcares na água, e os valores a serem recuperados e seus respectivos preços.

Figura 3 - Resumo dos cálculos realizados

VAZÃO NOMINAL DA BOMBA (M3/H)	84,706	QTD SACAROSE REC. (kg/DIA)	2.342,05
MÉDIA DE ACIONAMENTOS / DIA	10,286	SACAROSE (kg) REC. / SAFRA	597.223,04
MÉDIA DE TEMPO / ACIONAMENTO (MIN)	4,125	SC AÇÚCAR REC. / SAFRA	9.555,57
MÉDIA DE TEMPO (MIN) / DIA	42,429	PREÇO SC AÇÚCAR	R\$ 155,00
VAZÃO MÉDIA / DIA (M3)	59,899		
		QTD ART P/ ETOH (kg/DIA)	1.638,56
BRIX MÉDIO - REFRAATÔMETRO	7,932	ETANOL (L) REC/DIA	933,98
ART MÉDIO (%) - HPLC	5,830	ETANOL (L) REC/SAFRA	238.165,30
SACAROSE MÉDIA	3,789	PREÇO ETANOL (L)	R\$ 2,70
AR MÉDIO	1,853		
DIAS DE SAFRA	255	R\$ REC. / SAFRA EM ETANOL	R\$ 643.046,31
		R\$ REC. / SAFRA EM SC AÇÚCAR	R\$ 1.481.113,15
		R\$ REC. / SAFRA - AÇÚCAR + ETOH	R\$ 2.124.159,46

Fonte: O autor (2025)

5.4 IDENTIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE MELHORIA CONTÍNUA

A análise das ações implementadas pela Usina Petribu para o reaproveitamento da água de lavagem de cana, conforme descrito no Estudo de Caso, permitiu identificar características de diferentes abordagens de melhoria contínua. A iniciativa não parece ser um projeto isolado, mas sim uma evolução no processo produtivo da usina, visando otimizar o uso de recursos e reduzir perdas.

Considerando os elementos observados:

Diagnóstico de Perdas: A usina identificou que a água de lavagem continha açúcares valiosos que estavam sendo perdidos, caracterizando uma etapa de identificação de um problema ou oportunidade de melhoria (semelhante à fase "Plan" do PDCA ou à identificação de desperdícios no Lean);

Implementação de Solução: Foi implementado um sistema para coletar, tratar preliminarmente e bombear essa água para reaproveitamento. Esta é a fase de execução ("Do" do PDCA);

Monitoramento e Ajustes: A descrição da iniciativa sugere que houve monitoramento (medição de vazão, brix) e possivelmente ajustes para otimizar o sistema, embora os detalhes desta fase não tenham sido aprofundados pelos dados disponíveis. Esta seria a fase de "Check" e "Act" do PDCA;

Foco na Eficiência e Redução de Desperdício: A motivação principal é financeira (reaproveitamento de açúcar/etanol) e ambiental (reúso de água), o que se alinha com os princípios do Lean Manufacturing de eliminar desperdícios (neste caso, perda de matéria-prima e uso excessivo de água).

Embora não haja informações detalhadas sobre a aplicação rigorosa de uma metodologia específica como Six Sigma (com suas fases DMAIC e foco estatístico intenso) ou eventos Kaizen formais, a abordagem da Usina Petribu parece fortemente alinhada com os princípios do Ciclo PDCA e com uma mentalidade de Melhoria Contínua incremental, característica do Kaizen em seu sentido mais amplo. A ação de identificar uma perda, planejar uma solução, implementá-la e buscar sua otimização (mesmo que os ciclos de verificação e ação não estejam explicitamente documentados como um projeto formal) é a essência do PDCA.

A busca por aproveitar melhor os recursos e reduzir perdas é um dos pilares do Lean. Portanto, a técnica de melhoria contínua que melhor descreve as ações da Usina Petribu, com base nas informações disponíveis, é uma aplicação prática e adaptada dos princípios do PDCA, com um forte componente de identificação e eliminação de desperdícios (Lean Thinking). A usina demonstrou uma capacidade de observar seus processos, identificar oportunidades de melhoria com impacto financeiro e ambiental, e implementar soluções para capturar esses benefícios. A ausência de um nome formal para a metodologia utilizada pela usina não diminui o valor da melhoria implementada. Muitas organizações praticam a melhoria contínua de forma intuitiva ou adaptada às suas realidades, focando nos resultados práticos. O importante é a existência de um ciclo de aprendizado e otimização, que parece estar presente no caso da Usina Petribu.

