UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Recuperação de CO_2 em Microcervejaria

Gustavo Verlang Krämer

Porto Alegre, Dezembro de 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS
CURSO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Recuperação de CO_2 em Microcervejaria

Monografia para obtenção do Título de Engenheiro de Alimentos.

Orientador: Vítor Manfroi

Porto Alegre, Dezembro de 2010

Recuperação de CO_2 em Microcervejaria

Por Gustavo Verlang Krämer

Aprovado em: ____/____/____

Comissão de avaliação:

_____

Prof. Dr. Plinho Francisco Hertz

_____

Prof. Dr. Rafael Costa Rodrigues

_____

Prof. Dr. Vitor Manfroi (orientador)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João e Elva, que me deram muito apoio para estudar e continuar estudando na UFRGS. Eles me serviram de exemplo, pois, vindo do interior, tiveram menos oportunidades que eu, mas conseguiram estudar na UFRGS e vencer na vida. Aos meus ancestrais que herdei a cultura e abriram caminho com seu trabalho. A toda minha família e amigos que tornam a vida mais divertida. A todos os professores e funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que contribuíram para que esta universidade seja uma das melhores do Brasil. Ao professor Vitor Manfroi que é orientador deste trabalho e um grande amigo, que apesar de seu grande status dentro da vinicultura gaúcha e brasileira, nunca deixou de ser uma pessoa simples e não negou suas origens, demonstrando grande personalidade. Aos professores Plinho e Rafael que aceitaram o convite para ser banca deste TCC e que estão aguardando este trabalho, faltando poucos dias para a defesa da tese. Ao prof. Caciano que foi meu orientador do Salão de Iniciação Científica no início do curso. Aos grandes colegas e amigos que tive nesta faculdade, e espero que por meio da tecnologia não percamos contato.

Agradecimentos às empresas e aos colegas que contribuíram para meu crescimento profissional onde fui estagiário: Olvebra, Cervejaria Ralf Beer e Cervejaria Schmitt. Ao Artur Winter da cervejaria Ralf Beer e Gustavo Stefanello Dal Ri da cervejaria Schmitt, pela oportunidade que me deram.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
1.1 O Mercado Cervejeiro 9
1.2 Microcervejarias 10
1.3 Objetivos do Trabalho 11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11
2.1 A História da Cerveja 11
2.2 Ingredientes da Cerveja 15
2.2.1 Água 15
2.2.2 Malte 17
2.2.3 Lúpulo 19
2.2.4 Levedura 21
2.3 Uso de CO_2 na Indústria Cervejeira 23
2.4 Fermentação e formação de CO_2 24
2.4.1 Gravidade 24
2.4.2 Balanço de Massa 25
2.5 Perfil dos Gases de Saída do Fermentador. 27
2.6 Processos de Produção de CO_2 28
2.7 Compressores 31
2.7.1 Compressores de Fluxo Contínuo 32
2.7.2 Compressores de Deslocamento Positivo 33
2.7.3 Compressores Não-Lubrificados 33
2.8 Diagrama de Mollier (Pressão-Entalpia) 34
2.9 Diagrama Pressão-Entalpia do CO_2 35
2.10 Cálculo da Potência de Compressão 37
2.11 Compressão em Múltiplos Estágios 38
2.12 Propriedades do CO_2, da Água e do O_2 39
3 COMPRESSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO. 39
3.1 Cálculo da potência conforme os estágios de compressão. 42
3.2 Definição da quantidade de CO_2 a ser comprimida e da pressão final 43
3.2.1 Compressão em um estágio. 43
3.2.2 Compressão em dois estágios. 44
3.2.3 Compressão em três estágios. 46
4 PLANTA DE REAPROVEITAMENTO DE CO_2 47
5 CONCLUSÃO 49
6 BIBLIOGRAFIA 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Efeitos da composição iônica da água no processo cervejeiro (BOULTON; QUAIN, 2001) 16
Tabela 2: Quantidade de CO_2 utilizado na indústria cervejeira (KUNZE, 1996). 24
Tabela 3: Especificação para reaproveitamento de dióxido de carbono (HAFFMANS, 1996 apud BOULTON; QUAIN, 2001) 27
Tabela 4: Propriedades físicas do CO_2 39
Tabela 5: Propriedade física da água 39
Tabela 6: Propriedades físicas do O_2 39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: À esquerda cevada de várias fileiras (Mehrzeilige Gerste), à direita cevada de duas fileiras (Zweizeilige Gerste) (GERSTE, 2010). 18
Figura 2: Malte em diferentes tempos e temperaturas de secagem, dando origem a cores e aromas diferentes (TRÖEGS, 2010)..... 19
Figura 3: Flores de lúpulo (BEERBLOTTER, 2010)..... 20
Figura 4: Lúpulo cortado e glândulas lupulinas em amarelo (COMPONENTS, 2010)..... 21
Figura 5: Lúpulo processado em péletes (HOP POWDER, 2010)..... 21
Figura 6: Levedura vista em microscópio eletrônico. As cicatrizes resultantes do brotamento são claramente vistas (retirado de BAMFORTH, 2003). 23
Figura 7: Algumas características do progresso de uma típica fermentação de alta gravidade (BOULTON, sem data de publicação apud BOULTON; QUAIN, 2001). 27
Figura 8: Equipamento para coleta, purificação, estoque e liberação de CO_2 (HOUGH et al, 1982 apud BRIGGS et AL, 2004) 29
Figura 9: Reaproveitamento de CO_2, planta de liquefação e suprimento (BOULTON; QUAIN, 2001) 30
Figura 10: Campo de aplicação de compressores e ventiladores (HENN, 2001)..... 32
Figura 11: Esquema do de um diagrama P-h (Mollier) para uma substância pura (VENTURINI; PIRANI, 2005) 35
Figura 12: Diagrama pressão-entalpia do CO_2 (AARTUN, 2002)..... 36
Figura 13: Diagrama de Mollier, compressão de um gás P1 até P2. Adaptado de VENTURINI e PIRANI (2005)..... 37
Figura 14: Esquema de um compressor diafragma após admitir o gás para a compressão, retirado de BLOCH (2006)..... 40
Figura 15: Compressor diafragma comprimindo o gás, retirado de BLOCH (2006)..... 41
Figura 16: Compressor diafragma de dois estágios da empresa Sera, modelo MV5. A razão de compressão de 1:10 por estágio, podendo comprimir até 200 bar, e pressão de sucção igual ou maior a 1 bar. 41
Figura 17: Modelos de compressor diafragma da empresa Burton Corblin..... 42
Figura 18: Diagrama de Mollier, adaptado de AARTUN (2002). 44
Figura 19: Compressão de CO_2 em dois estágios adaptado de AARTUN (2002) 45
Figura 20: Compressão de CO_2 em três estágios adaptado de AARTUN (2002) 46
Figura 21: Planta de recuperação de CO_2 proposta para microcervejarias..... 48
Figura 22: Fluxograma do processo de recuperação de CO_2..... 49

RESUMO

O dióxido de carbono é muito utilizado nas cervejarias, em várias etapas do processo, como contrapressão em tanques, no envase para pressurização de barris e garrafas, na dispensa em máquinas, e em muitos outros casos. A quantidade de CO_2 que uma indústria cervejeira necessita pode ser fornecida pela própria formação de CO_2 da fermentação. As grandes cervejarias possuem usinas de recuperação de CO_2 para aplicar em seu próprio processo, mas as microcervejarias compram CO_2, aumentando os custos de produção. Os gases da fermentação são compostos em mais de 99% de CO_2, enquanto o CO_2 obtido comercialmente é proveniente de queima de combustíveis fósseis, com concentração entre 14 a 18% de CO_2, tornando onerosa a purificação do CO_2. Foi proposta uma miniusina de recuperação de CO_2 para microcervejarias, em que o gás da fermentação é comprimido em torno de 70 bar e a separação dos gases e da umidade é feita no tanque de armazenamento por diferença de densidade, em temperatura ambiente.

Palavras-chave: CO_2, recuperação de dióxido de carbono, microcervejaria, cervejaria, compressor diafragma.

ABSTRACT

Dioxide carbon is very used in breweries, in many process stages, such as counter pressure in tanks, keg and bottle filler for pressurization, machine dispense and many cases. The CO_2 quantity witch one beer industry needs, can be supplied by its formation of fermentation CO_2. Large Breweries have CO_2 recovery plant to apply in their process, but the microbrewery buy CO_2, increasing the production costs. Fermentation gases are consisting of more than 99% of CO_2, while the CO_2 obtained commercially is coming from burn fossil fuels, in concentration between 14 to 18% of CO_2, becoming the CO_2 purification expensive. A miniplant of CO_2 recovery was proposed for microbreweries, of which the fermentation gas is compressed around 70 bar and the gases separation and humidity occurs in storage tank, by density difference, in room temperature.

Key-words: CO_2, dioxide carbon recovery, microbrewery, brewery, diaphragm compressor,

1 INTRODUÇÃO

A cerveja faz parte da história da humanidade, não só por questões de entretenimento e confraternização, como também por questões de sobrevivência dos povos primitivos. Portanto, mesmo que este trabalho seja sobre o processo de reaproveitamento de CO_2 de microcervejarias, é muito importante citar a história e a filosofia incrível que esta bebida nos traz. Por outro lado, é uma bebida alcoólica encarada com preconceitos por muitas pessoas, sendo, em muitos casos, como a culpada pelos desastres que ocorrem diariamente em acidentes de trânsito e brigas, entre outros. A verdadeira culpada disso tudo é uma minoria da população, são os próprios seres humanos que, por falta de limites e desrespeito às leis e às outras pessoas, abusam de seu consumo. Seria o mesmo que dar culpa às armas e não àqueles que apertam o gatilho. Por estes motivos, muitas questões científicas deixam de ser acreditadas pela população, encaradas como preconceito, de que o consumo moderado diário de cerveja traz inúmeros benefícios à saúde e um dos responsáveis pelo benefício é o próprio álcool, sendo um remédio, quando consumido em pequenas doses.

Nesse sentido, o papel das microcervejarias é muito importante, e elas possuem bom potencial no mercado brasileiro. Ainda, há necessidade de educar a população, dando preferência às cervejas de melhor qualidade, tornando rotina o consumo diário e moderado da bebida. O grande entrave das microcervejarias é a alta carga tributária no Brasil, logo uma planta de reaproveitamento de CO_2 contribuiria muito para a redução de custos de produção, aumentado a competitividade com as grandes indústrias.

1.1 O Mercado Cervejeiro

De acordo com os dados do SINDICERV (Sindicato Nacional da Indústria da Cerveja), o Brasil era o quarto maior produtor mundial de cerveja em 2007, com 10,37 bilhões de litros ao ano. Os maiores produtores são a China com 35 bilhões, Estados Unidos com 23,6 bilhões e a Alemanha com 10,7 bilhões de litros ao ano. Em consumo per capta (dados de 2002 e 2003), o Brasil ocupa a nona posição com 47,6 litros ao ano por pessoa. O líder em consumo é a República Tcheca com 158 litros ao ano por pessoa. Isso mostra que o

Brasil tem um bom potencial de consumo, que é freado pelo baixo poder aquisitivo da população (SINDICERV, 2010). 167 países no mundo produzem mais de 144 bilhões de litros de cerveja ao ano (EL MUNDO, 2005).

Confirmando esta tendência, o consumo de cervejas em 2009 foi 10% maior que o de 2008, alcançando 57,4 litros ao ano por pessoa no Brasil (GOMES, 2010).

De acordo com a pesquisa do Instituto Nilsen, quase 99% do mercado nacional de cerveja é dominado por quatro empresas: Ambev, 70%; Schincariol, 11,6%; Petrópolis, 9,6%; e a Femsa (comprada pela Heineken em 2010), 7,2%. As microcervejarias participam em menos de 1% do mercado, havendo pelo menos 100 delas, sendo que a maior parte encontra-se na região sul (THOMÉ, 2010).

