

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ANA JÚLIA CASTRO RODRIGUES

ESTUDO DE VIABILIDADE DE ROTA ALTERNATIVA DE CONSUMO DE DIÓXIDO DE
CARBONO GERADO PELA FERMENTAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO EM
BENEFÍCIO DE ESTOCAGEM DO GÁS EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

SÃO CARLOS
2024

ANA JÚLIA CASTRO RODRIGUES

Estudo de viabilidade de rota alternativa de consumo de dióxido de carbono gerado pela fermentação do processo produtivo em benefício de estocagem do gás em uma indústria alimentícia

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos,
para obtenção do título de bacharel em
engenharia química

Orientador (a): Prof. Vádila Giovana
Guerra Béttega

São Carlos – SP

2024

BANCA EXAMINADOR

Trabalho de Graduação apresentado no dia 23 de janeiro de 2024, perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Vádila Giovana Guerra Béttega, DEQ/UFSCar

Convidado: Marlon Marcos De Moura, Heineken Brasil

Professora da Disciplina: Mônica Lopes Aguiar, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Kleber dos Reis Rodrigues e Sara Cristina de Castro Rodrigues, por poder me proporcionar acessos para que eu chegasse até aqui. Pelo apoio incondicional em todas as minhas decisões, pelo amor, direcionamentos e conselhos. Por todo o incentivo à minha educação, sempre proporcionando o melhor e por estarem sempre presentes.

À minha irmã, Mariana Castro Rodrigues, por sempre me motivar e criar momentos de descontração. Por todo o suporte e conselhos nos momentos difíceis. Vocês são a minha maior inspiração.

Agradeço também ao meu namorado Pedro Paulo Spagnolo Pereira por sempre acreditar em mim, pelo suporte, parceria e companheirismo, principalmente, durante do meu estágio em Araraquara e no desenvolvimento desse trabalho.

À Vai da Nada, república que me acolheu por 5 anos, no período em que estive em São Carlos, se tornou a minha segunda família durante essa trajetória, por todos os momentos compartilhamos. Vocês foram a luz que me transformou em uma pessoa madura e consciente.

Ao meu gestor, Marlon Marcos de Moura, pelo apoio contínuo e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Por todo o incentivo que teve comigo perante as minhas responsabilidades com a universidade, ao prestar total suporte a minha dupla jornada trabalho e estudo. Faço um agradecimento a todo o time da Utilidades e Manutenção da cervejaria, pelo suporte técnico e profissional para realização deste trabalho.

À minha orientadora, Vádila Giovana Guerra Béttega por todo apoio e suporte técnico para o desenvolvimento deste trabalho. Assim, também agradeço a UFSCar e ao Departamento de Engenharia Química pela estrutura e ensino oferecido ao longo desses anos.

RESUMO

O dióxido de carbono é um gás versátil com diversas aplicabilidades. Na indústria alimentícia, é utilizado para carbonatar bebidas, preservar alimentos e prolongar a vida útil de produtos perecíveis. Nas cervejarias, o dióxido de carbono é gerado em um processo biológico chamado fermentação alcoólica, no qual as leveduras, microrganismos unicelulares, convertem os açúcares presentes no mosto advindo de cereais em álcool etílico e dióxido de carbono. Esse gás é um subproduto valioso, que pode ser capturado e utilizado para carbonatar a cerveja, conferindo-lhe sua efervescência característica ou no envasamento da bebida. Em se tratando de um modelo de fabricação convencional de cerveja, no beneficiamento de CO₂, as purgas são necessárias para lidar com a alta pressão do sistema. A condensação do dióxido de carbono, no processo de beneficiamento nem sempre é eficiente devido a fatores como presença de impureza e alta temperatura de operação. Quando o CO₂ é submetido a altas pressões durante o seu processo de purificação, pequenas quantidades de impurezas podem se acumular as quais são direcionadas a sair pelas purgas. Essa ineficiência na condensação pode resultar em perdas de CO₂ e comprometer a qualidade do produto. Dessa forma, há possibilidade de haver purga do gás apenas por alta pressão devido a permanência na fase gasosa ao invés de se condensar na fase líquida. Assim, o presente trabalho, tem por objetivo identificar a viabilidade de uma rota alternativa de consumo no envasamento com o uso de forma não liquefeita a fim de aliviar a pressão do sistema ao otimizar o processo de estocagem e determinar as condições operacionais do seu uso. Com a redução da pressão na linha, espera-se um aumento na quantidade em estocagem, ao evitar purgas exclusiva por alta pressão. O resultado esperado é um fornecimento estável para as linhas de produção, uma vez que o beneficiamento de CO₂ será contínuo, sem interrupções e a redução nos custos operacionais da indústria cervejeira, posto que não será necessário comprar o gás de terceiros para carbonatação do produto ou demais consumidores, além da possibilidade de revenda como subproduto do processo cervejeiro trazendo lucros para a companhia. Ademais, a solução propõe oferecer uma alternativa sustentável para indústria cervejeira uma vez que a emissão de CO₂ na atmosfera deve ser controlada e evitada, devido a sua classificação como pertencente aos gases de efeito estufa, ao contribuir para o combate às mudanças climáticas.

ABSTRACT

Carbon dioxide is a versatile gas with various applications. In the food industry, it is used to carbonate beverages, preserve food, and extend the shelf life of perishable products. In breweries, carbon dioxide is generated during a biological process called alcoholic fermentation which yeast, unicellular microorganisms, convert the sugars present in the wort derived from cereals into ethanol and carbon dioxide. This gas is a valuable product that can be captured and used to carbonate beer, giving it its characteristic effervescence. In the case of a conventional beer production model, in CO₂ processing, purges are necessary to deal with the high system pressure. The condensation of carbon dioxide in the processing is not always efficient due to factors such as impurity presence and high operating temperature. When CO₂ is subjected to high pressures during its purification process, small amounts of impurities can accumulate, which are directed to be released through purges. This inefficiency in condensation can result in CO₂ losses and compromise the quality of the final product. Therefore, there is a possibility of purging the gas solely due to high pressure, as it remains in the gaseous phase instead of condensing into the liquid phase. Thus, the present work aims to identify the feasibility of an alternative consumption route in packaging using non-liquefied form to relieve system pressure while optimizing the storage process and determining the operational conditions of its use. By reducing the pressure in the line, an increase in the storage quantity is expected, by avoiding purges exclusively due to high pressure. The expected result is a stable supply to the production lines, as the CO₂ processing will be continuous, without interruptions, and a reduction in the operational costs of the brewing industry since it will not be necessary to purchase gas from third parties for product carbonation or other consumers. Furthermore, there is the possibility of resale as a byproduct of the brewing process, bringing profits to the company. Moreover, the solution aims to provide a sustainable alternative for the brewing industry, as the emission of CO₂ into the atmosphere must be controlled and avoided due to its classification as a greenhouse gas, contributing to the fight against climate changes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Molécula tridimensional dióxido de carbono	16
Figura 2	Pureza de CO ₂ ao longo da fermentação	19
Figura 3	Fluxograma do processo de geração de dióxido de carbono	21
Figura 4	Variação do extrato açúcar e liberação de CO ₂ X tempo	22
Figura 5	Fluxograma da usina de beneficiamento de CO ₂	23
Figura 6	Vista isométrica planta de beneficiamento de CO ₂	24
Figura 7	Coletor de espumas	25
Figura 8	Torres de lavagem	25
Figura 9	Selo hidráulico	26
Figura 10	Compressores a pistão	27
Figura 11	Conjunto purificador e secador	28
Figura 12	Refrervedor e Condensador	29
Figura 13	Visão em corte Condensador e Refervedor	29
Figura 14	Fluxograma do sistema de refrigeração no beneficiamento de CO ₂	30
Figura 15	Tanque criogênico de dióxido de carbono	31
Figura 16	Pentax 1000 Analisador de gases	34
Figura 17	Supervisório de consumo de dióxido de carbono no envasamento	36
Figura 18	Fluxograma melhoria não liquefeito	37
Figura 19	Mecanismo válvula globo diafragma	37
Figura 20	Válvula real existente na planta	38
Figura 21	Visão isométrica da adaptação para uso do gás não liquefeito	38
Figura 22	Picagem para uso do gás não liquefeito	38
Figura 23	Volume diário de dióxido de carbono liberado na fermentação	40
Figura 24	Beneficiamento do CO ₂	41
Figura 25	Estoque de gás	41
Figura A1	Diagrama pressão-entalpia do CO ₂	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades físico-química do CO ₂	17
Tabela 2	Média do volume CO ₂ após implementação melhoria	42
Tabela 3	Estimativa e custo para implementação	42
Tabela B1	Folha de Dados- Volume diário de dióxido de carbono liberado na fermentação	48
Tabela B2	Folha de Dados - Beneficiamento do CO ₂	49
Tabela B3	Folha de Dados - Estoque de CO ₂	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Razão de CO ₂ liberado ao longo da fermentação	22
Quadro 2	Parâmetros Pentax100 – Analisador de Gases	34
Quadro 3	Parâmetros de pressão e controle não liquefeito	36

NOMENCLATURA

CO_2	Dióxido de carbono
O_2	Oxigênio

SIGLAS

kg	quilogramas
p.p.m	Parte por milhão
acc	Antes de Cristo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. Dióxido de Carbono	16
2.2. Cervejarias	18
2.3. Captação CO₂	21
2.4. Usina de beneficiamento de CO₂	23
2.4.1. Coletor de espuma	24
2.4.2. Torres de Lavagem	25
2.4.3. Selo hidráulico	26
2.4.4. Compressores	26
2.4.5. Trocador de Calor	27
2.4.6. Purificador	27
2.4.7. Secador	27
2.4.8. Refervedor e Condensador	28
2.4.9. Tanque Criogênico	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
3.1. Qualidade do dióxido de carbono	33
3.1.1. Pureza de 99,998%	33
3.1.2. Ponto de orvalho abaixo -55°C	35
3.1.3. Pressão mínima de 7,1 bar	35
3.2. Dióxido de Carbono não liquefeito	36
3.3. Análise Financeira	42
4. CONCLUSÃO	44
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	45
APÊNDICE A	47
APENDICE B	48

1. INTRODUÇÃO

A cerveja, segundo Kunze (2019), é uma das bebidas alcólicas mais antigas do mundo, com evidências de sua produção que datam de cerca de 5000 acc. na antiga Mesopotâmia.

Na antiguidade, a produção de cerveja era associada a aspectos culturais e religiosos. Pela mitologia mesopotâmica, a deusa Ninkasi, era considerada a divindade da cerveja e, hinos dedicados a ela também continham instruções para fabricação da cerveja. A bebida tinha um papel importante na vida cotidiana, na alimentação e nas cerimônias religiosas da região.