Para uma classificação mais precisa, seria necessário investigar mais a fundo como a decisão de implementar o sistema foi tomada, se houve um acompanhamento formal dos resultados com indicadores específicos, se foram realizados eventos de análise de causa raiz para problemas encontrados, e se a equipe foi envolvida na proposição de melhorias. Contudo, com base no estudo de caso, a iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana é um claro exemplo de melhoria de processo com foco em resultados tangíveis, alinhada com os fundamentos da melhoria contínua.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo tem como objetivo discutir os resultados apresentados no capítulo anterior, interpretando-os à luz da revisão de literatura e dos objetivos propostos para este trabalho. A discussão se concentrará nos aspectos quantitativos do reaproveitamento de água e recuperação de subprodutos na Usina Petribu, no retorno financeiro da iniciativa e na identificação da abordagem de melhoria contínua empregada.

6.1 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS QUANTITATIVOS

Os resultados referentes à quantificação do volume de água reaproveitada e à recuperação de açúcar e etanol demonstram o impacto positivo da iniciativa implementada pela Usina Petribu. O volume de água que deixou de ser captado ou descartado representa uma contribuição significativa para a gestão hídrica da unidade. Este achado está em consonância com a literatura, que aponta o reaproveitamento de água como uma estratégia crucial para a sustentabilidade da indústria sucroalcooleira (MORAES *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2019). A quantidade de açúcar recuperado, calculada a partir do brix e da Pol da água de lavagem e do volume reaproveitado, traduz-se diretamente em um ganho de matéria-prima que anteriormente era perdida. Hugot (1986) e Rein (2007) já alertavam para as perdas de sacarose na etapa de lavagem da cana, e os resultados da Usina Petribu quantificam essa recuperação de forma prática, com um teor que não é relativamente alto, mas devido à frequência de acionamento da bomba, resultou numa quantia considerável.

Marcondes (2018) reforça esta preocupação ao destacar que a lavagem convencional pode levar a perdas significativas de sacarose, especialmente com o aumento da mecanização da colheita. O potencial de produção de etanol a partir deste açúcar recuperado amplia ainda mais os benefícios, alinhando-se com a busca do setor por maior eficiência na produção de biocombustíveis, conforme apontado por Bonassa *et al.* (2015) em seu estudo sobre subprodutos gerados na produção de bioetanol. É importante notar que os valores calculados para recuperação de açúcar e produção de etanol são estimativas baseadas nos dados fornecidos e em fatores de

conversão médios da indústria. Variações podem ocorrer na prática devido a eficiências de processo, qualidade da matéria-prima e outros fatores operacionais. No entanto, mesmo como uma estimativa, os números indicam um potencial de ganho considerável.

6.2 ANÁLISE DO RETORNO FINANCEIRO

O retorno financeiro estimado a partir da recuperação de açúcar e/ou produção de etanol é um dos aspectos centrais deste estudo. Os resultados demonstram que a iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também gera um impacto econômico positivo e direto para a Usina Petribu. Este benefício financeiro, como destacado na revisão de literatura (SINDACUCAR, 2024), é um forte motivador para a adoção de práticas de economia circular no setor. A magnitude do retorno financeiro calculado, mesmo sendo uma estimativa bruta que não considera integralmente os custos de investimento e operação do sistema de reaproveitamento, sugere que tais iniciativas podem ter um período de payback (palavra que é usada para medir quanto tempo leva para recuperar o dinheiro investido em um determinado projeto) atraente e contribuir para a lucratividade da usina.

A capacidade de transformar um efluente, que antes representava um custo (de tratamento ou de perda de produto), em uma fonte de receita é um exemplo claro de otimização de processos com impacto direto no resultado financeiro. É importante destacar que, diferentemente da maioria dos estudos sobre reaproveitamento de água na indústria sucroalcooleira, que focam predominantemente nos benefícios ambientais, este trabalho traz uma abordagem diferenciada ao quantificar o retorno financeiro direto da iniciativa. Nascimento *et al.* (2016) e Omena *et al.* (2011), por exemplo, em seus estudos sobre reaproveitamento da água de lavagem de cana, enfatizam principalmente os aspectos ambientais e técnicos, com menor ênfase na quantificação dos benefícios econômicos. Esta diferença de enfoque representa uma contribuição original deste trabalho para a literatura sobre o tema.