Do valor final da cerveja, 54,8% são de tributos. Toda a indústria de bebidas sofre com a alta carga tributária: 45,8% sobre refrigerantes; 43,9% sobre a água mineral; 34% sobre a água de coco (DE MELO, 2010).

1.2 Microcervejarias

No período anterior à Revolução Industrial, apenas existiam microcervejarias. Muitas cidades da Europa tinham suas cervejarias, que fabricavam em baixas quantidades, e diversos tipos de cervejas. Após a revolução industrial, com o invento das máquinas a vapor, começou a produção de cervejas em grande escala, em indústrias. Com isso, houve grande desenvolvimento tecnológico, melhorias de processos e, aos poucos, o conhecimento da ciência da cerveja era mais bem entendida. Hoje, as marcas das grandes cervejarias dominam o mercado, mas o preço disso é a padronização das cervejas. As grandes cervejarias conseguem pôr seu produto em praticamente todo o Brasil (e no mundo), e a grande maioria das cervejas são as Pilsen, suaves e com pouco aroma e sabor.

Na contramão disso tudo, nos últimos 15 anos, as microcervejarias estão ganhando espaço, pois fabricam outros tipos de cervejas além das tradicionais Pilsen. É praticamente impossível que uma cervejaria fabrique uma cerveja igual à de outra cervejaria. A tendência disso tudo é em cada cidade haver suas próprias microcervejarias, com cervejas únicas, com estilos e sabores próprios. O consumidor ganha em qualidade e variedade, além de as microcervejarias poderem se integrar melhor à comunidade. Com isso, cria-se a cultura

cervejeira, e esta bebida pode ter status tão nobre quanto os bons vinhos, e não apenas como uma bebida para matar a sede no verão, e sim, como algo saudável que pode ser consumido diariamente e com muita moderação. Ainda falta educar a população para o consumo de bebidas mais nobres e caras, pois se vê muitas pessoas, com bom poder aquisitivo, consumindo marcas de cervejas comuns e de qualidade duvidosa. Primeiramente, deve-se derrubar o mito de que "cervejas são todas iguais", pois com esta cultura é que faz com que as pessoas escolham as cervejas pelo preço, e não pela qualidade. Esse é o trabalho que as microcervejarias estão fazendo, de interagir com a comunidade, educando os consumidores a conhecerem cervejas especiais.

1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar formas de como aproveitar o CO_2 gerado em microcervejarias, podendo ser utilizado no próprio processo cervejeiro, como também, no reabastecimento de cilindros de CO_2, para a dispensa de cervejas em máquinas (chopeiras) e para o envase. Este processo reduz os custos de uma microcervejaria, evitando a compra de CO_2.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A História da Cerveja

A cerveja é resultado de 10000 anos de evolução. Portanto, ao dizer que povos antigos consumiam cerveja, esta era muito diferente da bebida que conhecemos hoje.

Acreditava-se que o consumo de cerveja teve origens no antigo Egito, porém as mais antigas evidências são dos povos da Mesopotâmia (HORSNEY, 2003), atual Iraque, entre os Rios Tigre e Eufrates, há 8000 anos a.C. Nesta época, iniciou-se a agricultura, período pré-histórico chamado de Neolítico, e a necessidade da armazenagem de alimentos.

É muito provável que o cereal utilizado pelos povos daquela região era a cevada, pois esta cultura é adaptada ao clima adverso da Mesopotâmia, e, além disso, massas feitas desse cereal tinham sabor desagradável, então era melhor utilizado para fazer bebidas. Esta cerveja pré-histórica tinha fins alimentícios, era uma sopa de grãos turva, espessa e ácida que tinha durabilidade vital para os meses de escassez de alimentos (CASSÁ, 2003).

Em 4000 a.C., os povos sumérios que habitavam a Mesopotâmia já desfrutavam de uma bebida mais padronizada, não só para fins alimentícios, chamada de *sikaru*. Alguns autores afirmam que a cerveja difundiu-se a partir da Mesopotâmia, outros que surgiu no Egito, e mais alguns que surgiu de maneira independente em vários povos (CASSÁ, 2003). Pão e cerveja eram os itens mais importantes da dieta dos egípcios (HORSNEY, 1999).

Em 1000 anos a.C., a cerveja estava consolidada entre os povos germânicos. Após a queda do império romano, nos lugares onde havia dominância dos povos bárbaros, (norte e centro europeu) difundiu-se a cultura da cerveja, enquanto ao redor do mar Mediterrâneo, a cultura vinícola (CASSÁ, 2003). Fazer cerveja e pão era tarefa doméstica comum realizada pelas mulheres (KUNZE, 1996), e tinha muita importância, pois era parte essencial da alimentação. A cerveja era fervida (EL MUNDO, 2005), ácida e continha álcool, sendo muito importante para evitar contaminação. Então era mais seguro beber cerveja do que água, pois esta era de qualidade microbiológica duvidosa (HOUGH, 1990).

Na Idade Média, a produção de cerveja passou para uma escala maior graças à religião cristã e seus mosteiros e conventos, onde a cerveja não era produzida apenas para seu próprio consumo, mas como forma de pagamento (KUNZE, 1996). Os mosteiros e conventos tinham melhor situação econômica e melhor nível cultural dos seus monges e freiras (CASSÁ, 2003). Os monges viajavam de mosteiro em mosteiro na Europa, em busca de conhecimentos religiosos, difundindo e aperfeiçoando as técnicas de fazer cerveja. Era muito provável que os cervejeiros testavam todos os tipos de ervas para aromatizar a cerveja (EL MUNDO) e esta cerveja adicionada de ervas era chamada de Grut (KUNZE, 1996). Uma das ervas utilizadas foi o lúpulo, descoberto muito mais tarde (BAMFORTH, 2003), em Hallertau, região da Bavária, em 736 d.C., sendo um grande achado, pois o lúpulo é aromatizante e conservante. (HORSNEY, 1999). Uma freira da Igreja Católica teve um papel muito importante na história da cerveja: a Santa Hildegard Von Bingen documentou o uso do lúpulo, tornando seu uso popular. A Igreja foi muito importante para o desenvolvimento da cerveja (EL MUNDO, 2005). No século XIV, o lúpulo passou a ser a única erva utilizada na fabricação da cerveja (KUNZE, 1996)

Para evitar o uso de ingredientes de panificação, mais baratos, e de outras ervas que não fosse o lúpulo, o Duke Wilhelm IV da Baviera proclamou a Reinheitsgebot, lei da pureza em alemão, em 23 de abril de 1516, na cidade de Ingolstadt (KUNZE, 1996). Esta lei obrigava que a cerveja fosse fabricada apenas com água, malte de cevada e lúpulo (EβLINGER, 2009).

Até o século XV, apenas conhecia-se a cerveja de alta fermentação, chamada de A*lt* na Alemanha e de *ale* na Inglaterra (CASSÁ, 2003). Neste período, monges de Munique descobriram por acidente um tipo de cerveja que hoje chamamos de Lager, baixa fermentação, ao deixar a cerveja fermentar em lugares de baixas temperaturas, conduzindo a um novo tipo de levedura, dando origem a uma cerveja mais cristalina e suave. Atualmente, as cervejas Lager correspondem a mais de 90% de produção mundial (EL MUNDO, 2005). Até o século XIX, não havia estudo científico das leveduras (CASSÁ, 2003).

Fábricas inglesas de cervejas do estilo Porter foram as primeiras a produzir cerveja em escala industrial, usando máquinas a vapor, no final do século XVIII (PRIEST; STEWART, 2006).

Em 1810, comemoravam-se as bodas do príncipe Ludwig e da princesa Therese, dando origem ao maior festejo público cervejeiro do mundo, a Oktoberfest de Munique, na Alemanha (EL MUNDO, 2005).

A partir do século XIX, começaram a surgir inúmeras descobertas científicas que tiveram ligação direta com a ciência da cerveja O cervejeiro alemão Josef Groll criou a cerveja Pilsen, em Plsen (Pilsen), na República Tcheca. A pilsen é uma cerveja Lager muito famosa e consumida hoje, pois é uma cerveja clara, transparente, dourada, seca e leve, diferente das Lager da época, que eram escuras e doces (CASSÁ, 2003). Gabriel Sedlmayr foi um cervejeiro alemão que começou a utilizar os avanços tecnológicos na fabricação da cerveja, como o sacarímetro, o termômetro e a máquina a vapor. Sedlmayr fundou a cervejaria Späten que existe até hoje (EL MUNDO, 2005). Luis Pasteur demonstrou que bactérias podiam alterar a cerveja (PRIEST; STEWART, 2006), mas Emil Christian Hansen, do laboratório Carlsberg em Copenhagen, descobriu que na verdade são as leveduras selvagens que também causam as alterações (BAMFORTH, 2003). Hansen afirmava que ao controlar o processo, podiam-se isolar culturas de leveduras puras das leveduras selvagens (HORSNEY, 1999). Luis Pasteur concluiu que a fermentação era o principal fator decisivo para a cerveja tornar-se estável (KUNZE, 1996).

Com o uso do microscópio, Luiz Pasteur descobriu que as bactérias alteravam o sabor da cerveja mesmo depois de pronta. Então, introduziu a técnica da pasteurização que revolucionou as cervejarias, aumentando a durabilidade da cerveja. A pasteurização permitiu o desenvolvimento de grandes cervejarias, que poderiam armazenar as cervejas sem riscos. (EL MUNDO, 2005). No final do século XIX, houve a redução do número das cervejarias, pois as pequenas cervejarias estavam sendo substituídas pelas grandes (CASSÁ, 2003).

Nos Estados Unidos, Adolphus Busch introduziu todas as inovações científicas possíveis para criar a primeira cervejaria no seu país. Sua cervejaria, Anheuser-Busch, passou usar a pasteurização e o transporte refrigerado para colocar sua cerveja em todo país, a Budweiser. A Budweiser era feita de cevada malteada e arroz, de sabor suave, para ser aceita pelo maior número de pessoas (EL MUNDO, 2005).

Nos últimos 30 anos, havia apenas grandes cervejarias que fabricavam cervejas Lager, na América do norte. Além das grandes, começaram a surgir as pequenas cervejarias, com diferentes cervejas e aromas que não eram conhecidos pelos americanos, mas aos poucos foi conquistando um bom mercado. Em 1976, havia apenas 16 fábricas de cervejas na América do Norte, hoje, com o avanço das pequenas cervejarias, são milhares (EL MUNDO, 2005).

No Brasil, mais de 900000 hl de cerveja eram produzidos em 1913. A primeira cervejaria a operar foi em 1836, na cidade do Rio de Janeiro, (EβLINGER, 2009 apud Köb, 1999). De acordo com MELO (2000), o indício da primeira cervejaria em 1836 veio de uma publicação do Jornal do Commercio do Rio de Janeiro, que anunciava a cerveja da “Cervejaria Brazileira”.

Em 1888, foi fundada no Rio de janeiro a Manufatura de Cerveja Brahma Villigier e Cia e em 1891 a Companhia Antártica Paulista. Em 1999, as duas maiores cervejarias brasileiras, a Brahma e a Antártica, uniram-se formando a American Beverages a AmBev (VENTURINI FILHO, 2000).

Mundialmente, ocorreram fusões entre grandes cervejarias como a Belga-brasileira InBev, formada pela Interbrew e a AmBev. Também entre as companhias SAB e Miller e entre Coors e Molson (EβLINGER, 2009).

2.2 Ingredientes da Cerveja

2.2.1 Água

A água corresponde a cerca de 95 % do peso da cerveja, dependendo do tipo de cerveja. É utilizada para limpeza, resfriamento, geração de vapor e outros, sendo para isto de 4 a 10 vezes maior que o volume gasto na produção de cerveja. A composição da água é muito importante para cada tipo de cerveja: o alto conteúdo de sulfato de cálcio é ideal para a fabricação das cervejas tipo Pale Ale, já águas mais brandas são ideais para as Pilsen. Águas ricas em bicarbonato de cálcio (dureza temporal) são excelentes para cervejas mais escuras. Com os estudos da composição química da água, hoje é possível retirar e adicionar sais para melhorar a qualidade da cerveja, podendo-se fabricar qualquer tipo de cerveja em qualquer parte do mundo (HOUGH, 1990).