Na atualidade, o mercado da cerveja passa por uma dinâmica fascinante, impulsionada por uma variedade de fatores econômicos, sociais e culturais. De acordo com o relatório da Brewers Association (2023), a indústria cervejeira continua a crescer, com um aumento constante no número de cervejarias artesanais e na diversidade de estilos de cervejas oferecidas. Além disso, destaca-se a influência das tendências de consumo, como a busca por cervejas *premium*, sabores inovadores e a crescente preferência por produtos com processos ambientalmente sustentáveis. Diante desse cenário, a compreensão das complexidades desse mercado dinâmico torna-se essencial para os participantes da indústria, desde cervejarias artesanais até grandes conglomerados tradicionais, a adaptação às demandas constante dos consumidores.

Neste contexto, em produções convencionais quatro matérias-primas são necessárias para a produção de cerveja: cevada, lúpulo, água e levedura. A qualidade dessas matérias-primas tem uma influência na qualidade do produto.

A cevada oferece o amido necessário para que as leveduras realizem o processo de fermentação, etapa fundamental na produção cervejeira.

Os subprodutos da fermentação como o etanol fica solubilizado no caldo fermentativo o qual garante o teor alcoólico da bebida. O álcool é o produto desejado, enquanto o dióxido de carbono (CO₂) muitas vezes é utilizado para a carbonatação do produto final.

O dióxido de carbono (CO₂) permanece parcialmente solubilizado na água onde a cerveja está sendo produzida e uma outra parcela pode ser beneficiada e retirada do tanque de fermentação. Esta substância desempenha um papel fundamental na sustentação da vida no planeta Terra, uma vez que faz parte do processo de fotossíntese, que converte energia solar em energia química.

Segundo as hipóteses de From-Balling durante a fermentação a cada 1 kg de extrato médio de malte pode-se produzir até 0,464 kg de dióxido de carbono (CO₂) (Buchhauser et al, 2007).

O beneficiamento de dióxido de carbono (CO₂) em uma indústria cervejeira refere-se ao processo de recuperação e purificação do gás gerado durante a fermentação para ser reutilizado em outras fases do processo de produção de cerveja ou para outros fins industriais. Este é um aspecto importante tanto para a eficiência quanto para a sustentabilidade da produção de cerveja.

Os reservatórios de fermentação são inicialmente preenchidos com dióxido de carbono (CO₂) com a finalidade de tornar o meio inerte à presença de oxigênio (O₂). Assim, para minimizar as perdas desse gás, a atmosfera dentro dos tanques não é completamente expelida. A retirada parcial dos gases atmosféricos é necessária devido a possibilidade de oxidação do produto, que pode alterar o sabor, textura e o aroma da cerveja.

Como resultado, o dióxido de carbono (CO₂) fica significativamente contaminado com oxigênio e nitrogênio. Após um determinado período, em 16 horas após o enchimento do tanque, ele atinge uma pureza suficiente para ser recuperado (KUNZE, 2019).

Além disso, este gás é caro, e necessário para muitos processos na cervejaria, tornando o beneficiamento rentável e sustentável na indústria.

Inúmeras cervejarias ao redor do mundo implementam um sistema de recuperação de dióxido de carbono (CO₂) para coletar o gás produzido e posteriormente utilizá-los nas suas operações.

Diante das aplicabilidades do dióxido de carbono (CO₂) em uma cervejaria, o gás pode ser utilizado na pressurização das adegas e tanques fermentadores, enchedoras de garrafas, barris de chope, e latas, desoxigenação da água cervejeira, e carbonatação da cerveja.

Além das aplicabilidades na indústria, há também a possibilidade de comercialização do produto externamente o que torna a máxima captação do gás proveniente do processo ainda mais rentável.

Assim, devido ao seu alto valor agregado, o estudo das necessidades energéticas tem sido conduzido em várias cervejarias, visando a determinação das demandas elétricas e térmicas globais.

Segundo estudo de Nielsen et al (2012), a respeito de usinas tradicionais de dióxido de carbono (CO₂), as demandas elétricas estão concentradas nas etapas de refrigeração a qual está atrelada a condensação de dióxido de carbono (CO₂).

Ademais, na literatura de Buchhauser et al. (2007), sobre a pureza no beneficiamento de dióxido de carbono (CO₂), a maior parte de perda em relação ao volume de dióxido de

carbono (CO₂) está nos gases permanente, oxigênio e nitrogênio, os quais não condensam nas condições de operação da usina, e são separados no condensador por purgas do sistema. Assim, a separação ineficiente dos gases permanente é a principal desvantagem deste sistema tradicional de recuperação de dióxido de carbono (CO₂).

Assim, como citado anteriormente, a presença de gases permanentes na corrente de dióxido de carbono (CO₂), reduz a vida útil da cerveja e contribui para sabores indesejáveis.

A concentração máxima de oxigênio (O₂) presente na corrente de dióxido de carbono (CO₂) beneficiado deverá ser em torno de 20 p.p.m, essa especificação máxima garante a qualidade na utilização do dióxido de carbono (CO₂) para fins industriais. Assim, em situações acima desta especificação, deverá ser realizada uma purga de incondensáveis. Este processo em geral ocasiona perda de dióxido de carbono (CO₂) e conseqüentemente ocasionará a emissão do gás para a atmosfera.

Dessa forma, busca-se constantemente por alternativas tecnológicas que aumentem a eficiência da usina de beneficiamento de dióxido de carbono (CO₂) e a diminuição das perdas ocorridas durante este processo devido a existência purgas necessárias para purificação do gás.

Logo, diante do exposto, este trabalho visa apresentar uma análise de viabilidade que explore uma rota alternativa de consumo direto do gás na forma gasosa, aplicável em uma cervejaria, como forma de redução de pressão nas etapas de beneficiamento, evitando as purgas por alta pressão em benefício de maior estocagem do gás. A planta industrial em análise está situada na cidade de Araraquara e possui uma capacidade produtiva de 2.700.000 hectolitros por ano. O objetivo foi investigar a eficiência da operação relacionada ao sistema de recuperação, visando as vantagens e adequações de sua implementação bem como à redução de aquisição externa de CO₂ e conseqüentemente custo de produção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

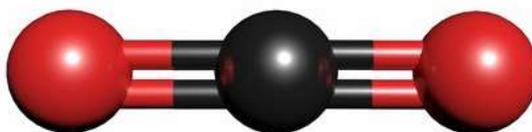
2.1 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono, substância a qual será estudada, possui algumas características relevantes para estudo a respeito das suas propriedades físicas, forma de geração e seu comportamento no meio ambiente o qual será detalhado a seguir.

O dióxido de carbono (CO_2) possui várias utilidades industriais, e no setor alimentício é amplamente aplicado devido a sua característica inerte de processos de alteração dos produtos. Além disso, é empregado em diversas outras aplicações, como no cultivo de plantas em ambientes controlados, na produção de materiais plásticos, extintores, indústria farmacêutica, composição de combustíveis e na indústria de bebidas, como citado anteriormente.

Em 1754, o químico escocês Joseph Black fez a descoberta do dióxido de carbono (ATKINS et al, 2011). Do ponto de vista de sua estrutura, o dióxido de carbono (CO_2), consiste em duas moléculas de oxigênio e uma molécula de carbono com uma configuração linear e propriedades não polares como demonstrado pela Figura 1.

Figura 1 – Molécula tridimensional dióxido de carbono



Fonte: Adaptado Atkins et al. (2011)

Na Tabela 1 há as propriedades físico-químicas do dióxido de carbono (CO₂), além disso, o gás é ligeiramente asfixiante possuindo alguns efeitos nocivos. A inalação de concentrações elevadas deste gás no ar atmosférico pode causar asfixia e morte, considerado sem cheiro e incolor. Ademais, é mais denso que o ar, evaporando a -78°C sob a pressão atmosféricas (ATKINS et al. ,2011).

Tabela 1 – Propriedades físico-química do CO₂

Propriedades Físicas do Dióxido de Carbono	
Calor latente de fusão	7,95 kJ/mol (-56,6°C; 518 kPa)
Calor latente de sublimação	25,23 kJ/mol (-78,45°C; 101,325 kPa)
Calor molar específico a pressão constante	37,56 J/mol.K (101,32 kPa; 20°C)
Calor molar específico a volume constante	28,54 J/mol.K (101,32 kPa; 20°C)
Condutividade térmica	0,0166 W/m.K (101,32 kPa; 26,85 °C)
Densidade absoluta	1,9770 kg/m ³
Densidade crítica	0,468 kg/dm ³
Densidade relativa	1,53 (101,32kPa; 0°C)
Fator crítico de compressibilidade	0,274
Massa molecular	44,0095
Ponto de sublimação	194,7k (101,32 kPa)
Pressão crítica	7381,5 kPa
Pressão de vapor	58,24 kPa (21°C)
Pressão no ponto crítico	517,97 kPa
Razão do calor específico (Cp/Cv)	1,316
Solubilidade em água	0,759 cm ³ /cm ³ água
Temperatura crítica	304,19 k
Temperatura no ponto crítico	216,55 k
Viscosidade	0,01501 mPa.s
Volume crítico	2,137dm ³ /kg
Volume específico	547 dm ³ /kg

Fonte: Gama Gases (2016)

Sob uma perspectiva termodinâmica, o dióxido de carbono (CO₂) é estável como gás, caracterizado por um baixo nível de oxidação, o que torna essencialmente inativo. Uma parte significativa das emissões de dióxido de carbono (CO₂) é resultado de atividades humanas, uma vez que a tecnologia competitiva necessária para capturar e converter o dióxido de carbono (CO₂) em matérias-primas ainda não está amplamente disponível (VOLL et al., 2012).

Neste contexto, torna-se essencial a exploração de tecnologias voltadas para captura e reter o gás, bem como as subsequentes transformações desse gás em combustíveis e matérias-primas para demais indústrias químicas. Além disso, a conversão de dióxido de carbono (CO₂) e outros produtos, representa uma abordagem viável para as questões ambientais decorrente do aumento das emissões de gases poluentes para um avanço em direção a uma matriz energética ecologicamente sustentável (CARINGTON, 2010).

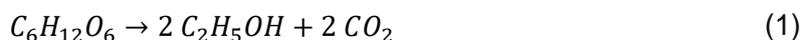
Essa classificação como gases poluentes deve-se a capacidade de reter calor na atmosfera. Quando as concentrações aumentam, a capacidade da atmosfera de reter calor também aumenta. Essa capacidade deve-se a possibilidade do gás de absorver e reemitir radiação infravermelha. A radiação infravermelha é uma forma de radiação eletromagnética que possui a quantidade certa de energia para interagir com as vibrações e rotações das ligações química em moléculas. Quando a radiação atinge uma molécula de dióxido de carbono (CO₂), ela pode ser absorvida, fazendo com que os átomos de carbono e oxigênio vibrem e virem em resposta a energia da radiação. Após a absorção, a molécula passa para um estado excitado. Eventualmente, a molécula retorna ao seu estado fundamental (estado de energia menor), por meio da reemissão da energia absorvida na forma de radiação infravermelha. Parte dessa radiação infravermelha reemitida é direcionada de volta para a Terra, contribuindo para o aquecimento da superfície terrestre (BERNOUX et al., 2001).