A comparação com outros estudos de caso que abordam os aspectos econômicos do reaproveitamento de água na indústria sucroalcooleira reforça a validade dos achados. Embora cada usina tenha suas particularidades, a tendência

geral aponta para a viabilidade econômica de projetos que visam a recuperação de subprodutos e a redução do consumo de insumos. Buarque *et al.* (2003) destacam a importância econômica da gestão adequada dos recursos hídricos no setor sucroalcooleiro, apontando que a otimização do uso da água pode representar ganhos significativos para as usinas.

6.3 IMPLICAÇÕES DA MELHORIA CONTÍNUA NO CONTEXTO DA USINA

A identificação da abordagem de melhoria contínua empregada pela Usina Petribu como uma aplicação prática dos princípios do PDCA, com elementos de Lean Thinking, revela uma cultura organizacional voltada para a otimização e a eficiência. Conforme discutido na revisão de literatura, a melhoria contínua não se restringe à aplicação formal de metodologias complexas, mas reside na capacidade da organização de identificar problemas, planejar soluções, implementá-las e buscar o aprendizado e o aperfeiçoamento constantes (KAIZEN, 2023). A iniciativa de reaproveitamento da água de lavagem de cana na Usina Petribu exemplifica essa abordagem. Houve uma percepção da perda (desperdício de água e açúcar), um planejamento para mitigar essa perda (implementação do sistema de reaproveitamento), a execução da solução e, presume-se, um acompanhamento dos resultados que leva a ajustes e otimizações.

Este tipo de melhoria, focada em ganhos incrementais e na resolução de problemas práticos do dia a dia, é fundamental para a competitividade das empresas no setor sucroalcooleiro. A capacidade de adaptar e aplicar os princípios da melhoria contínua à realidade específica da usina, mesmo sem uma nomenclatura formal para o programa, é mais importante do que a adesão rígida a um modelo teórico específico. Os resultados sugerem que a Usina Petribu possui mecanismos internos, formais ou informais, que incentivam a identificação de oportunidades de melhoria e a implementação de soluções. A valorização do conhecimento prático dos operadores, combinada com o suporte técnico e gerencial, é um fator chave para o sucesso de tais iniciativas.

6.4 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Os resultados obtidos no estudo de caso da Usina Petribu encontram respaldo na literatura técnica. A importância da gestão hídrica e do reaproveitamento de água na indústria sucroalcooleira é amplamente documentada (MORAES *et al.*, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2019). As perdas de açúcar na lavagem da cana e o potencial de sua recuperação também são temas abordados por autores clássicos como Hugot (1986) e Rein (2007). Um aspecto interessante observado na revisão da literatura é que a maioria dos estudos sobre reaproveitamento de água na indústria sucroalcooleira foca predominantemente nos benefícios ambientais. Omena *et al.* (2011), por exemplo, em seu estudo na Usina Coruripe, analisam o balanço hídrico e a qualidade da água de lavagem visando principalmente a redução do consumo de água captada. Nascimento *et al.* (2016) destacam a importância dos separadores sólido-líquido para a remoção de particulados, enfatizando os aspectos técnicos do tratamento para recirculação.

O Relatório de Impacto ao Meio Ambiente da LDC Bioenergia (2010) aborda a gestão de efluentes líquidos industriais sob a ótica da minimização dos impactos ambientais. Em contraste, o presente trabalho traz uma abordagem diferenciada ao priorizar a análise do retorno financeiro direto advindo da recuperação de açúcares e sua conversão em produtos de valor comercial. Esta perspectiva econômica, embora mencionada em alguns estudos, raramente é quantificada de forma detalhada como foi feito para a Usina Petribu. Bonassa *et al.* (2015), ao discutir os subprodutos gerados na produção de bioetanol, mencionam o potencial de aproveitamento da água de lavagem, mas não apresentam uma análise financeira detalhada desse aproveitamento. A tese de Araújo (2017), embora focada na purificação do caldo, discute princípios de tratamento e separação que são relevantes para o contexto do tratamento da água de lavagem visando a recuperação de sacarose. O documento "Cana de Tudo" (SINDACUCAR, 2024) reforça a visão de uma indústria bioenergética que caminha para a economia circular, onde o aproveitamento integral da matéria-prima e dos coprodutos é essencial.