Dureza total é a quantidade de minerais alcalinos terrosos, como cálcio, magnésio, estrôncio e bário, sendo apenas cálcio e magnésio medidos, e o restante negligenciado. O cálculo da dureza não carbonato é a diferença entre a dureza total e a dureza carbonato (EβLINGER, 2009). Dureza carbonato é chamada de dureza temporária, são sais de cálcio e magnésio ligados a carbonatos (CO_3) e bicarbonatos (HCO_3). Dureza não-carbonato é chamada de dureza permanente, são sais de cálcio e magnésio ligados a íons de sulfato (SO_4^{-2}), nitrato (NO_3^-) e cloretos (Cl^-). Sais de ferro e de magnésio são removidos por aeração, pois são convertidos em formas insolúveis e precipitados (KUNZE, 1996). A tabela 1 mostra um bom resumo do efeito da composição iônica da água.

Tabela 1: Efeitos da composição iônica da água no processo cervejeiro (BOULTON; QUAIN, 2001)

Íon	Efeito
Amônio	Indicativo de contaminação com decomposição de material orgânico
Cálcio	Um dos mais significantes íons, com vários efeitos. Interage com fosfatos e proteínas para reduzir o pH da mistura, promovendo a formação de um mosto claro. Precipita oxalatos do mosto que podem causar turbidez na cerveja. Ativa as α-amilases e proteases na mistura. Promove a floculação das leveduras no fim da fermentação. Inibe a extração de resinas do lúpulo em alta concentração. Tem um sabor amargo adstringente.
Cobre	Em alta concentração é tóxico para as leveduras. Elimina H_2S da cerveja e sulfetos insolúveis.
Ferro	Tóxico para as leveduras. Pode produzir tubidez e alterações na coloração da cerveja.
Magnésio	Reduz o pH do mosto pela interação com fosfatos, porém menos importante que o cálcio. Importante co-fator para muitas enzimas, especialmente aquelas que catalisam o piruvato durante a fermentação. Componente essencial da muitas enzimas envolvidas com o ATP.
Manganês	Co-fator de muitas enzimas da levedura e do malte.
Potássio	Dá sabor salgado à cerveja.
Sódio	Em combinação com cloreto, contribui para a suavidade na cerveja
Zinco	Inibidor do crescimento das leveduras quando em altas concentrações (>1 ppm), porém estimula a fermentação em baixas concentrações (0,1-0,3 ppm).
Bicarbonato	Em altas concentrações (>100 ppm), causa aumento do pH da mistura e conseqüentemente redução na formação de extrato.
Cloreto	Inibe a fermentação em altas concentrações (>600 ppm). Contribui para dar corpo à cerveja em baixas concentrações, porém pode dar sabor salgado em concentrações acima de 400 ppm.
Nitrato	Precursor de nitrosaminas formadas por *Obesumbacterium proteus*
Fosfatos	Interage com cálcio e magnésio para reduzir o pH do mosto durante a mostura. Nutriente essencial para as leveduras.
Sulfatos	Precursor da síntese de aminoácidos que contêm enxofre pelas leveduras, em mostos com baixa quantidade de aminoácido. Precursor da formação de sulfetos pela levedura que melhora a estabilidade aroma da cerveja.

2.2.2 Malte

No Brasil, a cevada *(Hordeum vulgare* ssp. *vulgare*), para fins cervejeiros é cultivada desde a década de 30 (ÁRIAS, 1995). O cultivo da planta é realizado no sul do Brasil, principalmente no Rio Grande do Sul e no Paraná, em função da melhor adaptação da espécie ao clima temperado. Nos anos 90, a produção atingiu apenas um terço da capacidade de malteação no Brasil. A razão para este déficit é a instabilidade da quantidade e da qualidade da cevada nacional e o maior custo do produto interno relativo ao importado (MINELLA, 1999).

Vários grãos podem ser malteados, mas a cevada (figura 1) apresenta menores problemas técnicos, como por exemplo, ao maltear o milho, as gorduras rancificam-se. A cevada tem maior proporção em amido que outros grãos. O amido dá origem ao extrato fermentável. Já a quantidade de proteínas na cevada é suficiente para o crescimento das leveduras e para a formação da espuma na cerveja pronta. Proporção alta de proteínas não é desejável. A cevada de duas fileiras é mais interessante para as cervejarias que as de seis fileiras, pois possui maior proporção de amido e menor de proteína. Porém, a produtividade no campo mais alta é da cevada de seis fileiras, que é mais interessante para o agricultor (HOUGH, 1990).

Para a produção de malte (figura 2) o grão de cevada é molhado para aumentar sua umidade de 11 para 46%, em dois dias. Vários aditivos podem ser utilizados nesta fase: hidróxido de cálcio ou de sódio para melhorar a extração de fenóis; formaldeído para redução da carga microbiana; peróxido de hidrogênio para aumentar a quantidade de oxigênio auxiliando na germinação. A fase de germinação dura cerca de cinco dias, e a umidade cai de 46 para 43%. Durante esta fase há o crescimento do embrião e produção de enzimas. Durante a fase de secagem, a umidade cai de 43 para 5%, matando o embrião. São aplicados tempos temperaturas controlados para formação de compostos que dão cor e

aroma ao malte (melanoidinas, furanos, pirroles, tiofenos e pirazinas) (PRIEST; STEWART, 2006).

A principal função da malteação é produção de enzimas. São elas:

- Enzimas amilolíticas - α-amilase e β amilase;
- Enzimas citolíticas - β-glicanases e citases;
- Enzimas proteolíticas - proteases;
- Enzimas de remoção de ácido fosfórico – fosfatases.

A α-amilase é a enzima mais importante, pois ela é responsável pela degradação do amido do malte durante o processo cervejeiro (KUNZE, 1996).

Figura 1: À esquerda cevada de várias fileiras (Mehrzeilige Gerste), à direita cevada de duas fileiras (Zweizeilige Gerste) (GERSTE, 2010).

Figura 2: Malte em diferentes tempos e temperaturas de secagem, dando origem a cores e aromas diferentes (TRÖEGS, 2010)

2.2.3 Lúpulo

O lúpulo (*Humulus lupulus*), visto na figura 3, é uma planta dióica (há plantas macho e fêmea) e robusta, pertencente à família do cânhamo, ou da maconha (*Cannabaceae*), é uma trepadeira e seus cones de flores femininas não polinizadas são utilizadas no processo cervejeiro. A parte herbácea é sazonal, porém as raízes são perenes. É cultivado entre as latitudes 35° e 55°, onde há grande tempo de exposição solar no verão (EβLINGER, 2009). O lúpulo não possui substâncias alucinógenas (HOUGH, 1990).

O lúpulo contém substâncias amargas, que é uma mistura de vários ácidos e resinas. Estas substâncias são muito importantes para a fabricação da cerveja, pois além do amargor são inibidores de crescimento microbiano e melhoram a estabilidade da espuma. Os óleos essenciais do lúpulo são formados pela glândula lupulina (figura 4), sendo responsáveis pelo aroma e são parcialmente voláteis durante a fervura do mosto. O lúpulo também contém polifenóis, ou taninos, conferindo sensação adstringente, além de precipitar

proteínas complexas presente no mosto e de formar cor marrom-avermelhada, durante a fervura (KUNZE, 1996).

O α-ácido (humulona) presente no lúpulo, é o principal componente que fornece amargor à cerveja. Já os β-ácidos (lupulonas) são compostos similares, mas de menor importância. Durante o cozimento, os α-ácidos são isomerizados em iso-α-ácido, ou isohumulona, que são bem mais amargos e mais solúveis que os α-ácidos (HOUGH, 1990). Os α-ácidos contribuem nove vezes mais para o amargor que os β-ácidos (KUNZE, 1996).

O uso de cones (flores) secos de lúpulo é raro. É mais usado o lúpulo pré-processado peletizado, visto na figura 5, em que é moído e prensado em péletes, adicionado de hidróxido de magnésio formando sais de magnésio de α-ácidos para melhor estabilidade. Os péletes são embalados em ausência de oxigênio para melhor estabilidade. É possível aquecer os péletes para pré-isomerizar os α-ácidos. Também, há a possibilidade do uso de extrato de resinas e óleos essenciais de lúpulo, extraídos com CO_2, pois os solventes orgânicos deixam resíduos (BOULTON; QUAIN, 2001).

Figura 3: Flores de lúpulo (BEERBLOTTER, 2010)

Figura 4: Lúpulo cortado e glândulas lupulinas em amarelo (COMPONENTS, 2010)

Figura 5: Lúpulo processado em péletes (HOP POWDER, 2010)

2.2.4 Levedura

Leveduras (figura 6) são fungos unicelulares que se reproduzem vegetativamente por brotamento. As leveduras utilizadas para as cervejas ales, ou de alta fermentação, são as *Saccharomyces cerevisiae.* A temperatura de fermentação das ales é entre 18 e 22°C. Já para as cervejas de Lager, ou de baixa fermentação, são as *Saccharomyces carlsbergensis*, mais

tarde classificadas como *Saccharomyces uvarum*, e depois como *Saccharomyces cerevisiae* var. *carlsbergensis* e por fim como *Saccharomyces pastorianus*. A temperatura de fermentação das Lager é entre 7 a 15°C (PRIEST; STEWART, 2006). Com o emprego de técnicas modernas, revelou-se que as leveduras usadas na alta e na baixa fermentação possuem muitas diferenças genéticas (EβLINGER, 2009).

A diferença entre a parede celular é que define se as leveduras irão flutuar durante a fermentação ou depositar no fundo. Algumas cepas de leveduras têm dificuldade de se separar da célula mãe, formando aglomerados, assim sedimentam-se mais facilmente. Outras cepas são floculantes, pois cada célula é atraída por outra formando flocos, acredita-se que seja causada, em parte, por pontes de cálcio e ligações de hidrogênio (HOUGH, 1990).

As leveduras são capazes de metabolizar açúcares tanto em presença de oxigênio (aerobiose, respiração) produzindo mais energia, ou em ausência de oxigênio, produzindo menos energia (anaerobiose, fermentação). As leveduras apenas conseguem metabolizar mono-, e dissacarídeos. Polissacarídeos, como o amido, não são metabolizáveis. As reações químicas ocorridas podem ser resumidas em:

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6\,H_2O + 6CO_2$ glicose + oxigênio → água + dióxido de carbono	Respiração
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,C_2H_5OH + 2CO_2$ glicose → etanol + dióxido de carbono	Fermentação

Estas equações são apenas resumo, pois as reações são muito mais complexas (KUNZE, 1996).

As leveduras são responsáveis por quatro mudanças importantes na fermentação: (1) transformação do açúcar em álcool; (2) formação de ácidos e remoção de tampões baixando o pH; (3) carbonatação, causada pela formação de CO_2; (4) produção e liberação de vários compostos metabólicos, normalmente em baixas concentrações (LEWIS; BAMFORTH, 2006).

Leveduras selvagens podem causar problemas na cerveja, como aromas anômalos, turbidez de difícil remoção e formação de filme no topo do mosto fermentado. Alguns contaminantes podem ser outras cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, ou de espécies do mesmo gênero. Outros exemplos de contaminantes são: *Candida, Pichia, Hansenula* ou *Torulopsis* (HOUGH, 1990).