2.2. Cervejarias

Inúmeras cervejarias ao redor do mundo implementam um sistema de recuperação para coletar o gás produzido e posteriormente utilizá-los nas suas operações.

A cervejaria em estudo gera em média 9.100 hectolitros de mosto diariamente nos processos de fabricação. Nesse contexto, no artigo de Buchhauser et al. (2017), apresentam que cerca de 4,2 kg CO₂/hl são liberados durante a fermentação. Desta forma, pelo volume da cervejaria, é esperado a liberação de 38.220 kg de CO₂ diariamente durante a fermentação.

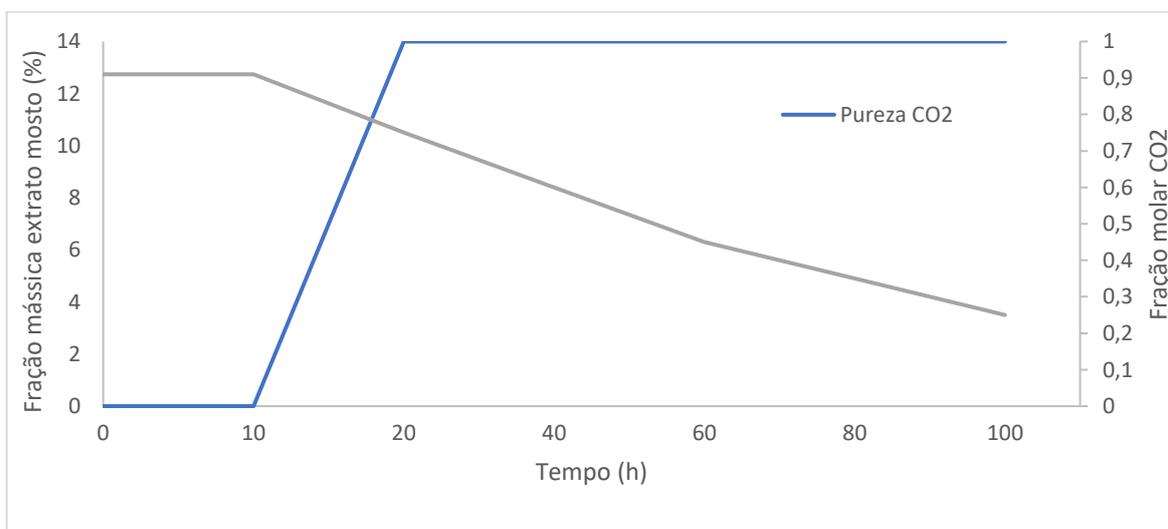
A curva de liberação do gás é proporcional ao °P (Plato) em que, 1°P corresponde a 1 grama de sólidos dissolvidos em 100 gramas de mosto. Essa medida é usada para aferir a quantidade de açúcares vão sendo consumidos pelas leveduras e transformados em álcool e dióxido de carbono. Assim, a concentração de açúcares diminui e pode ser representada da seguinte forma (BAMFORTH, 2003).



$$\Delta G = -230 \text{ kJ} \text{ (218 BTU)} \quad (2)$$

No entanto, sabe-se que parte do dióxido de carbono (CO₂) liberado no processo não é beneficiado, devido a pureza inicial do processo de fermentação. Após um determinado período, ele atinge uma pureza suficiente para ser recuperado. A Figura 2 ilustra a evolução da pureza do CO₂ no tanque ao longo de todo o processo de fermentação, em que fração mássica de extrato no mosto é inversamente proporcional a fração molar de CO₂ nos reservatórios fermentativos (BUCHHAUSER et al., 2007).

Figura 2 – Pureza de CO₂ ao longo da fermentação



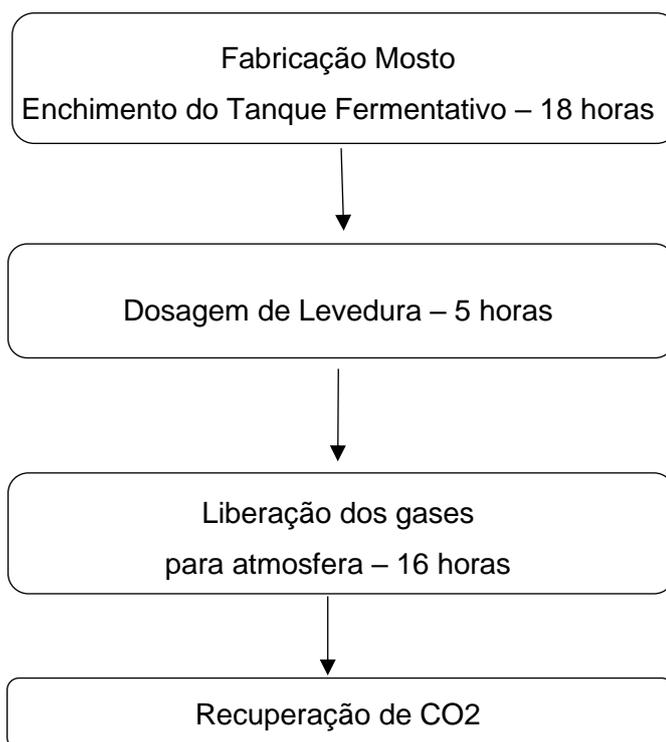
Fonte: Adaptado Buchhauser et al. (2007)

As impurezas presentes na corrente gasosa advêm do processo de fermentação pelas reações que ocorrem paralelamente a reação principal. Por essa razão, é imperativo eliminá-los no processo de tratamento do dióxido de carbono. Dentre os principais os compostos químicos possíveis durante o processo de fermentação alcoólica estão os álcoois, compostos de enxofre, ésteres, aldeídos e cetonas (OETTERER et al., 2005).

2.3. Captação de CO₂

Na cervejaria em estudo, as etapas de produção da cerveja são controladas por tempo seguindo o fluxograma 1, em que o beneficiamento de dióxido de carbono inicia-se após 16 horas do fechamento do tanque fermentativo, na utilidade fabril, seguindo o fluxograma da Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma do processo de geração de dióxido de carbono



Fonte: Próprio Autor

Na receita de fabricação da cerveja em estudo, o mosto fica em média 7 dias em fermentação sob diferentes ângulos de tanques com leveduras selecionadas. O processo fermentativo é bem controlado os quais garante sabor característico da cerveja em questão.

A captação do dióxido de carbono é por 3 dias, seguindo a proporção ao °Plato do substrato, em que as razões de volume em CO₂ liberado ao longo do dia obedeça às razões presentes no Quadro 1.

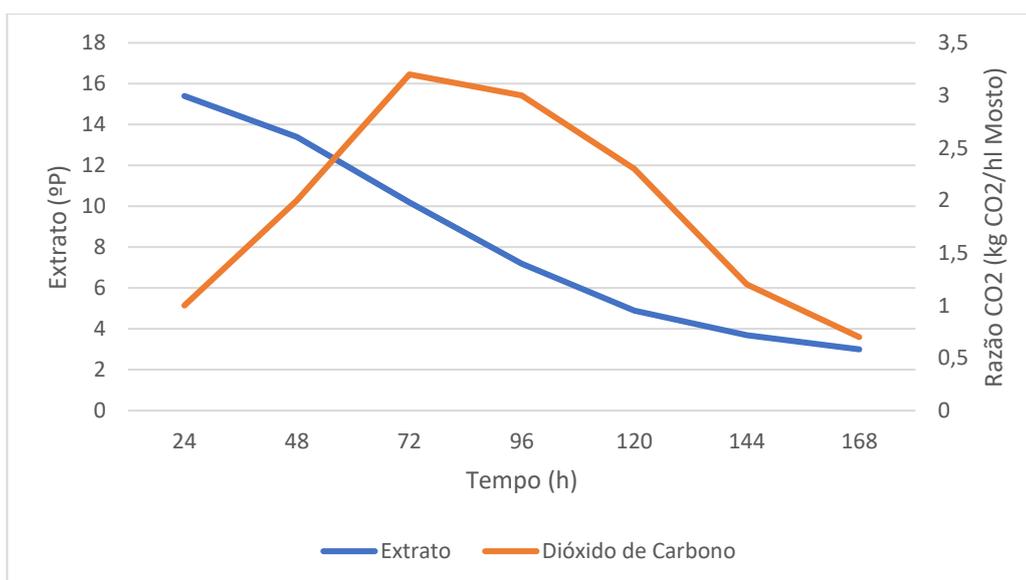
Quadro 1 – Razão de CO₂ liberado ao longo da fermentação

Tempo de Fermentação (horas)	24	48	72	96	120	144	168
°P inicial	15,40	13,40	10,20	7,20	4,90	3,70	3,00
Kg CO ₂ /hlMosto	1,00	2,00	3,20	3,00	2,30	1,20	0,70

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 4 é possível analisar o comportamento da concentração de açúcares no mosto e a liberação de dióxido de carbono ao longo do tempo para produção de uma cerveja. Neste sentido, espera-se que a fração mássica de dióxido de carbono na corrente gasosa seja inversamente proporcional à concentração do substrato, em que ao final da fermentação, a reação de conversão do açúcar em etanol e dióxido de carbono seja menor, devido a disponibilidade de substrato para levedura (KUNZE, 2019).