A identificação de uma abordagem de melhoria contínua alinhada com o PDCA e o Lean Thinking também é consistente com as práticas de gestão modernas que buscam eficiência e eliminação de desperdícios. A literatura sobre melhoria contínua

(upflux (2025)) enfatiza a importância de uma cultura de aperfeiçoamento constante, que parece estar presente na iniciativa analisada. O diferencial deste estudo reside na aplicação desses conceitos a um caso prático específico, com a quantificação dos benefícios financeiros diretos e a análise da abordagem de melhoria sob a ótica da gestão da usina. Enquanto muitos estudos focam nos aspectos ambientais ou técnicos de forma isolada, este trabalho buscou integrar essas dimensões com a análise financeira e a perspectiva da melhoria contínua, oferecendo uma visão mais completa e equilibrada do tema.

6.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO E SUGESTÕES FUTURAS

Apesar dos resultados significativos, este estudo possui algumas limitações que devem ser consideradas:

- **Dados de Custo:** A análise financeira focou nos benefícios brutos da recuperação de açúcar e etanol. Uma análise mais completa do retorno sobre o investimento (ROI) exigiria dados detalhados sobre os custos de implantação (CAPEX) e operação (OPEX) do sistema de reaproveitamento, os quais não estavam integralmente disponíveis.
- **Generalização:** Sendo um estudo de caso único, os resultados quantitativos específicos da Usina Petribu podem não ser diretamente generalizáveis para todas as usinas do setor, devido a variações em processos, tecnologias, qualidade da cana e condições de mercado.
- **Profundidade da Análise da Melhoria Contínua:** A identificação da técnica de melhoria contínua foi baseada nas informações disponíveis sobre a implementação da iniciativa. Uma análise mais aprofundada exigiria entrevistas com os gestores e operadores envolvidos para entender melhor o processo de tomada de decisão, as ferramentas utilizadas e a cultura organizacional relacionada à melhoria.
- **Comparação com Alternativas Tecnológicas:** O estudo não incluiu uma comparação detalhada com alternativas tecnológicas emergentes, como a lavagem a seco da cana-de-açúcar, que, segundo Marcondes (2018), apresenta vantagens como economia de água, aumento da capacidade de

moagem e redução no volume de torta de filtro, o que traria outros benefícios, mais que provavelmente necessitam de um investimento inicial maior.

Com base nestas limitações, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar de uma análise de viabilidade econômica completa do sistema de reaproveitamento da água de lavagem de cana, incluindo CAPEX, OPEX e indicadores como ROI e *payback*, em diferentes cenários operacionais e de mercado.
- Estudar de forma comparativa, múltiplas usinas para identificar fatores críticos de sucesso e barreiras para a implementação de sistemas de reaproveitamento de água e recuperação de subprodutos.
- Pesquisar de forma mais aprofundada, sobre a aplicação de metodologias formais de melhoria contínua (Lean Six Sigma, TPM etc.) na gestão hídrica e de perdas em usinas sucroalcooleiras, investigando o impacto na cultura organizacional e nos resultados de desempenho.
- Desenvolver modelos de simulação para otimizar o balanço hídrico e a recuperação de açúcares em usinas, considerando diferentes configurações de processo e tecnologias de tratamento.
- Analisar de forma comparativa, sistemas convencionais de lavagem com reaproveitamento de água e sistemas de lavagem a seco, considerando aspectos técnicos, ambientais e econômicos, para orientar decisões de investimento no setor.

Essas sugestões podem contribuir para o avanço do conhecimento e para o desenvolvimento de soluções ainda mais eficientes e sustentáveis para a indústria sucroalcooleira, integrando as dimensões ambiental e econômica de forma equilibrada e sinérgica.