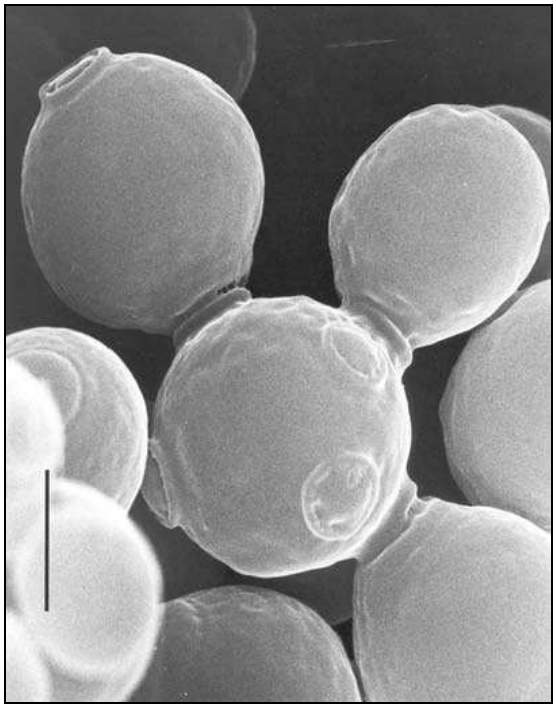


Figura 6: Levedura vista em microscópio eletrônico. As cicatrizes resultantes do brotamento são claramente vistas (retirado de BAMFORTH, 2003).

2.3 Uso de CO_2 na Indústria Cervejeira

O CO_2 pode ser usado na indústria, entre outras operações para: (a) aspersão na cerveja durante a maturação; (b) contrapressão em tanque de estocagem de cerveja; (c) purga de filtros e de linhas de transferência; (d) operação de envase (PRIEST; STEWART, 2006).

As cervejarias compram muito CO_2 para usar no processo e na dispensa de cerveja em barril, sendo que é um produto caro. No total, são usados em torno de 1,8-2,0 kg de CO_2 para cada hectolitro de cerveja. A tabela abaixo mostra o quanto de CO_2 é utilizado em vários processos (KUNZE, 1996).

Tabela 2: Quantidade de CO_2 utilizado na indústria cervejeira (KUNZE, 1996).

	Kg CO_2/hl
Contrapressão em tanque de estocagem e para esvaziá-lo	0,35-0,50
Contrapressão no filtro e para esvaziá-lo	0,40-0,50
Pressurização de tanque	0,30-0,50
Contrapressão na enchedora de garrafas sem pré-evacuação	0,18-0,22
Contrapressão na enchedora de garrafas com pré-evacuação	0,35-0,40
Enchedora de barris com contrapressão	0,90-1,10
Enchedora de latas	0,60-0,80
Ajuste de carbonatação	0,10-0,20
Carbonatação total	0,50-0,70
Caminhão tanque	0,30-0,50
Dispensa (chopeiras)	0,20-0,50

2.4 Fermentação e formação de CO_2

2.4.1 Gravidade

A maneira de medir a quantidade de açúcares dissolvidos no mosto é através da gravidade, expressa em °P (Plato). 1°P corresponde a 1 grama de sólidos dissolvidos em 100 gramas de mosto. Como o álcool possui densidade menor que a densidade da água, à medida que os açúcares vão sendo consumidos pelas leveduras e transformados em álcool, a gravidade do mosto é reduzida. Esta redução é chamada de *graus de atenuação*. A porcentagem de fermentabilidade, mostrada na equação 1, é a proporção de sólidos dissolvidos no mosto que podem ser fermentados. A mais baixa gravidade alcançada após a fermentação é chamada de *atenuação limite da gravidade*, ou *atenuação limite aparente* (BRIGGS et al, 2004).

$$\text{Fermentabilidade}\,(\%) = \frac{\text{Gravidade original}\,(°\text{P}) - \text{Gravidade final}(°\text{P})}{\text{Gravidade original}\,(°\text{P})} \times 100 \qquad 1$$

(BRIGGS et al, 2004)

Para saber a verdadeira gravidade, *atenuação real*, isto é, a quantidade de açúcares ainda presente no mosto depois de fermentado, deve-se remover o álcool do mosto. A *atenuação real* é aproximadamente 80% da *atenuação aparente*. A *atenuação limite aparente* apenas é obtida em laboratórios, sob condições especiais, com leveduras pré-lavadas com mosto e fermentação com mosto filtrado a 25°C. Nas cervejarias, a *atenuação limite aparente* geralmente não é alcançada. Se houver uma grande diferença entre a atenuação final e a *atenuação limite aparente*, então há extrato fermentável presente na cerveja, representando risco de contaminação por leveduras e bactérias (BRIGGS et al, 2004).

2.4.2 Balanço de Massa

A seguir, estão descritas as mudanças ocorridas durante a fermentação de uma cerveja Lager de alta gravidade, isto é, fermentada a partir do mosto concentrado. A temperatura inicia-se em 11°C, permitido-se aumentar até 12°C, sendo controlada. A fase lag de crescimento das leveduras dura em torno de 12 a 24 horas, e há poucas alterações da gravidade, biomassa e conteúdo de álcool. Já nas primeiras 24 horas, o conteúdo de oxigênio cai para níveis não detectáveis, e os níveis de Amino-nitrogênio livre (free amino nitrogen, FAN) começam a cair acompanhados do declínio do pH. A taxa do declínio da gravidade específica é máxima entre 24-36 horas, conseqüentemente a taxa de formação de álcool e de geração de biomassa é máxima neste intervalo. Após 80 horas, o FAN e o pH atingem os níveis mínimos. O mínimo valor da gravidade específica, e máxima quantidade de álcool e de biomassa acorrem após 100 horas. A figura 7 mostra graficamente as modificações. Um balanço de massa simplificado do processo está escrito abaixo (BOULTON; QUAIN, 2001).

$$\begin{array}{lllllllll} \text{açucar} + & \text{amino nitrogênio livre (FAN)} + & \text{levedura} + & \text{oxigênio} & \rightarrow & \text{etanol} & + & CO_2 & + \text{ levedura} \\ (150 g\, l^{-1}) & (150 mg\, l^{-1}) & (1 g l^{-1}) & (25 mg\, l^{-1}) & & (45 g\, l^{-1}) & & (42 g\, l^{-1}) & (5 g\, l^{-1}) \end{array}$$

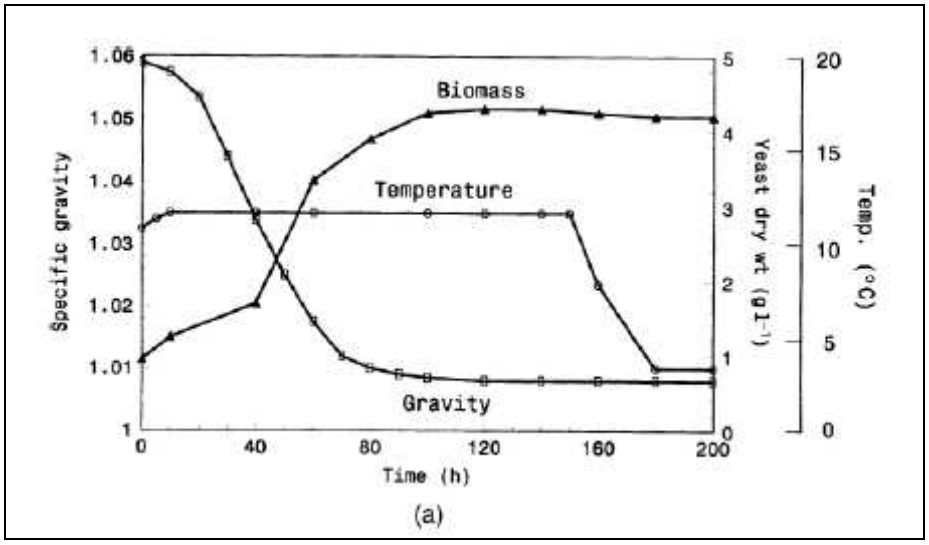
(BOULTON; QUAIN, 2001)

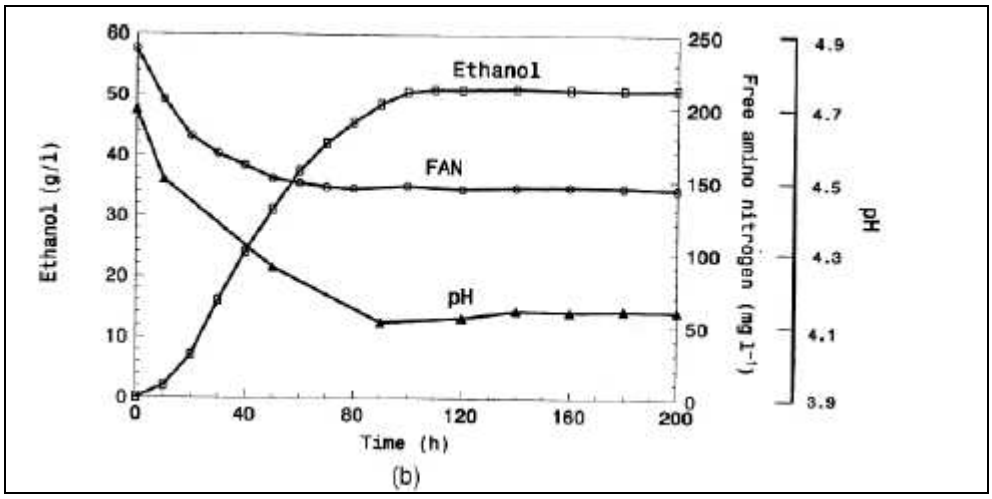
A conversão de açúcar em álcool é em torno de 88% do valor teórico, pois os outros 12% são utilizados pela levedura para gerar biomassa adicional e outros produtos metabólicos de crescimento. A geração de álcool e de CO_2 é em proporção equimolar (Oura et al., 1980 apud BOULTON; QUAIN, 2001).

Abaixo, outro balanço de massa e a energia liberada durante a fermentação:

$$\begin{array}{lllllll} \text{maltose} + & \text{amino ácido} \rightarrow & \text{levedura} & + & \text{etanol} & + & CO_2 & + & \text{energia} \\ (100 g) & (0{,}5 g) & (5 g) & & (48{,}8 g) & & (46{,}8 g) & & (50 Kcal) \end{array}$$

(BAMFORTH, 2003)





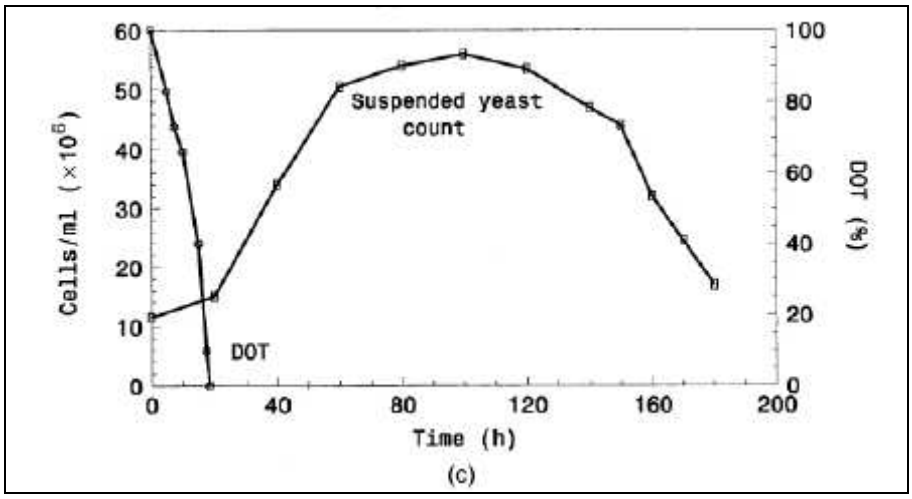


Figura 7: Algumas características do progresso de uma típica fermentação de alta gravidade (BOULTON, sem data de publicação apud BOULTON; QUAIN, 2001).

2.5 Perfil dos Gases de Saída do Fermentador.

Na tabela 3, é mostrada a composição química dos gases formados durante a fermentação. Nota-se que a quantidade de CO_2 é alta, correspondendo a 99,998 % dos gases formados.