Figura 4 - Variação do extrato açúcar e liberação de CO₂ X tempo



Fonte: Próprio Autor

Desta forma, pela equação 3 é possível mensurar teoricamente, a partir de um volume de mosto em fermentação, a quantidade de CO2 liberado para beneficiamento.

$$\dot{w}_{CO_2} = 1,00 \cdot V_1 + 2,00 \cdot V_2 + 3,20 \cdot V_3 + 3,00 \cdot V_4 + 2,30 \cdot V_5 + 1,2 \cdot V_6 + 0,70 \cdot V_7 \quad (3)$$

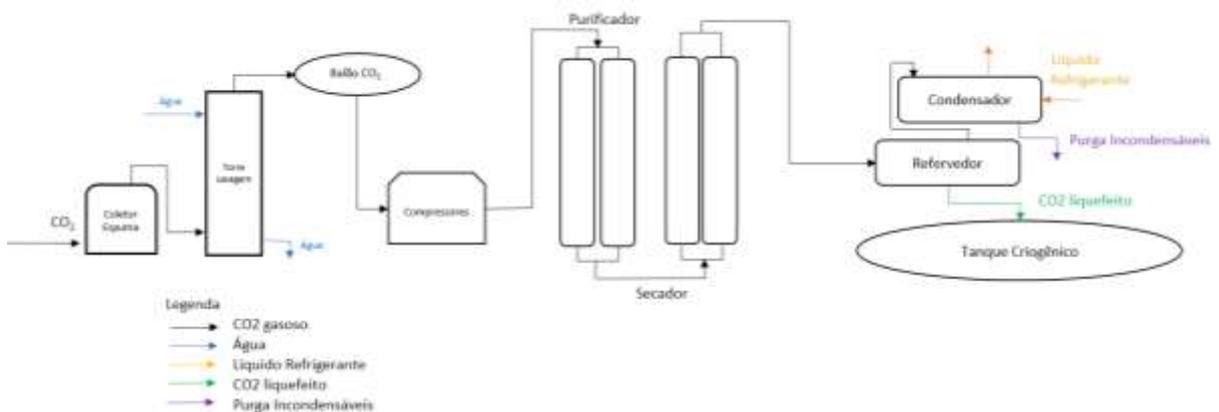
Em que

\dot{w}_{CO_2}	Vazão mássica de dióxido de carbono (kg/dia)
V_1	Volume Cerveja no 1º dia de fermentação (hl)
V_2	Volume Cerveja no 2º dia de fermentação (hl)
V_3	Volume Cerveja no 3º dia de fermentação (hl)
V_4	Volume Cerveja no 4º dia de fermentação (hl)
V_5	Volume Cerveja no 5º dia de fermentação (hl)
V_6	Volume Cerveja no 6º dia de fermentação (hl)
V_7	Volume Cerveja no 7º dia de fermentação (hl)

2.4. Usina de Beneficiamento de CO2

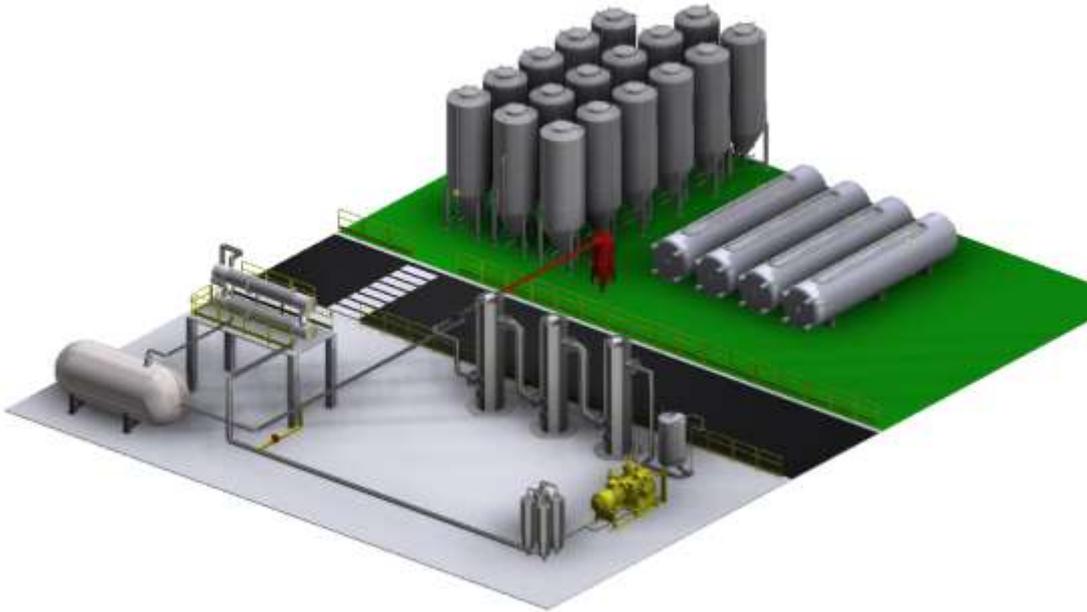
Uma usina de recuperação de CO2, pode ser descrita por três partes básicas em uma comum: A primeira etapa de lavagem e compressão, a segunda etapa de purificação e condensação e a terceira etapa de estocagem por pressão e evaporação para consumo. A figura 5 apresenta o desenho esquemático dos equipamentos da usina de CO2 e a Figura 6 há uma vista isométrica da planta em análise (BUCHHAUSER et al., 2007).

Figura 5: Fluxograma da usina de beneficiamento de CO2



Fonte: Próprio Autor.

Figura 6: Vista isométrica planta de beneficiamento de CO₂



Fonte: Próprio Auto

Dessa forma, nota-se que durante o processo de beneficiamento, diversos equipamentos estão envolvidos até o armazenamento do gás. Na sequência, serão detalhados os equipamentos envolvidos e as principais transformações físicas envolvidas em cada etapa.

2.4.1. Coletor de Espuma

Inicialmente, o CO₂ é produzido pela fermentação da cerveja e é direcionado a planta de recuperação para o coletor de espuma o qual será retirado impurezas gasosas como a espuma da cerveja que pode ser arrastada pela turbulência devido a elevada pressão do sistema e pelo alto volume de geração do gás. Essas impurezas consistem em principalmente álcool e sulfetos que são subprodutos de reações paralelas a de

fermentação. Na Figura 7, há um modelo tridimensional de coletor de espuma existente na usina analisada (KUNZE, 2019).

Figura 7 – Coletor de espumas

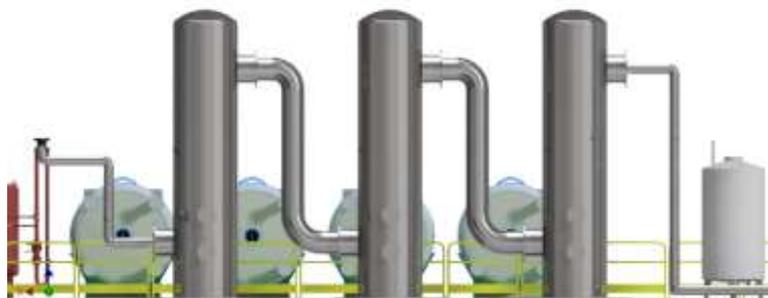


Fonte: Próprio Autor

2.4.2. Torres de Lavagem

O gás que deixa o lavador é direcionado às torres de lavagem, exemplificado pela Figura 8, que passa por uma seção de lavagem de modo a remover qualquer gotícula ou vapor de solvente transportado. As torres de lavagem funcionam em contrafluxo em que os solúveis presentes nos gases fermentativo, passam da corrente gasosa para a corrente líquida de água, tornando o CO₂ puro (KUNZE, 2019).

Figura 8 – Torres de Lavagem



Fonte: Próprio Autor

Dentre os princípios de funcionamento deste equipamento, tem-se o processo de difusão. A transferência de massa ocorre entre a corrente gasosa e a corrente líquida. As

frações indesejáveis na corrente de CO₂ dissolvem-se pela diferença de concentração na água, que se comporta como líquido absorvente, formando soluções.

2.4.3. Selo Hidráulico

Após a lavagem da corrente gasosa, o gás é direcionado ao selo hidráulico o qual, funciona como o balão de armazenamento em usinas de beneficiamento comum. Sabe-se que a taxa de formação de CO₂ durante a fermentação é variável, e a taxa mássica de compressão é constante (KUNZE, 2019).

Desta forma, o selo, presente na Figura 9, é utilizado para manter a pressão da corrente gasosa constante, uma vez que, em situações de elevada fermentação, e por consequência grande volume de corrente gasosa na entrada da usina de CO₂, o selo hidráulico rompe e libera parte do volume da corrente gasosa para atmosfera, como medida de segurança à elevada pressão.

Figura 9 – Selo hidráulico

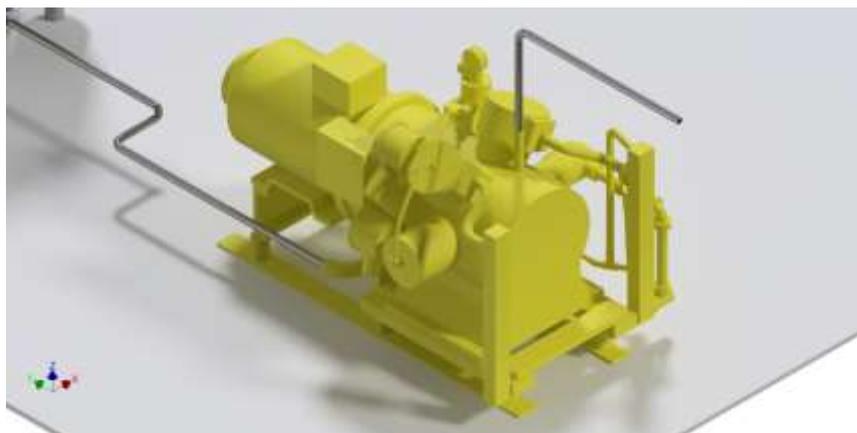


Fonte: Próprio Autor

2.4.4. Compressores

Em seguida, o gás é direcionado aos compressores de pistão que funcionam sem óleo, de modo a eliminar o risco de contaminação da corrente gasosa. Na usina, o compressor é usado para comprimir a corrente gasosa atingir uma pressão relativa de 17 bar. Na Figura 10, há imagens dos compressores utilizados na cervejaria em estudo

Figura 10 – Compressores a pistão



Fonte: Próprio Autor

2.4.5. Trocador de Calor

Após a compressão, a corrente tem aproximadamente 40°C e é direcionada para um trocador de calor a etanol para resfriamento para seguir na temperatura ideal de purificação. A temperatura para operação nos purificadores é 17°C.

Pela termodinâmica, o aumento da temperatura deve-se ao processo de compressão, em que pelo digrama de Mollier de pressão versus entalpia para o CO₂, presente no apêndice A, mostra que ao comprimir um gás, este aumenta a temperatura e ao expandir, a temperatura é reduzida.

2.4.6. Purificador

Assim, após resfriado o gás é purificado em uma torre de recheio composta por carvão ativado e esferas cerâmicas que garantem a retirada de hidrocarbonetos.

2.4.7. Secador

Sequencialmente a corrente purificada é secada em torres de recheio composta por alumina ativada, esferas cerâmicas e peneiras moleculares de sílica para um ponto de orvalho de -60°C no desidratador. A secagem é feita por adsorção dos recheios.

O ponto de orvalho é uma variável de processo importante a ser controlada na usina de dióxido de carbono pois define a temperatura até a qual a corrente de gás deve ser resfriada para que o vapor de água presente condense na forma de orvalho para ser purgado no sistema antes da etapa de condensação a fim de se evitar a possibilidade de causa bloqueios em tubos, quebras em maquinários, contaminação e congelamento.