Ao longo do trabalho, foram apresentados o contexto da indústria sucroalcooleira, a importância da gestão hídrica, os fundamentos da melhoria contínua, a metodologia empregada, o detalhamento do estudo de caso e a análise dos resultados obtidos. Os resultados quantitativos demonstraram de forma inequívoca o impacto positivo da iniciativa de reaproveitamento implementada pela Usina Petribu.

Calculou-se que, ao longo de uma safra de 255 dias, a usina reaproveita um volume de 15.274,29 m³ de água da lavagem de cana. Este volume, que anteriormente poderia representar um efluente a ser tratado ou uma perda de recurso hídrico, pode ser agora reintegrado ao processo, evidenciando um avanço na gestão sustentável da água.

A análise da composição desta água revelou um teor de sacarose de 3,79% e um teor de açúcares redutores (AR) de 1,85%. A partir desses dados, estimou-se a recuperação de 597.223,04 kg de sacarose e 291.616,66 kg de AR diretamente da água de lavagem por safra.

Considerando a estratégia de conversão da sacarose recuperada, onde 80% dela é destinada à produção de açúcar cristal e 20% é convertida em AR para a produção de etanol, obteve-se uma produção adicional de 477.778,44 kg de açúcar cristal e um total de 417.833,86 kg de AR (incluindo o AR original da água e o convertido da sacarose) direcionados para a fermentação. Este montante de AR resultou em um potencial de produção de 238.165,30 litros de etanol por safra.

O retorno financeiro direto desta recuperação é substancial. Utilizando preços exemplificativos de R\$ 155/SC (1 SC = 50kg) para o açúcar e R\$ 2,70/L para o etanol, a iniciativa representa uma receita adicional bruta com valor de aproximadamente R\$ 1.481.113,15 proveniente do açúcar e R\$ 643.046,31 do etanol, totalizando um benefício financeiro estimado em R\$ R\$ 2.124.159,46 por safra. Este valor ressalta a viabilidade econômica e a importância estratégica de otimizar processos para reduzir perdas e agregar valor aos subprodutos na indústria sucroalcooleira.

No que tange à identificação da técnica de melhoria contínua, concluiu-se que as ações da Usina Petribu, embora não explicitamente rotuladas sob uma metodologia formal, alinham-se fortemente com os princípios do Ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) e com uma mentalidade de Melhoria Contínua incremental, característica do Kaizen em seu sentido mais amplo, com um forte componente de identificação e eliminação de desperdícios (Lean Thinking). A capacidade da usina de diagnosticar perdas, implementar soluções eficazes e monitorar resultados demonstra uma cultura organizacional voltada para a eficiência e o aprendizado contínuo.

Este estudo atingiu seus objetivos ao descrever o processo de reaproveitamento na Usina Petribu, quantificar os ganhos hídricos e de subprodutos, analisar o retorno financeiro e discutir a abordagem de melhoria contínua. Os achados

reforçam a tese de que a aplicação de práticas de melhoria contínua na gestão de recursos, como o reaproveitamento da água de lavagem de cana, não só contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também gera benefícios econômicos significativos, aumentando a competitividade e a resiliência das usinas sucroalcooleiras.

As limitações do estudo, como a ausência de dados detalhados sobre custos de investimento e operacionais do sistema de reaproveitamento, abrem caminhos para trabalhos futuros que possam realizar análises de viabilidade econômica ainda mais completas e aprofundar a investigação sobre a aplicação de metodologias formais de melhoria contínua no setor. No entanto, as evidências apresentadas são suficientes para destacar a relevância e o potencial de iniciativas como a da Usina Petribu.

Em suma, o caso da Usina Petribu serve como um exemplo prático e inspirador de como a busca pela otimização de processos e a valorização de todos os recursos podem levar a resultados expressivos, beneficiando a empresa, o meio ambiente e a sociedade como um todo. A melhoria contínua, aplicada de forma pragmática e adaptada à realidade operacional, revela-se uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento sustentável da indústria sucroalcooleira.