Tabela 3: Especificação para reaproveitamento de dióxido de carbono (HAFFMANS, 1996 apud BOULTON; QUAIN, 2001)

Parâmetro	Especificação
Dióxido de carbono	>99,998% (v/v)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	<50 ppb
Dimetil sulfeto	<50 ppb
Oxigênio	<50 ppb (preferencialmente < 5ppb)
Ponto de orvalho (pressão atmosférica)	-60°C

2.6 Processos de Produção de CO_2

O processo de produção comercial de CO_2 é obtido das seguintes formas:

1. Gases de combustão (óleo combustível, gás combustível, coque) contendo de 10 a 18% de CO_2;
2. Indústrias de fermentação, sendo que o gás contém cerca de 99% de CO_2;
3. Co-produto das operações dos fornos de cal, contendo de 10 a 40% de CO_2.

Nos processos 1 e 3 deve-se concentrar o CO_2 até chegar em torno de 99%, por absorsão seletiva de etanolaminas. Os processos 1 e 3 são mais complexos e caros que o processo 2 (SHREVE; BRINK, 1997).

A quantidade de CO_2 que pode ser coletada gerada pela fermentação é em torno de 2,0 kg/hl. Já a quantidade de CO_2 requisitada na indústria cervejeira é em torno de 1,8 a 2,0 kg/hl. Praticamente todo CO_2 coletado pode ser usado novamente no processo (KUNZE, 1996). BRIGGS et al (2004) afirmam que a quantidade de CO_2 utilizada na indústria é de 1,3 a 2,0 kg por hectolitro de cerveja produzida.

A figura 8 mostra o desenho de equipamentos de reaproveitamento de CO_2 numa cervejaria. O gás é armazenado em um balão, passa por um lavador de gás com água, sendo comprimido entre 18-22 bar. O CO_2 é resfriado para ser liquefeito e seco com secadores de alumina e estocado em forma liquida (BRIGGS et al, 2004).

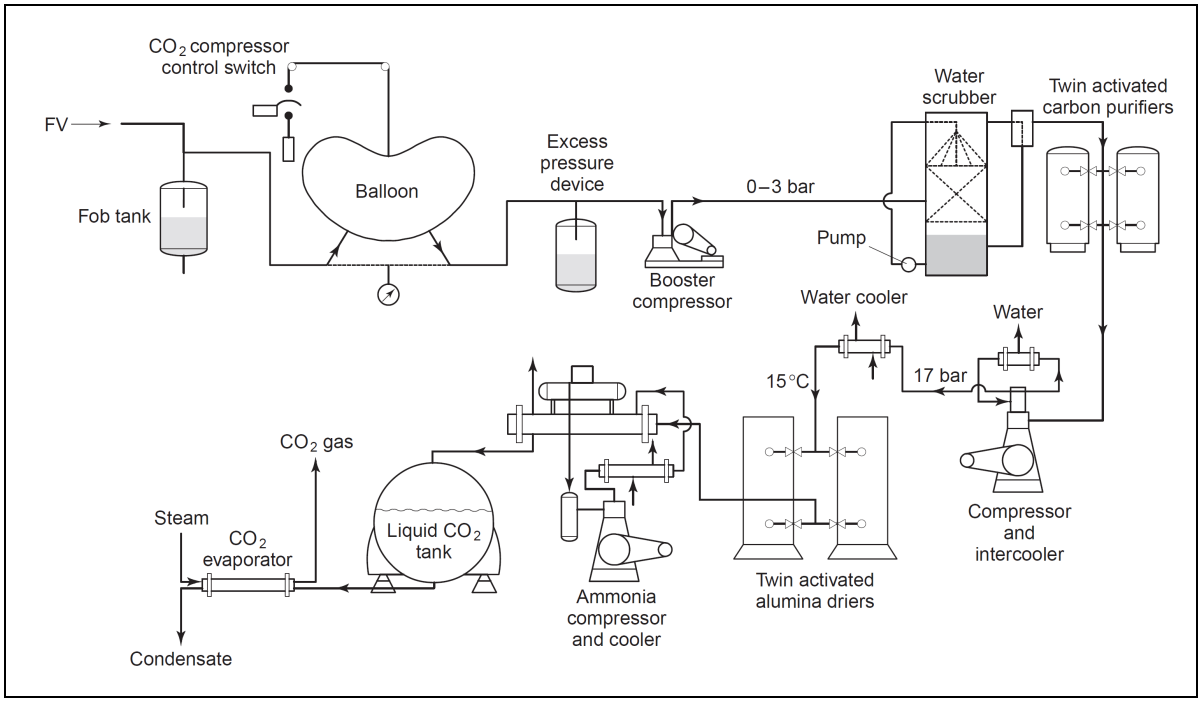


Figura 8: Equipamento para coleta, purificação, estoque e liberação de CO_2 (HOUGH et al, 1982 apud BRIGGS et AL, 2004)

A figura 9 mostra o desenho da planta de recuperação de CO_2 de uma forma mais simplificada e um pouco diferente que a figura 8.

Os filtros de carvão ativado são necessários para remoção de etanol e componentes voláteis como ésteres, dimetil sulfeto e sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico). Os filtros são construídos em pares, pois enquanto um é usado, o outro é regenerado. As colunas de secagem são usadas para retirar a umidade do gás, pois se houver umidade, esta irá congelar no tanque de estocagem de CO_2. A liquefação no tanque de estocagem é alcançada com a combinação de baixa temperatura e pressão, -24°C e 17 bar. A concentração de oxigênio deve estar abaixo de 0,2% (v/v), ou a liquefação não será possível (BOULTON; QUAIN, 2001).

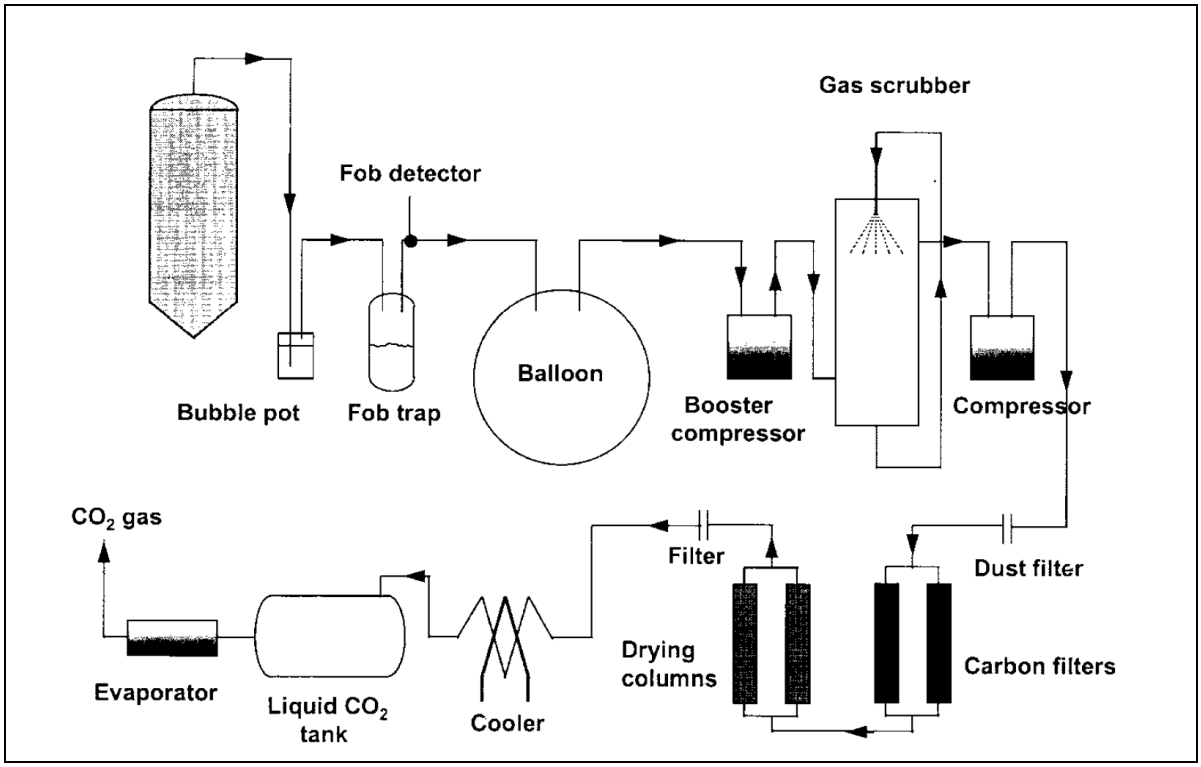


Figura 9: Reaproveitamento de CO_2, planta de liquefação e suprimento (BOULTON; QUAIN, 2001)

2.7 Compressores

Compressores são *máquinas de fluído* que promovem aumento do nível energético de um fluído a partir do fornecimento de energia mecânica, havendo alteração significativa da densidade, no caso de gases. A figura 9 mostra o campo de aplicação de diferentes tipos de compressores além dos ventiladores. Ventilador é uma máquina de fluído em que a alteração da densidade do gás é desprezada, considerando o fluído incompressível (HENN, 2001).

Os compressores podem ser divididos em dois grupos, segundo PERRY e GREEN (1997)

1. Compressor de fluxo contínuo
    a. Compressor centrífugo
    b. Compressor de fluxo axial
2. Compressor de deslocamento positivo
    a. Compressor rotativo
    b. Compressor alternativo.

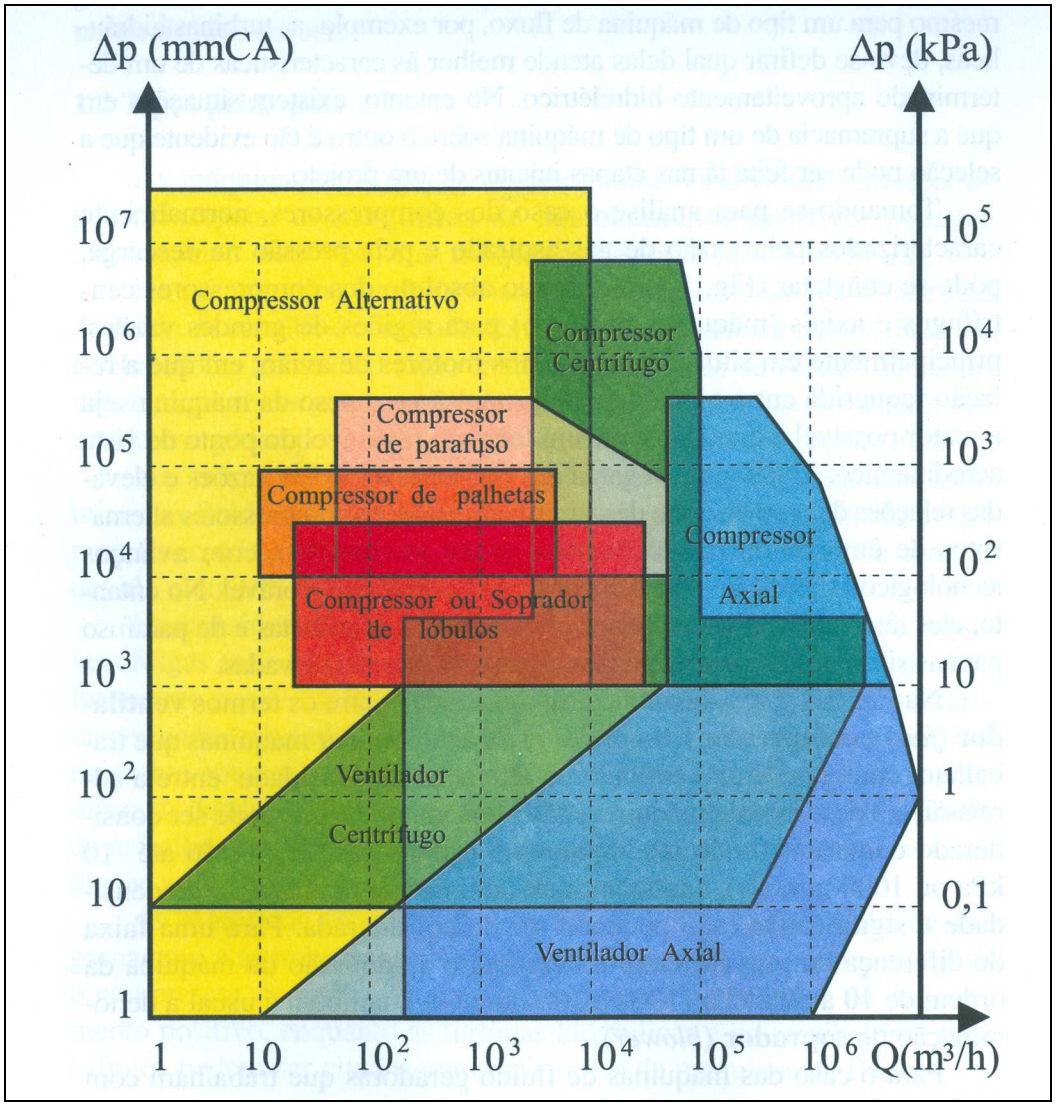


Figura 10: Campo de aplicação de compressores e ventiladores (HENN, 2001)

2.7.1 Compressores de Fluxo Contínuo

Compressores axiais são usados para aplicação em médias e grandes potências, enquanto os centrífugos são para potências menores. Compressores centrífugos são compostos por rotor (parte móvel) e por difusor (parte estacionária). O compressor pode ter um ou mais estágios, e cada estágio terá um rotor e um difusor (GIAMPAOLO, 2010).