Na Figura 11, tem-se imagens da produção referente ao processo de purificação e secagem na usina em estudo

Figura 11 – Conjunto purificador e secador



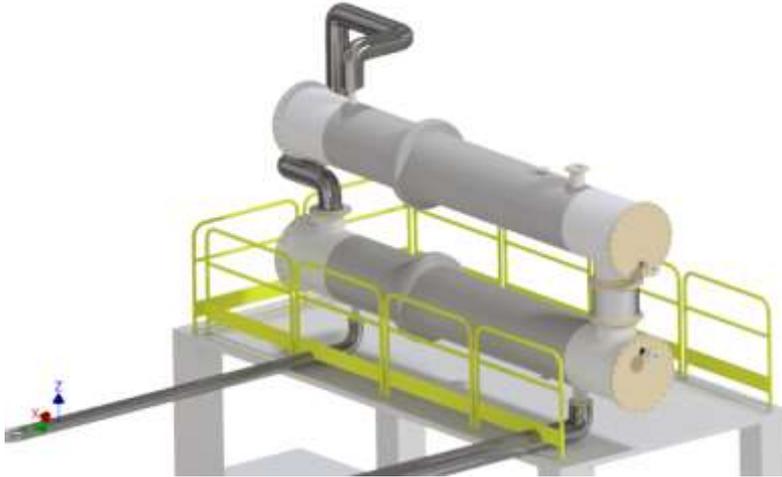
Fonte: Próprio Autor

2.4.8. Refervedor e Condensador

O CO_2 purificado, é direcionado no refervedor a qual é resfriado, com o CO_2 líquido condensado no condensador, até 0°C e liquefeito no condensador pela troca térmica com o líquido refrigerante a temperatura de -30°C , onde o gás é condensado e os gases incondensáveis como o ar e oxigênio são descarregados para o ambiente por purgas. O

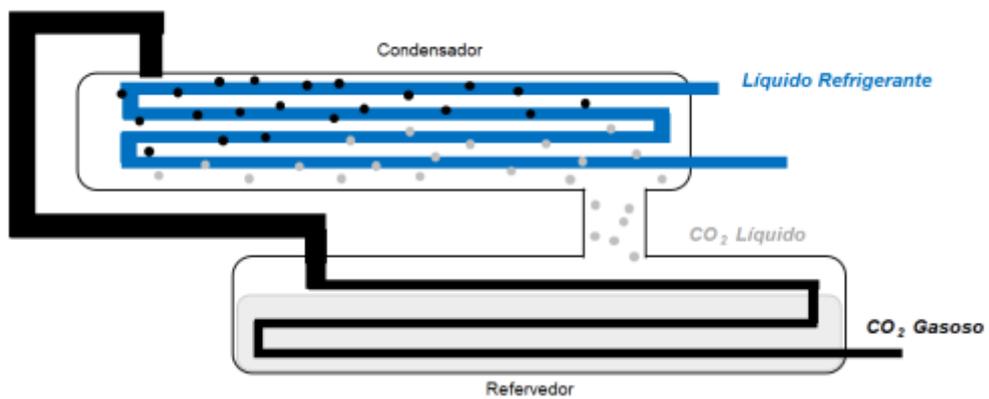
NH₃, também designado de R717, é um dos compostos utilizados no ciclo de refrigeração da usina de beneficiamento. Nas Figuras 12, 13 há visão em corte do refervedor e condensador existente

Figura 12 – Refervedor e Condensador



Fonte: Próprio Autor

Figura 12 – Visão em corte Condensador e Refervedor

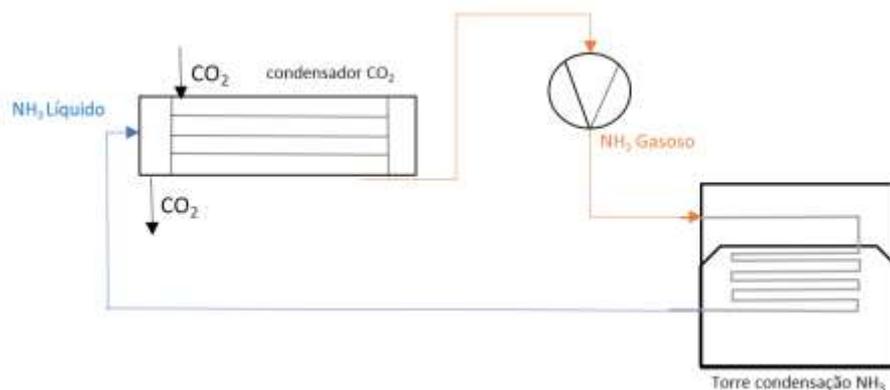


Fonte: Próprio Autor

Na usina de beneficiamento, a demanda de resfriamento fornecida à planta advém de um ciclo de refrigeração da amônia que fornece a troca térmica necessária para

condensação do dióxido de carbono no condensador. A remoção de calor do condensador de amônia é feita por um ciclo de água auxiliado por uma torre de resfriamento. Na Figura 14 há fluxograma do sistema de refrigeração integrado a usina responsável pelo ciclo de refrigeração do líquido refrigerante utilizado.

Figura 14- Fluxograma do sistema de refrigeração no beneficiamento de CO₂



Fonte: Adaptado Nielsen et al. (2012).

No processo, o dióxido de carbono gasoso a alta pressão entra na serpentina do refeedor, inundado por dióxido de carbono líquido, reduzindo sua temperatura. Em seguida, é direcionada ao condensador, onde trocará calor com o líquido refrigerante e passará para a fase líquida. A existência de CO₂ gasoso no sistema durante a condensação é importante para gerar pressão e direcionar o CO₂ líquido para o tanque criogênico.

Após condensado, o CO₂ líquido é direcionado para o armazenamento nos tanques criogênicos, que mantem o gás nas condições de liquefação pronto para ser enviado aos consumidores.

No entanto, em usinas de beneficiamento o qual o sistema de refrigeração é ineficaz, pode ocasionar uma maior pressão que a necessária, sendo identificadas, pela planta química como impurezas de incondensáveis, ao ser eliminada como purga no sistema e conseqüentemente, perda de CO₂.

2.4.9. Tanque Criogênico

Após condensado, o dióxido de carbono líquido é direcionado para o tanque criogênico. Nesta etapa é importante que a pressão no condensador seja maior que a pressão no tanque criogênico para que a transferência de massa seja possível. Em usinas tradicionais, a pressão de operação do tanque criogênico está em 14 bar ao passo que a pressão ideal de condensação 15,7 bar. O tanque criogênico é utilizado para armazenamento de produtos líquidos a baixas temperaturas. O dióxido de carbono, no estado líquido, tem $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$. O maior diferencial de um vaso de pressão comum é o isolamento térmico, mas também considerado vaso de pressão pela NR13. Na Figura 15 ilustra o criogênico real da planta em análise

Figura 15 – Tanque criogênico de dióxido de carbono



Fonte: Próprio Autor

O uso do CO₂ não liquefeito em parte da produção auxilia na redução da pressão, devido a divisão da corrente gasosa. Neste sentido, uma parte da corrente vai para a condensação, pelo processo convencional de beneficiamento do gás e a segunda parcela é direcionada ao consumo direto para a produção.

Entre os estudos de aplicação do dióxido de carbono não liquefeito, os principais destinos são pressurização para desaeração da água cervejeira, armazenamento da cerveja filtrada, trasfega de cerveja fermentada e envasamento. Em seguida, serão detalhados os principais destinos de consumo de dióxido de carbono (CO₂) em uma indústria cervejeira.

- Água carbonatada

O processo de desaeração consiste em passar água decolorada e filtrada por uma coluna de formato desenhado especialmente para a remoção de oxigênio dissolvido na

água. A aplicação de contrafluxo controlado de CO₂ nessa coluna garante teores inferiores a 20 ppb na água obtida. A água é utilizada para blendagem com a cerveja fermentada no processo de filtração.

- Estocagem cerveja

A estocagem da cerveja filtrada é feita em tanques próprios, cuja construção é feita para operar em pressões variando de 2 a 4 kgf/cm²; destes tanques, a cerveja é bombeada para o envasamento. Assim, as vantagens do uso da adega de pressão são: armazenagem da cerveja filtrada, envasamento independente da filtração, qualidade homogênea da cerveja, os filtros podem ter sua capacidade otimizada e interrupções no envase não causam transtornos na produção. Desta forma, pressurização é feita com CO₂ para garantir baixa incorporação de O₂, ao evitar a oxidação que fornece a impressão de uma cerveja choca.

- Trásfega de cerveja

Após a fermentação, a cerveja é transferida para um tanque de maturação onde ocorre outras reações e cria-se os sabores característicos da cerveja. A introdução de oxigênio na cerveja deve ser controlada, em função da possibilidade de oxidação do produto. Logo, parte da trásfega é feita com CO₂, isento de O₂ e com ar comprimido, ao garantir o contato da cerveja com o oxigênio ideal.

- Envasamento do produto

O uso do dióxido de carbono (CO₂) no processo de envase de bebidas desempenha um papel crucial ao contribuir para o perfil sensorial, atuar como um inibidor eficaz contra microrganismos. Além disso, o gás desempenha um papel significativo na percepção do consumidor, conferindo à bebida característica de "refrescância". Ademais, sua utilização adequada contribui para a manutenção da integridade da embalagem.

Os requisitos fundamentais para o fornecimento de dióxido de carbono incluem a exigência de que seja de elevada qualidade e que não introduza sabor, odor ou aspectos discordantes na composição da bebida final. A presença de impurezas no dióxido de carbono está geralmente vinculada à sua origem ou ao tipo de procedimento empregado. A pureza considerada adequada para o CO₂ nas indústrias de bebidas é estipulada em 99,9%, enquanto a faixa aceitável para o ponto de orvalho deve situar-se abaixo de -55°C, com a

presença de água limitada a 20 ppm v/v. Neste contexto, dióxido de carbono (CO₂) não deve liberar sabores ou odores inadequados durante os testes organolépticos

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de caso visa determinar uma rota alternativa de consumo de CO₂ no envasamento de cerveja com o objetivo de reduzir a pressão do sistema na etapa de condensação citada anteriormente e caracterizá-las quanto a quatro dimensões de análise: características gerais, estrutura de processo, materiais e tecnologia e viabilidade. Nesse contexto, fora necessário o estudo das adaptações em uma planta de beneficiamento existente e realização de balanço de massa para contabilização de ganhos em estoque. Além disso, análise dos fatores de qualidade envolvidos no uso da rota alternativa afim de se estabelecer máxima eficiência de beneficiamento do gás e mínimo custo dentro do processo produtivo.

Na planta industrial, todas as etapas anteriores a condensação são consideradas ideais e eficientes.