7 CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou o impacto positivo do reaproveitamento da água residual da lavagem de cana na Usina Petribu, tanto em termos de gestão hídrica quanto de recuperação de subprodutos valiosos. A quantificação revelou que, em uma safra de 255 dias, a usina pode reaproveitar mais de 15 mil m³ de água, recuperando centenas de milhares de quilogramas de sacarose e açúcares redutores. Essa recuperação se traduz em um significativo retorno financeiro, com a produção adicional de açúcar cristal e etanol, totalizando um benefício estimado em pouco mais de R\$ 2,1 milhões por safra. Tal abordagem, que transforma um efluente em fonte de receita, destaca a viabilidade econômica de práticas sustentáveis no setor sucroalcooleiro.

Adicionalmente, a análise revelou que as ações da Usina Petribu se alinham com os princípios do Ciclo PDCA e do Lean Thinking, evidenciando uma cultura de melhoria contínua focada na otimização e eliminação de desperdícios. Embora o estudo apresente limitações, como a ausência de dados detalhados de custos de investimento e operação, e a generalização dos resultados, ele oferece uma visão integrada dos benefícios ambientais, econômicos e operacionais, o que indica que os objetivos gerais e específicos foram atingidos. O caso da Usina Petribu serve como um exemplo prático de como a aplicação pragmática da melhoria contínua pode impulsionar a sustentabilidade e a competitividade na indústria sucroalcooleira, incentivando futuras pesquisas para aprofundar a análise de viabilidade e explorar novas tecnologias.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, F. A. D. Intensificação do processo de purificação do caldo da cana-de-açúcar por decantação química e adsorção. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

BONASSA, G. et al. Subprodutos gerados na produção de bioetanol: bagaço, torta de filtro, água de lavagem e palhagem. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 4, p. 144-166, 2015.

BUARQUE, D. C. et al. Critérios de demandas hídricas para a outorga de uso da água: setor sucroalcooleiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: ABRH.

HUGOT, E. Handbook of cane sugar engineering. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 1986.

KAIZEN. Kaizen: cultura de melhoria contínua. Lean Production, 2023. Disponível em: <https://www.leanproduction.com/kaizen/>. Acesso em: 18 dez. 2024.

LDC BIOENERGIA S.A. Relatório de impacto ao meio ambiente (RIMA). Consultoria GEOMA S/S LTDA. Leme-SP, 2010.

MARCONDES, L. A. Processo de lavagem a seco de cana-de-açúcar. São José do Rio Preto: UNILAGO, 2018.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BIDOIA, E. B. Tratamento de águas residuárias da indústria sucroalcooleira. *Revista Ambiente & Água*, v. 10, n. 1, p. 7-20, 2015.

NASCIMENTO, N. H. A. et al. Reaproveitamento da água utilizada na lavagem de cana de açúcar aliado ao separador sólido-líquido para remoção de particulados aplicado à indústria sucroalcooleira. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DO IFSP, 7., 2016, Matão-SP. Anais [...]. Matão: IFSP.

OLIVEIRA, J. A. et al. Impactos ambientais da agroindústria canavieira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 5, p. 507-514, 2013.

OMENA, S. P. F. et al. Tratamento de águas de lavagem de cana-de-açúcar, visando a sua reutilização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2011, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABAS.

REIN, P. W. *Cane sugar engineering*. 2. ed. Berlin: Bartens, 2007.

RESEARCHGATE.NET. Fluxograma do processo de colheita e moagem da cana-de-açúcar. ResearchGate, 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Fluxograma-do-processo-de-colheita-e-moagem-da-cana-de-acucar_fig2_369635856. Acesso em: 07 jun. 2025.

SILVA, V. F. et al. Reúso de água na indústria sucroalcooleira: uma revisão. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 6, p. 1135-1144, 2019.

SINDACUCAR. Cana de tudo: do açúcar ao infinito. 2024. Disponível em: <https://www.sindacucar.com.br>. Acesso em: 20 dez. 2024.

UPFLUX. Melhoria contínua de processos: exemplos de metodologias. 2025. Disponível em: <https://upflux.com.br/pt/blog/melhoria-continua-de-processos/>. Acesso em: 07 jun. 2025.

VERGANI, I. dos S.; CASAGRANDE, D. J. Aplicabilidade da filosofia Kaizen na gestão de operações: estudo em uma empresa automobilística no interior do estado de São Paulo. *Revista Interface Tecnológica*, v. 20, n. 2, p. 645-656, 2023. DOI: 10.31510/infa.v20i2.1813.

YIN, Robert K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.