Compressores centrífugos são utilizados para grandes vazões de gás. Nos compressores centrífugos (ou radiais), o escoamento do gás ocorre de forma perpendicular

ao rotor. A vazão de trabalho é entre 2000 a 100000 m^3/h e a pressão de descarga pode atingir a 600 bar. Nos compressores axiais, o fluxo de gás ocorre na direção paralela ao eixo no rotor. A vazão de trabalho é entre 50000 a 1500000 m^3/h, e a pressão diferencial pode atingir em torno de 10 bar. As turbinas, ou turbocompressores, são exemplos de compressores de fluxo contínuo (HENN, 2001).

2.7.2 Compressores de Deslocamento Positivo

Compressores de deslocamento positivo são utilizados para pequenas e médias vazões (abaixo de 1000 m^3/h) e altas pressões (de 1 bar, ou menos, até valores superiores a 3000 bar). A compressão ocorre entre a carcaça da máquina e um elemento com movimento alternativo ou rotativo.

1. Compressores alternativos
    a. de êmbolo ou pistão – vazões até 10000 m^3/h e pressões que podem superar 3000 bar;
    b. de diafragma ou membrana – vazões até 10 m^3/h e pressões acima de 1000 bar;
2. Compressores rotativos
    a. de palhetas – vazões entre 20 a 5000 m^3/h e pressões até 9 bar;
    b. de parafuso – vazões de 50 a 50000 m^3/h e pressões até 40 bar;
    c. de lóbulos – vazões de 20 a 30000 m^3/h e pressões até 1 bar;
    d. de anel líquido – vazões de 20 a 10000 m^3/h e pressões de 3 bar

(HENN, 2001)

2.7.3 Compressores Não-Lubrificados

Compressor não lubrificado é designado para comprimir ar ou gás sem contaminação do fluxo pelo óleo lubrificante (GIAMPAOLO, 2010). A desvantagem destes compressores

não-lubrificados é que são de custo mais alto, a temperatura de descarga do gás comprimido e a razão de compressão devem ser mais baixa que um compressor similar lubrificado, necessitando de mais estágios de compressão (visto no capítulo 2.11) (HANLON, 2001).

2.8 Diagrama de Mollier (Pressão-Entalpia)

As propriedades termodinâmicas de um gás podem ser representadas por diagramas, como é o caso do diagrama de Mollier. Na figura 11, a região à esquerda da curva de líquido saturado (X=0), é a região conhecida como líquido sub-resfriado. Entre a região de líquido sub-resfriado (X=0) e vapor saturado (X=1), é a região conhecida de vapor-úmido, em que há mistura de vapor e líquido. Na região à direita do vapor saturado (X=1), é a região conhecida como vapor superaquecido.

Onde: T = temperatura

S = entropia

V = volume

(VENTURINI; PIRANI, 2005)

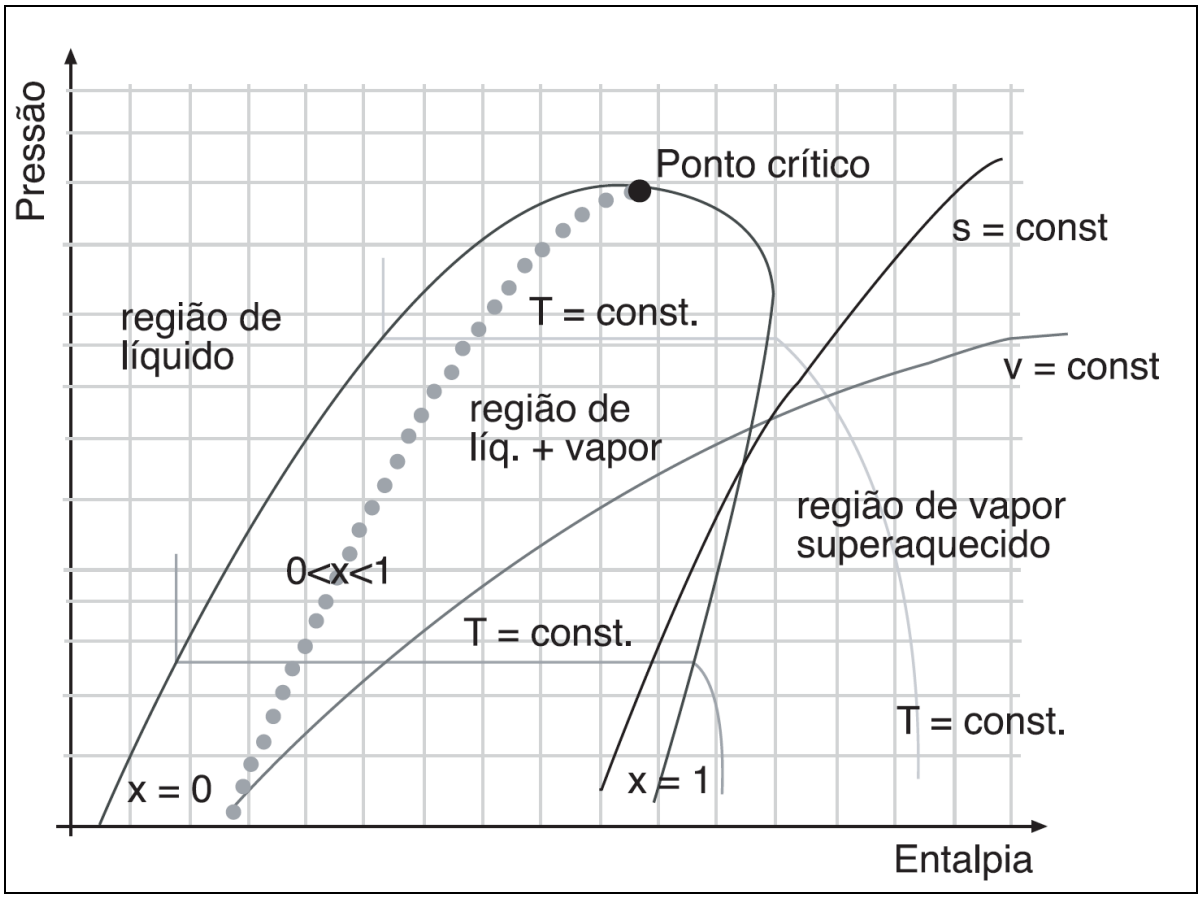


Figura 11: Esquema do de um diagrama P-h (Mollier) para uma substância pura (VENTURINI; PIRANI, 2005)

2.9 Diagrama Pressão-Entalpia do CO_2

Na figura 12, é mostrado o digrama de Mollier de pressão versus entalpia para o CO_2. A pressão é mostrada em MPa, sendo que 0,1 MPa corresponde a 1 Bar. Este diagrama será utilizado para os cálculos necessários para a compressão do CO_2, apresentado nos capítulos seguintes. Além dos dados de pressão e entalpia, o diagrama mostra a temperatura do gás e a entropia. Também, pode-se determinar a temperatura do gás após comprimi-lo, sabendo que ao comprimir um gás, este aumenta a temperatura e ao expandir, diminui.

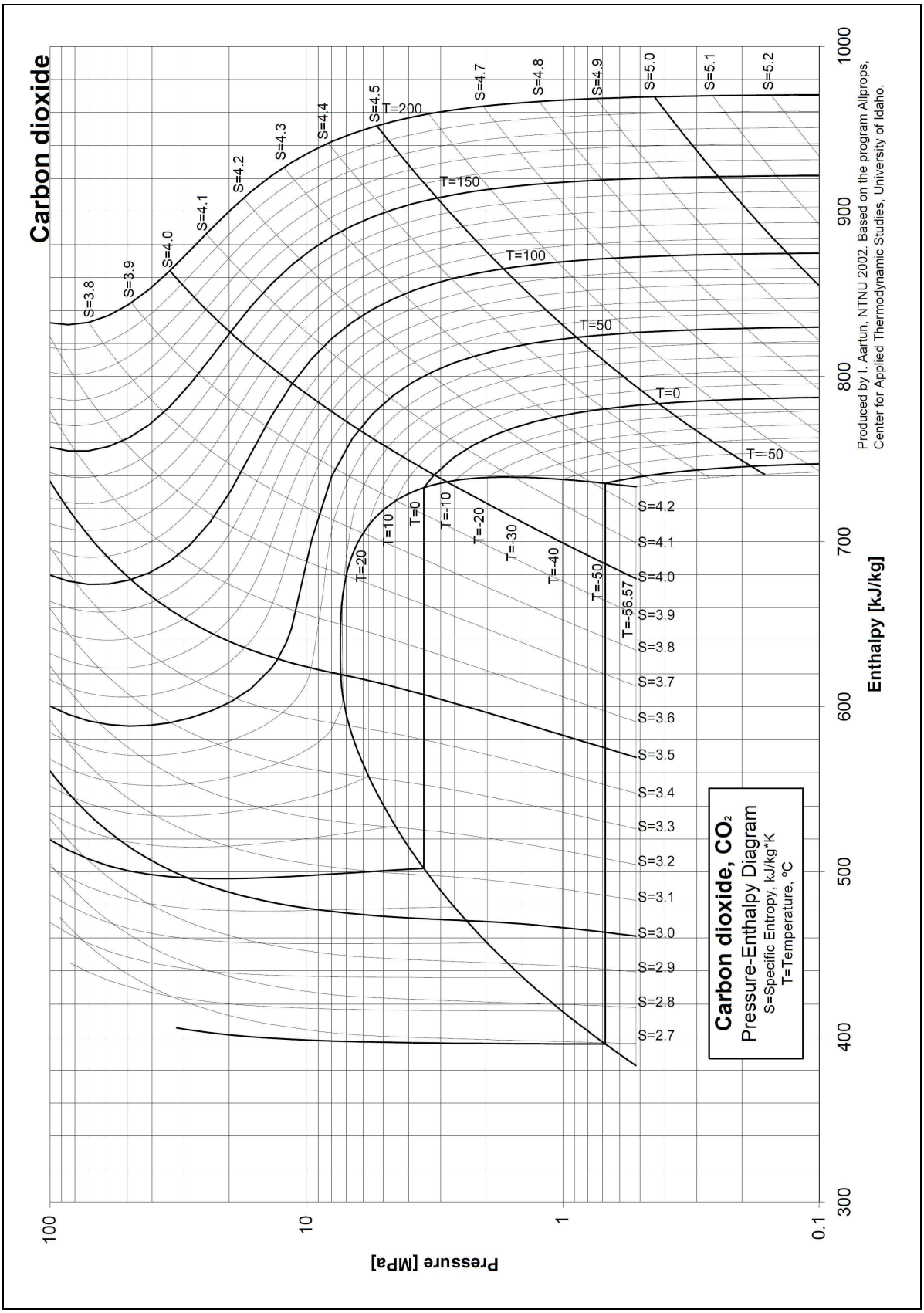


Figura 12: Diagrama pressão-entalpia do CO_2 (AARTUN, 2002)

2.10 Cálculo da Potência de Compressão

Para o cálculo da potência de compressão de um gás, utiliza-se o diagrama de Mollier. Admite-se que durante a compressão, o processo ocorre em regime adiabático, isto é, não há transferência de calor entre o gás e o meio externo durante a compressão. Também, considera-se um processo de compressão reversível, desprezando-se as perdas por atrito. Se um processo é adiabático e reversível, a compressão ocorre em estado isoentrópico, possibilitando o uso do diagrama de Mollier para os cálculos (STOECKER; JABARDO, 1998).