O uso da melhoria, em estudo, foi aplicado apenas no consumo do envasamento de garrafas e barris de chopp na produção. Os demais consumidores citados, pela Boas Práticas de fabricação da empresa, não são recomendados, devido a possibilidade de contaminação. Dessa forma, para atender o consumidor destinado, alguns parâmetros de qualidade foram estudados e serão detalhados a seguir.

3.1. Qualidade do dióxido de carbono

Assim, para essa garantia da qualidade do gás fornecido diretamente sobre a forma não liquefeita, alguns requisitos e materiais foram implementados na planta industrial a fim de garantir a estabilidade do produto final. Deste modo, os requisitos necessários são pureza, ponto de orvalho e pressão os quais serão detalhados em seguida.

3.1.1. Pureza de 99,998%

Na planta industrial foi implementado o analisador de gases para detectar a quantidade de oxigênio dentro de um fluxo de gás ou qualquer outra mistura de gás inerte.

Segundo o fornecedor o Pentox 1000, equipamento utilizado, é um instrumento que reúne alta precisão e uma estrutura muito robusta a um preço razoável. Sua ampla faixa de medição permite análises de qualidade em todo o processo produtivo. Foi desenvolvido para atender à crescente demanda por CO₂ de Alta Pureza e resulta particularmente de interesse para produtores de bebidas como cerveja, água mineral e refrigerantes que trabalham sob padrões internacionais, como ISO e ISBT. Ademais, é fácil de usar, está equipado com uma interface simples de apenas quatro botões para uso multifuncional. As leituras são claramente exibidas na tela LCD e são fornecidas comunicações RS232, bem como saídas analógicas e digitais (Pentatec). Na Figura 16 há o equipamento em operação na planta em estudo e no Quadro 2 os parâmetros de funcionamento.

Figura 16 – Pentax 1000 Analisador de gases



Fonte: Próprio Autor

Quadro 2 - Parâmetros Pentax100 – Analisador de Gases

Precisão (ppm)	1
Faixa de operação (ppm)	1 – 1000
Tempo de resposta (s)	10
Sensor existente	Zinônia de longa duração
Material	Aço inoxidável IP65

Fonte: Pentatec group

O controle utilizado foi o controle feedforward para compensar as perturbações antes que elas tenham impacto. Neste sentido, quando a pureza da corrente gasosa, após o secador e purificador fica abaixo de 99,998%, a lógica de controle de processo existente ajusta a saída do sistema, por uma válvula de reguladora que impede o envio do dióxido de carbono (CO₂) não liquefeito antes que a perturbação atue sobre a saída. Assim, nesse requisito de qualidade, a válvula reguladora funciona como variável controlada on/off, isto é normalmente aberta ou normalmente fechada a depender da resposta a variável manipulada de pureza.

3.1.2. Ponto de orvalho abaixo -55°C

O ponto de orvalho é controlado por transmissor de sonda para medição de umidade, temperatura e ponto de orvalho. O controle desta variável manipulada é importante pois, no momento de condensação, sob uma pressão fixa, a troca térmica com o líquido refrigerante ocorre variação na temperatura. Logo, acima do setpoint pode ocasionar congelamento de água no condensador, caso a água não seja purgada antes do avanço para a etapa de condensação, ou umidade nas aplicações do envasamento.

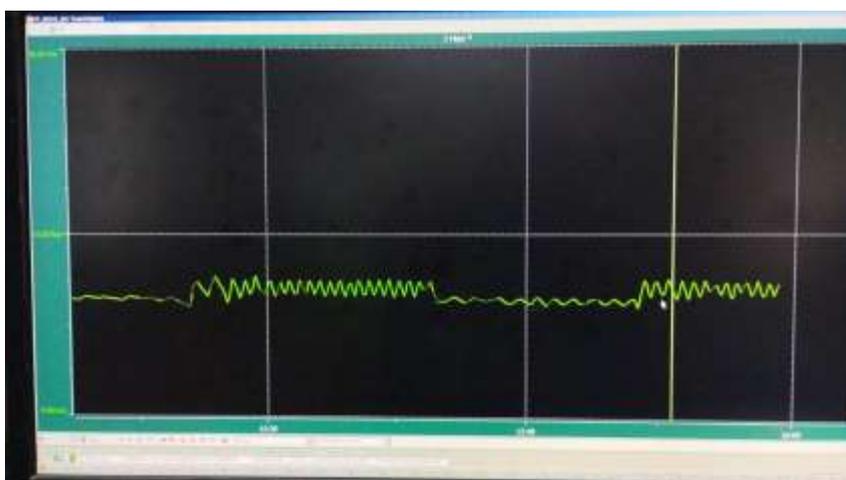
3.1.3. Pressão mínima de 7,1 bar

A pressão de linha de envio do gás ao envasamento que foi colocada como setpoint do controle feedforward e definida com base na pressão de operação das enchedoras existente na planta industrial. Para o envasamento de 4 linhas entre chopp, garrafas e latas, a pressão de operação é de 4 bar, abaixo desta pressão, a cúpula não consegue inertizar o vasilhame, isto é, retirar todo o ar atmosférico, rico em oxigênio da embalagem, podendo gerar oxidação da cerveja.

Para monitoramento da pressão da linha de envio de dióxido de carbono, foi instalado um transmissor de pressão na saída para o envasamento. Para situações em que a pressão seja menor que 7,1, o controle feedforward atua na variável controlada e bloqueia a passagem do dióxido de carbono não liquefeito, e por consequência atua também na abertura da válvula do tanque criogênico liquefeito, o estoque, para o vaporizador de gás e em sequência para o envio com a finalidade de manter a disponibilidade do gás constante ao envasamento.

Na Figura 17, presente no supervisório unidade fabril em estudo, é possível ver a atuação do CO2 não liquefeito, e um período de uso sob a forma liquefeita. As oscilações da operação em não liquefeito não ocasionam indisponibilidade do gás para o consumidor e deve-se ao tempo de atuação da válvula reguladora. O Quadro 3 mostra a faixa de operação de modulação da válvula globo existente.

Figura 17 – Supervisório de consumo de dióxido de carbono no envasamento



Fonte: Próprio Autor

Quadro 3 - Parâmetros de pressão e controle não liquefeito

Faixa de Trabalho (bar)	6,5 – 7,5
Atuação válvula globo diafragma (%)	0 - 100
Setpoint (bar)	7,1

Fonte: Próprio Autor

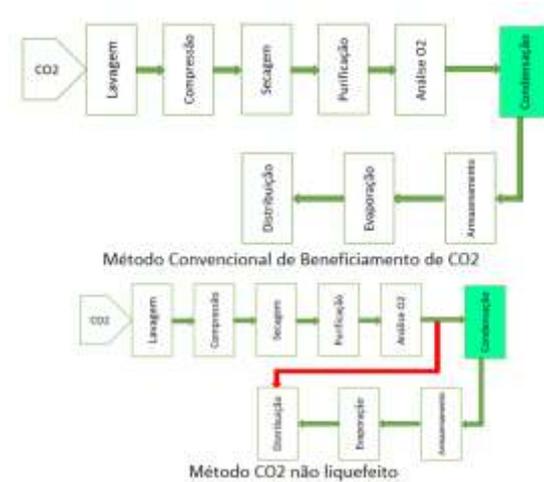
A faixa de operação foi definida baseada no consumo intermitente, como forma de manter por um maior período o dióxido de carbono não liquefeito em ação.

3.2. Dióxido de Carbono não liquefeito

Além das adaptações com instrumentos e acessórios para a qualidade do gás, na usina foram feitas adaptações físicas de tubulações. A conexão de consumo sob a forma

não liquefeita, foi feita direta da tubulação que sai do purificador, direto na linha de envio do dióxido de carbono (CO₂) para o envasamento, segundo o fluxograma da Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma melhoria não liquefeito



Fonte: Próprio Autor

A válvula utilizada foi globo diafragma acionada por solenoide, 1 ½ pol, para a regulagem a pressão da linha de dióxido de carbono no envasamento e para bloqueia em situações de não conformidade de consumo do gás no estado não liquefeito.

O mecanismo de funcionamento baseia-se no acionamento por solenoide, que pelo campo magnético criado atua diretamente por atração, abrindo ou fechando a haste da válvula. A válvula solenoide é ativada por corrente elétrica ou por pulsos elétricos, sendo a tensão de acionamento de 24 V como demonstrado pela Figura 20 da válvula na planta industrial.

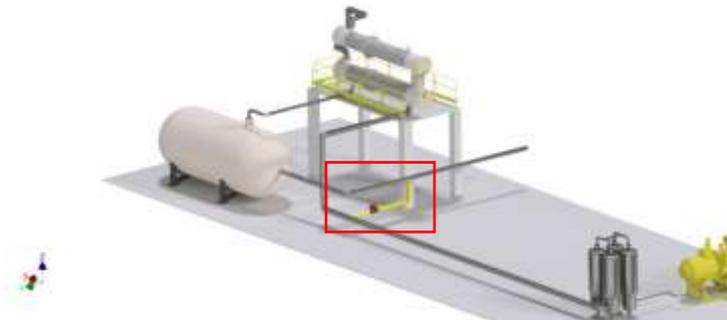
Figura 20 – Válvula real existente na planta



Fonte: Próprio Autor

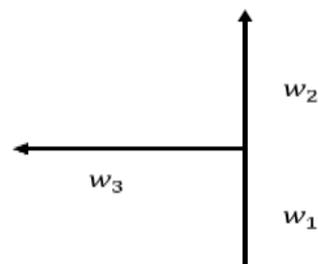
A divisão da corrente gasosa na usina de CO₂, para o uso não liquefeito, minimizou a vazão no condensador, tornando o processo de condensação mais eficiente, ao evitar purga nesta etapa por indispensáveis. Nas Figuras 21 e 22 há visão isométrica e uma representação esquemática da picagem feita para a divisão da corrente gasosa.