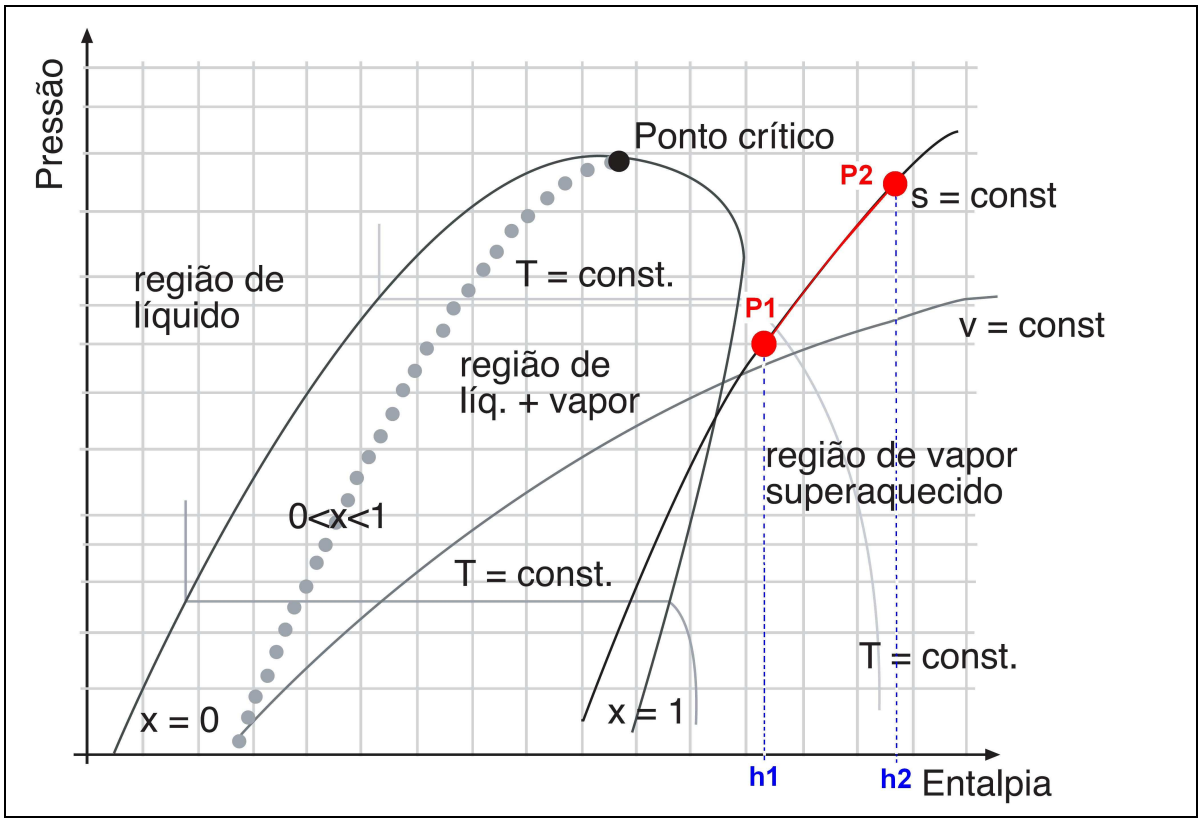


Figura 13: Diagrama de Mollier, compressão de um gás P1 até P2. Adaptado de VENTURINI e PIRANI (2005).

Como mostrado na figura 13, determina-se a entalpia (h1 e h2) correspondente às pressões P1 e P2. Para o cálculo da potência de compressão, usa-se a equação 2.

$$P = \dot{m}(h2 - h1) \qquad 2$$

onde:

P = potência em W

$\dot{m}$ = taxa mássica de gás em kg/s

h1 = entalpia do gás correspondente a pressão P1 em kJ/kg

h2 = entalpia do gás correspondente a pressão P2 em kJ/kg

(STOECKER; JABARDO, 1998)

2.11 Compressão em Múltiplos Estágios

Compressão em um único estágio é quando o gás é comprimido em um único elemento, ou em vários elementos em paralelo. Compressão em múltiplos estágios é quando dois ou mais elementos comprimem o gás em série, geralmente com resfriamento intermediários entre os estágios para redução de temperatura e do volume. Cada estágio é figurado como um compressor separado. A vantagem de se comprimir em mais estágios é para evitar altas temperaturas de descarga do compressor, como ocorre quando o gás é comprimido num único estágio, em alta razão de compressão, isto é, elevação muito alta da pressão. Há uma boa relação teórica, equação 3, para se determinar a pressão de entrada dos estágios posteriores, para uma mínima potência de compressão e bom resfriamento entre os estágios.

$$r_s = \sqrt[s]{r_t} \qquad 3$$

onde: r_s = razão de compressão por estágio;

s = número de estágios;

r_t = razão de compressão global ($P_{final}/P_{inicial}$);

(BLOCH, 2006)

2.12 Propriedades do CO_2, da Água e do O_2

As tabelas 4, 5 e 6 mostram algumas propriedades físicas do CO_2, da água e do O_2

Tabela 4: Propriedades físicas do CO_2

Propriedades do CO_2		Referência
Massa molar	44,010	SMITH et al, 2007
Temperatura crítica	304,2 K (31,05°C)	SMITH et al, 2007
Pressão crítica	73,83 bar	SMITH et al, 2007
Volume crítico	94 cm^3/mol (2,1359 cm^3/g)	SMITH et al, 2007
Densidade no ponto Crítico = 1/Volume crítico	0,468 g/cm^3	SMITH et al, 2007
Densidade a 300K a 1 ATM	1,7730 kg/m^3	INCROPERA; DEWITT, 2003

Tabela 5: Propriedade física da água

Propriedade		Referência
Densidade (em 305K ou 31,85°C)	0,995 g/cm^3	INCROPERA; DEWITT, 2003

Tabela 6: Propriedades físicas do O_2

Propriedades do O_2		Referência
Massa molar	31,999	SMITH et al, 2007
Temperatura crítica	154,6 K (-118.55°C)	SMITH et al, 2007
Pressão crítica	50,43 bar	SMITH et al, 2007

3 COMPRESSÃO DO DIÓXIDO DE CARBONO.

O compressor de dióxido de carbono não pode contaminar o gás com nenhum lubrificante, portanto a câmara de compressão deve estar isenta de óleo. Os compressores de

diafragma vendidos no mercado oferecem esta opção de compressão sem contaminação por óleo.

Compressores de diafragma são máquinas de deslocamento positivo em que o elemento de compressão é um diafragma de metal, ou um grupo de diafragmas. A compressão ocorre indiretamente por um pistão, que por meio de fluído hidráulico pressiona o diafragma, comprimindo o gás. Não há lubrificação na câmara de compressão. O processo é mostrado nas figuras 14 e 15 (BLOCH, 2006). Na figura 16, é apresentado um compressor de diafragma.

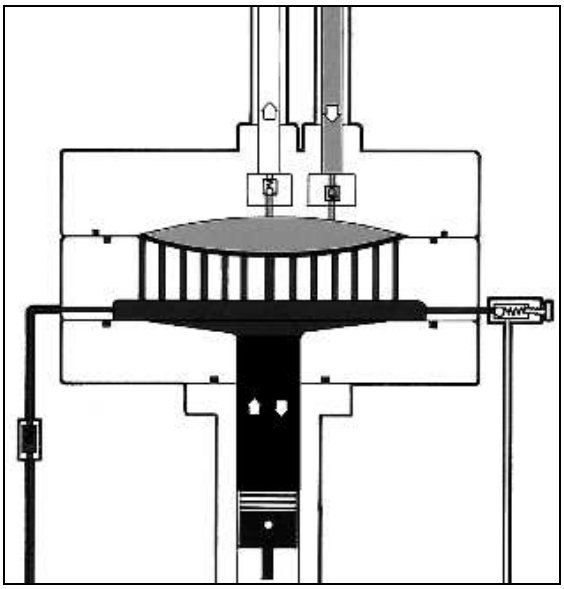


Figura 14: Esquema de um compressor diafragma após admitir o gás para a compressão, retirado de BLOCH (2006)

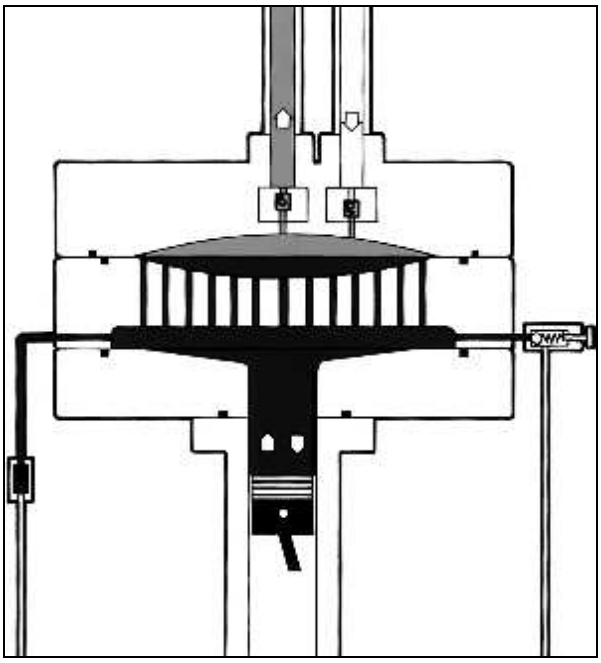


Figura 15: Compressor diafragma comprimindo o gás, retirado de BLOCH (2006)

Figura 16: Compressor diafragma de dois estágios da empresa Sera, modelo MV5. A razão de compressão de 1:10 por estágio, podendo comprimir até 200 bar, e pressão de sucção igual ou maior a 1 bar.

3.1 Cálculo da potência conforme os estágios de compressão.

Os estágios de compressão são para evitar superaquecimento do gás de compressão, causando problemas no compressor, conforme comentado no capítulo 2.11. Tendo dados como, tipo de gás, quantidade (volume de sucção), temperatura e pressão de entrada, pressão a ser comprimido (pressão de saída), o fabricante de compressores irá sugerir qual a dimensão e quantos estágios de compressão deverá ter o compressor. A figura 17 mostra um catálogo de modelos de compressor, com relação à pressão de compressão e à vazão de gás.