Figura 21 – Visão isométrica da adaptação para uso do gás não liquefeito



Fonte: Próprio Autor

Figura 22 – Picagem para uso do gás não liquefeito



Fonte: Próprio Autor

As vazões de ambas as correntes podem ser determinadas através do balanço de massa no volume de controle da picagem da tubulação, pela equação 4.

$$w_1 = w_2 + w_3 \quad (4)$$

Em que

w_1	Corrente do Secador e Purificador
w_2	Corrente para o condensador
w_3	Corrente do não liquefeito

Em analogia, pela análise de pressão, considerando o dióxido de carbono, um gás ideal tem-se que:

$$p_1 = p_2 + p_3 \quad (5)$$

Em que

p_1	Pressão do Secador e Purificador
p_2	Pressão para o condensador
p_3	Pressão do não liquefeito

Deste modo, considerando dióxido de carbono com escoamento ideal, sob a mesma pressão 15,7 bar, saída dos compressores, temperatura de 17,1 °C no purificado, a vazão pode ser através da equação de Clapeyron, pela consideração da Lei dos Gases Ideias. (ATKINS, 2011)

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (6)$$

Em que

P	Pressão do sistema
V	Vazão Volumétrica
n	Vazão molar
R	Constante dos gases
T	Temperatura

Desta forma, sabe-se que a vazão é diretamente proporcional a pressão de operação. Ademais, a vazão média de compressão da planta industrial é 850 kg/h, tem-se

$$w_1 = 850 \text{ kg/h}$$

$$w_2 = 465,60 \text{ kg/h}$$

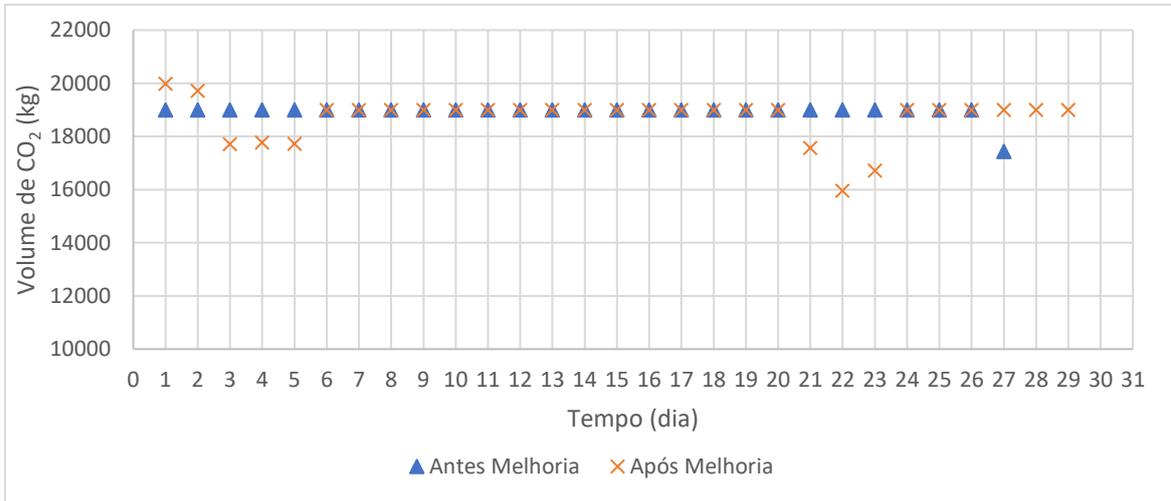
$$w_3 = 384,40 \text{ kg/h}$$

Pelo balanço de massa, realizado pela equação 4 no volume de controle, esperou-se uma redução de 384,40 kg/h na vazão do condensador.

O período de análise foi de 29 dias antes da implementação da melhoria e 29 dias após sua implementação. É sabido que o volume de mosto em produção durante o período de análise e a geração de dióxido de carbono foram constantes e a base de dados utilizada para análise dos resultados encontra-se no Apêndice B.

Na Figura 23, há o volume diário de gás liberado na fermentação antes e depois da implementação do uso CO₂ não liquefeito. Nota-se que o volume de dióxido de carbono disponível para beneficiamento se manteve em um uma média de 22 toneladas/dia.

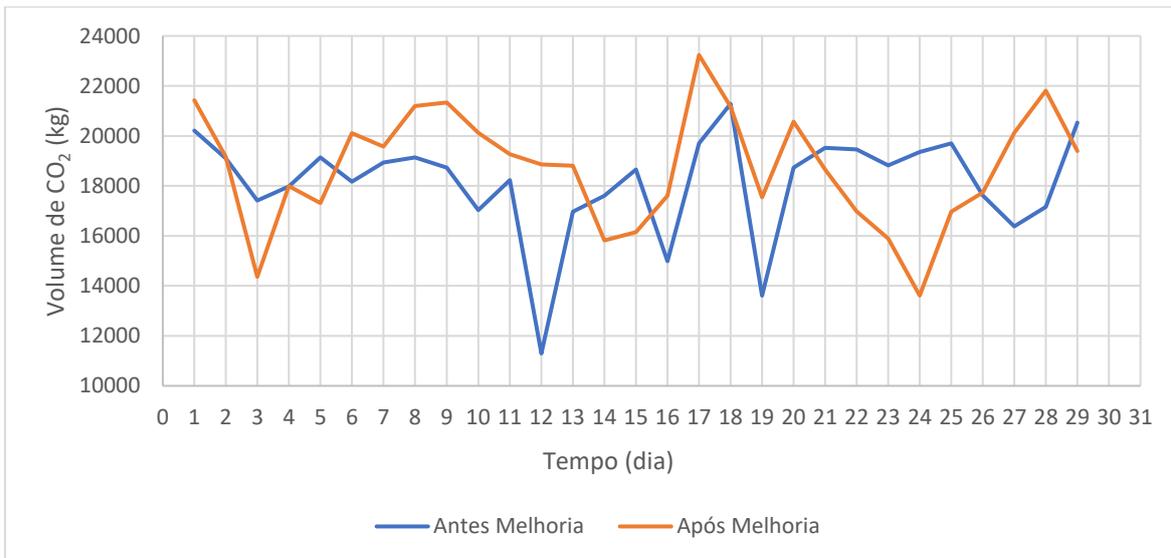
Figura 23 – Volume diário de dióxido de carbono liberado na fermentação



Fonte: Próprio Autor

Quando realizado a mesma análise para o beneficiamento de CO₂, os resultados foram compilados na Figura 24 em comparativo com os resultados da melhoria.

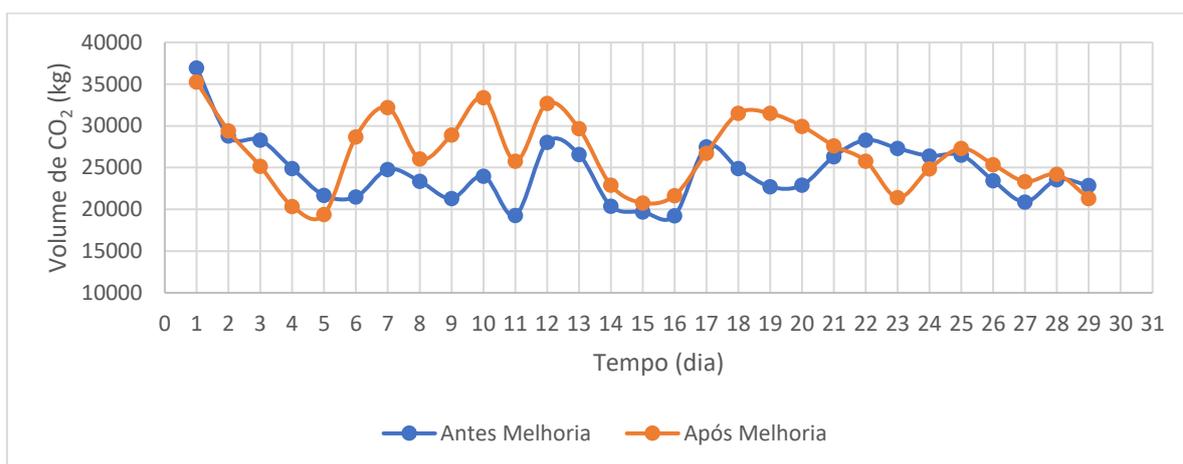
Figura 24 - Beneficiamento do CO₂



Fonte: Próprio Autor

Em análise de estoque, pela Figura 25 nota-se que com o uso do não liquefeito, houve um aumento significativo no volume beneficiado de dióxido de carbono e por consequência um aumento no volume estocado do dióxido de carbono como analisado na Figura 25.

Figura 25 – Estoque de gás



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 2 há as médias de chegada de dióxido de carbono na usina de CO₂, do beneficiamento na planta, e do estoque em kg/dia no espaço amostral.

Tabela 2 – Média do volume CO₂ após implementação melhoria

	Antes da melhoria (kg CO ₂ /dia)	Depois da melhoria (kg CO ₂ /dia)
Produção CO ₂	17.776	18.695
Beneficiamento CO ₂	18.119	18.717
Estoque CO ₂	24.564	26.660

Fonte: Próprio Autor

Em análise comparativa, pode-se notar um *saving* de em média 2 ton/dia de estoque de dióxido de carbono (CO₂), quando implementado seu uso de forma não liquefeita no envasamento das garrafas pelo alívio de pressão no condensador ao evitar purgas por elevada pressão.

3.3. Análise Financeira

Para implementação da melhoria foram necessários um investimento total de R\$ 45.059,98. Os custos detalhados foram estimados e estão presentes na Tabela 3. Para estimativa do valor do analisador de gases e infraestrutura foram utilizados os orçamentos reais para implementação.

No entanto, para estimativa de custo por tempo de usina parada foi considerado o volume de beneficiamento médio por hora, da usina de CO₂ antes da implementação, que não foi beneficiado convertido para o valor da compra do quilo de dióxido de carbono. Nesse sentido, o valor utilizado para cálculo foi estimado como referência de vendas realizadas a uma empresa de gelo seco próxima a planta de Araraquara, no município de São Carlos. Ademais, o custo com automação foi nulo, uma vez que foi feito pela equipe interna da cervejaria.

Valor compra CO₂ 2,40 R\$/ kg CO₂

Tabela 3 – Estimativa e custo para implementação

Materiais	
Analisador de Gases	R\$ 21.000,00
Infraestrutura	R\$ 23.000,00
Válvula Globo diafragma 1 ½ pol	R\$ 2.000,00
Automação	-
5 horas de usina parada	R\$ 9.059,98

Fonte: Próprio Autor

Assim, considerando o *saving* adquirido pela melhoria, e o preço de compra do dióxido de carbono já faturou anual de R\$ 1.810.824,83.

4. CONCLUSÃO

Diante de todo o exposto neste trabalho, pode-se concluir que a utilização do dióxido de carbono não liquefeito em paralelo a forma liquefeita é uma opção viável e pode ser considerado um aliado na busca pelo aumento da receita da cervejaria, ao aumentar o volume de estoque do gás. Além disso, há uma redução das emissões de gases do efeito estufa, visto que parte deste dióxido de carbono que gerava uma sobre pressão no sistema era purgado. A disponibilidade rota alternativa de consumo e à infraestrutura existente de uma usina de CO₂ convencional, coloca a melhoria como um importante aliado na jornada rumo a uma produção mais limpa.

No entanto, a utilização não está isenta de desafios. Aumentar sua produção levanta preocupações sobre a qualidade de envio do gás para o consumo em indústria alimentícia, uma vez que quando condensado, parte das impurezas ou incondensáveis eram purgados. A aplicação da melhoria é simples contando apenas com adaptações físicas de tubulação, e equipamentos já presente em uma usina de dióxido de carbono convencional.

Por fim, o uso consciente de dióxido de carbono, junto a maximização no beneficiamento em prol da minimização de sua liberação na atmosfera assume um papel importante como uma peça-chave na busca por produções ambientalmente sustentáveis.

Sua utilização no meio produtivo, combinada com a implantação de tecnologias mais limpas e estratégias de redução de emissões, contribuirá para um cenário em que a ampliação de produção se alinhe com a sustentabilidade ambiental.

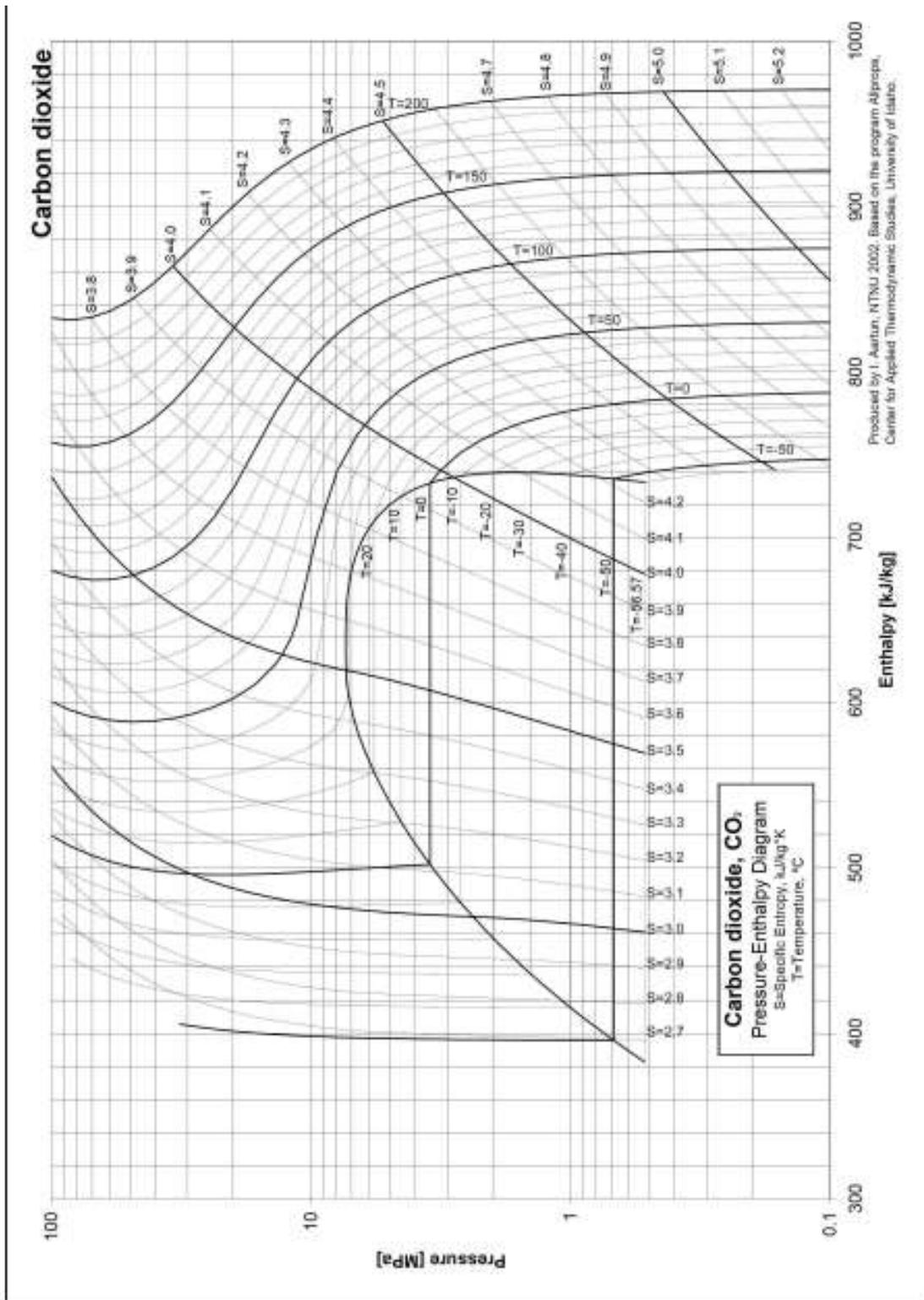
5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. AARTUN I. **Diagrama de pressão e entalpia do CO₂. 2002.** Disponível em: <[http://www.nt.ntnu.no/users/haugwarb/Phase_diagrams_and_thermodynamic_tables/Phase Diagrams/CO2.pdf](http://www.nt.ntnu.no/users/haugwarb/Phase_diagrams_and_thermodynamic_tables/Phase%20Diagrams/CO2.pdf)>, acesso em 28 de novembro de 2010.
2. ATKINS, P.; JONES, L.; **Princípios de Química, questionando a vida moderna e o meio ambiente**; 5ª Ed, Bookman Companhia Ed., 2011
3. BAMFORTH, W. C.; **Beer: tap into the art and science of brewing**, 2nd ed., Oxford University Press: New York, 2003.
4. BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.; VOLKOFF, B. & CERRI, C.C. **CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil**. *Global Chang. Biol.*, 7:779-787, 2001
5. BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. **Brewing science and practice**. CRC Press, New York, 2004.
6. BUCHHAUSER, U., Meyer-Pittroff, R. **Novel Procedure for the Recovery of CO₂ Emerging at the Alcoholic Fermentation**. In: Proc. Congr. Eur. Brew. Conv., Venice 31, EBC electr. Publ, 2007.
7. CARINGTON, T. P. **Carbon Capture and Storage Including Coal-Fired Power Plants**. Nova Science Publishers, Inc. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2010.
8. FICHA de Informações de Segurança de Produtos Químicos: Dióxido de carbono. *In: Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos : Dióxido de carbono*. 1. ed. São Paulo: GamaGases, 2016. Disponível em: <http://www.gamagases.com.br/documentos/dioxido-de-carbono.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2024.
9. KUNZE,Wolfgang. **Technology Brewing and Malting**. 6. ed. German: VLB Belin,2019.
10. NIELSEN, D. R., ELMEGAARD, B., & BANG-MOLLER, C. (2012). **Exergy Analysis of a CO₂ Recovery Plant for a Brewery**. In U. Desideri, G. Manfrida, & E. Sciubba (Eds.), Proceedings of ECOS 2012. Disponível em: <http://www.ecos2012.unipg.it/public/proceedings/html/E2LA.html>
11. OETTERER, M. **Tecnologia de obtenção da cerveja**. 2005. 29f. Material de apoio as aulas – Departamento de Agroindústrias, alimentos e Nutrição, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

12. PRIEST, F. G. **Brewing microbiology**, 3ª ed. Kluwer Academic/Plenum Press, Nova Iorque, 2003.
13. VOLL, D. WAUSCHKUHNA, A. HARTELB, R. GENOESSEB, M. FICHTNERB, W. **Cost Estimation of Fossil Power Plants with Carbon Dioxide Capture and Storage**. Energy Procedia V. 23, pg 333 – 342, 2012.
14. WATSON, Bart. **Craft Beer Packaging Trends Recap-2022**. Desenvolvido por Brewers Association, 2023. Apresenta textos sobre as tendências de mercado cervejeiro. Disponível em: <<https://www.brewersassociation.org/insights/craft-beer-packaging-trends-recap-2022/>> . Acesso em: 20 out.2023.

APÊNDICE A

Figura A1: Diagrama pressão-entalpia do CO₂



Produced by I. Aartun, NTNU 2002. Based on the program Alprops, Center for Applied Thermodynamic Studies, University of Idaho.

Fonte: Aartun et al. (2002)

APÊNDICE B – BASE DE DADOS PARA ANÁLISE DAS MELHORIAS

Tabela B1 – Folha dados: Volume diário de dióxido de carbono liberado na fermentação

Período antes da Melhoria (kg)	Período pós Melhoria	Chegada CO ₂ antes Melhoria (kg)	Chegada CO ₂ depois Melhoria
17/10/2022	24/02/2023	19000	19986
18/10/2022	25/02/2023	19000	19716
19/10/2022	26/02/2023	19000	17720
20/10/2022	27/02/2023	19000	17771
21/10/2022	28/02/2023	19000	17728
22/10/2022	01/03/2023	19000	19000
23/10/2022	02/03/2023	19000	19000
24/10/2022	03/03/2023	19000	19000
25/10/2022	04/03/2023	19000	19000
26/10/2022	05/03/2023	19000	19000
27/10/2022	06/03/2023	19000	19000
28/10/2022	07/03/2023	19000	19000
29/10/2022	08/03/2023	19000	19000
30/10/2022	09/03/2023	19000	19000
31/10/2022	10/03/2023	19000	19000
01/11/2022	11/03/2023	19000	19000
02/11/2022	12/03/2023	19000	19000
03/11/2022	13/03/2023	19000	19000
04/11/2022	14/03/2023	19000	19000
05/11/2022	15/03/2023	19000	19000
06/11/2022	16/03/2023	19000	17573
07/11/2022	17/03/2023	19000	15961
08/11/2022	18/03/2023	19000	16715
09/11/2022	19/03/2023	19000	19000
10/11/2022	20/03/2023	19000	19000
11/11/2022	21/03/2023	19000	19000
12/11/2022	22/03/2023	17436	19000
13/11/2022	23/03/2023	1900	19000
14/11/2022	24/03/2023	1900	19000

Fonte: Próprio Autor

Tabela B2 - Folha dados: Beneficiamento do CO₂

Beneficiamento antes da Melhoria (kg)	Beneficiamento depois da Melhoria (kg)
20212	21430
19099	19165
17421	14358
17980	17995
19137	17318
18175	20105
18936	19578
19138	21193
18737	21342
17027	20127
18234	19262
11298	18855
16965	18810
17607	15819
18651	16151
14990	17609
19705	23235
21282	21171
13606	17539
18734	20574
19519	18649
19453	16987
18815	15899
19361	13613
19704	16968
17618	17733
16379	20120
17163	21807
20533	19397

Fonte: Próprio Autor

Tabela B3 - Folha dados: Estoque de CO₂

Estoque antes da Melhoria	Estoque depois da Melhoria
36940	35260
28790	29400
28310	25150
24910	20360
21680	19390
21500	28700
24800	32190
23380	26060
21300	28900
23990	33380
19260	25770
28030	32700
26580	29680
20400	22900
19700	20770
19240	21660
27510	26750
24890	31500
22710	31500
22890	29960
26330	27610
28300	25790
27300	21400
26400	24860
26490	27300
23440	25370
20890	23330
23550	24190
22850	21310

Fonte: Próprio Autor