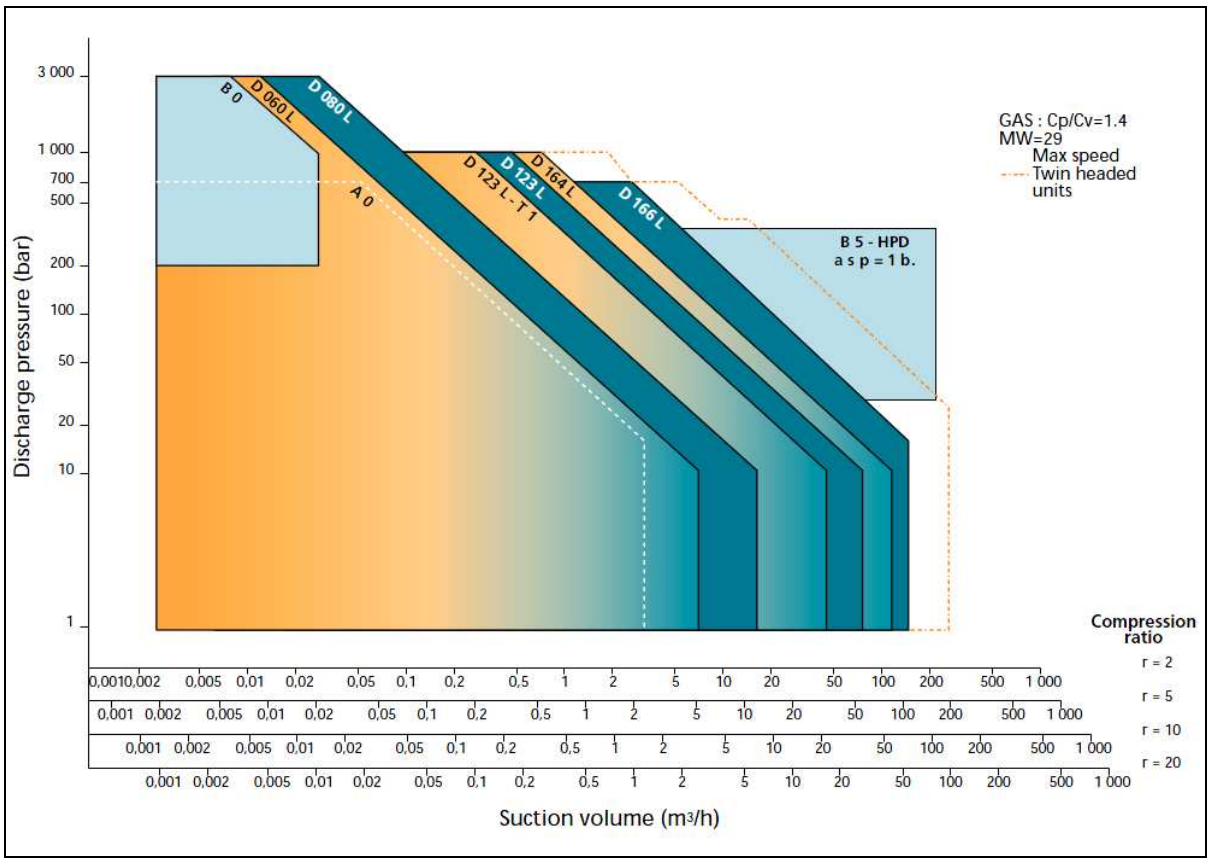


Figura 17: Modelos de compressor diafragma da empresa Burton Corblin.

3.2 Definição da quantidade de CO_2 a ser comprimida e da pressão final

Conforme os dados apresentados no capítulo 2.6, de que a quantidade de CO_2 aproveitável por hectolitro é de 2,0 kg, os cálculos da potência de compressor serão feitos simulando uma microcervejaria que produz em torno de 100 hectolitros (10000 litros) ao mês. Com isso, pode-se comprimir até 200 kg de CO_2 ao mês, isto é, 112,8 m^3 de CO_2. Com um fermentador de 5000 litros, pode-se gerar 100 kg (56,4m^3) de CO_2 entre 4 a 7 dias, exigindo do compressor uma vazão média de 0,33 até 0,59 m^3/h. Portanto os cálculos para a compressão irão usar o dado de 0,59 m^3/h que corresponde a uma taxa mássica média de 1,046 kg/h (0,0002905 kg/s).

A pressão de compressão definida será logo abaixo do valor da pressão crítica do CO_2, isto é 73,83 bar. Então, nos cálculos, o CO_2 será comprimido até 70 bar, pois nessa pressão o CO_2, poderá ser armazenado líquido em temperatura ambiente.

3.2.1 Compressão em um estágio.

Conforme mostrado na figura 18, ao extrapolar graficamente a curva de compressão isoentrópica, desde 1 bar (0,1 MPa) ate 70 bar (7 MPa), a temperatura de descarga do gás seria muito alta, não podendo ser definida graficamente. Olhando para o gráfico, percebe-se que a temperatura de descarga seria bem acima de 200° C, podendo ocasionar problemas ao compressor, assim como o consumo de energia ser muito grande.

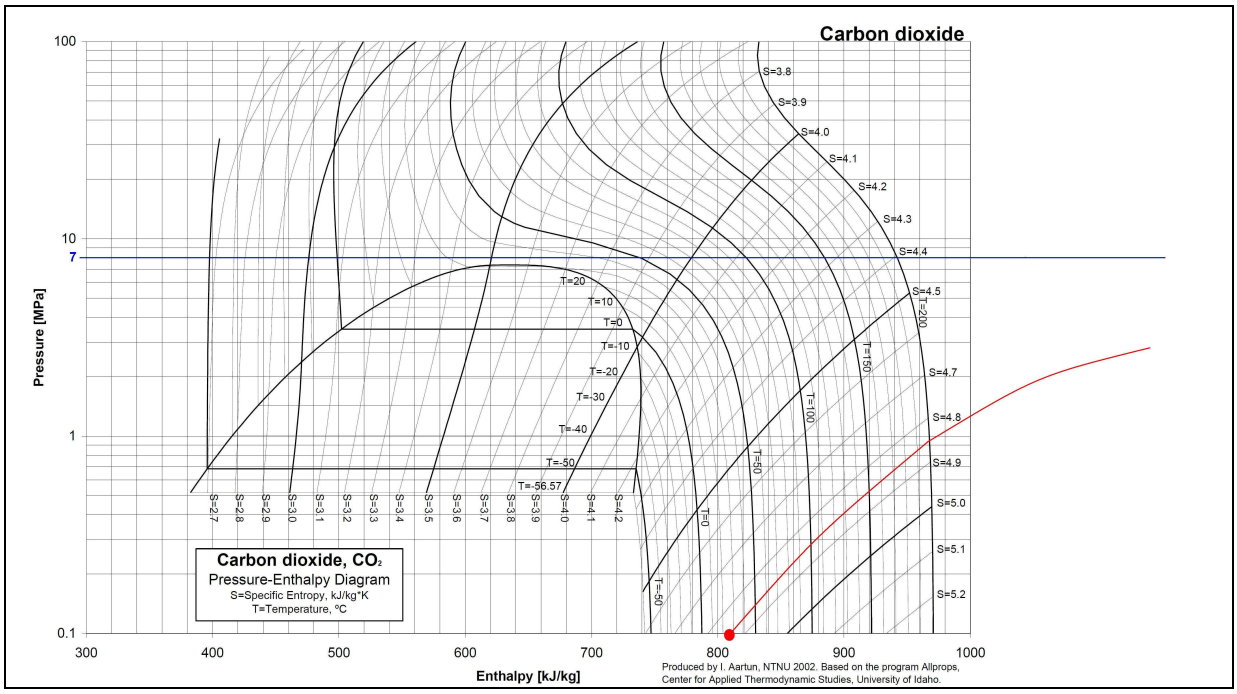


Figura 18: Diagrama de Mollier, adaptado de AARTUN (2002).

3.2.2 Compressão em dois estágios.

Conforme a equação 3, define-se a razão de compressão entre os estágios.

$$\boxed{r_s = \sqrt[s]{r_t} \qquad 3}$$

$$r_t = {P_{final}}/{P_{inicial}} = {70}/{1} = 70$$

$$s = 2$$

$$r_s = 8{,}36$$

Com este valor, cada estágio amplia em 8,36 vezes a pressão de entrada.

Do gráfico (figura 19), obtêm-se os valores das entalpias: h1 = 808 kJ/kg, h2 = 958 kJ/kg, h3 = 760 kJ/kg e h4 = 880 kJ/kg. Da fórmula 2 calcula-se a potência de compressão em cada estágio, com a taxa mássica definida no capítulo 3.2.1, que é 0,0002905 kg/s. No estágio 1, a temperatura do gás é de 25°C. Entre os estágios 1 e 2, a temperatura do gás é de -20°C, pois se considera que há resfriamento forçado entre os estágios. Este resfriamento forçado é necessário para que a temperatura de descarga do gás no segundo estágio não seja

muito alta. Se a temperatura do gás estiver em 20° C entre o primeiro e segundo estágios, a temperatura de descarga no segundo estágio seria em torno de 200° C

$$P = \dot{m}(h2 - h1) \qquad 2$$

Cálculo da potência de compressão no estágio 1:

$$P = \dot{m}(h2 - h1) = 0{,}0002905 \times (958 - 808) = 43{,}575\, J/s \quad [=]\, W$$

Cálculo da potência de compressão no estágio 2:

$$P = \dot{m}(h4 - h3) = 0{,}0002905 \times (880 - 760) = 34{,}86\, J/s \quad [=]\, W$$

Potência total de compressão = 78,435 W

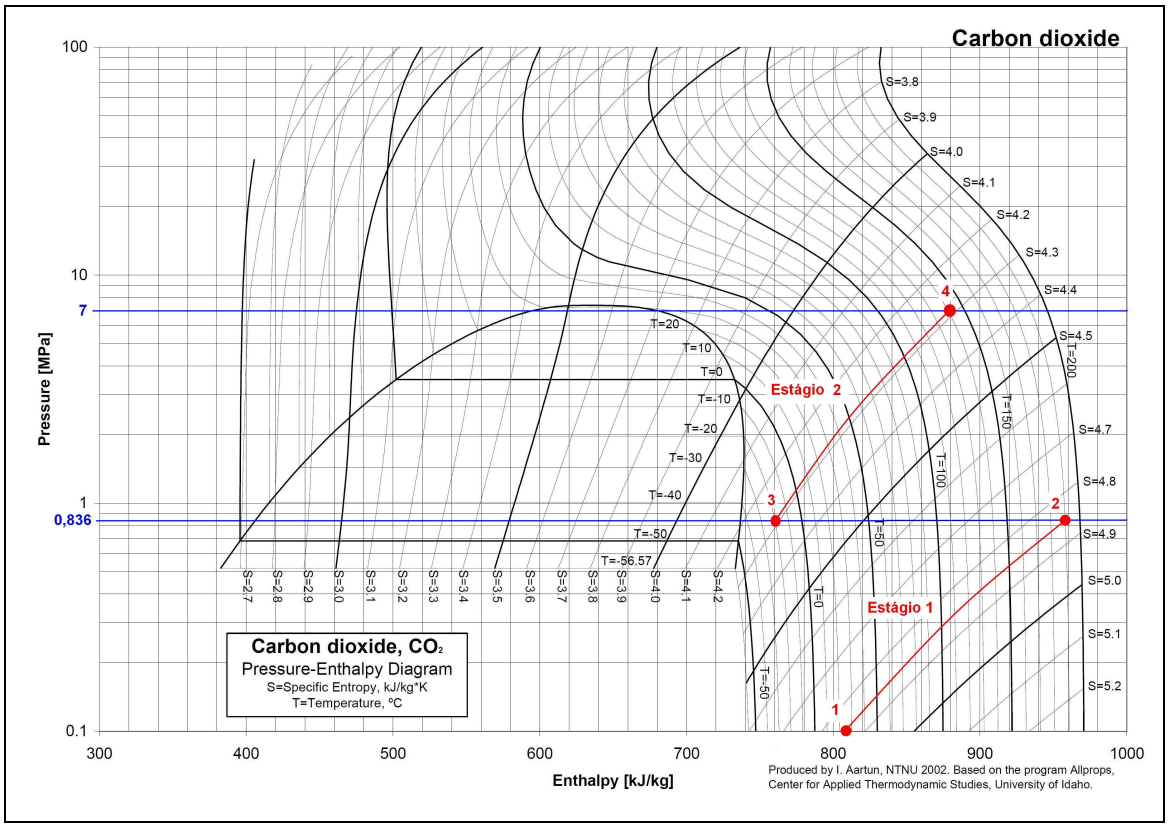


Figura 19: Compressão de CO_2 em dois estágios adaptado de AARTUN (2002)

3.2.3 Compressão em três estágios.

Conforme a fórmula 3, a razão de compressão entre os estágios é de 4,12. Os valores das entalpias obtidas pelo gráfico (figura 20) são: h1 = 808 kJ/kg, h2 = 912 kJ/kg, h3 = 808 kJ/kg, h4 = 878 kJ/kg, h5 = 792 kJ/kg e h6 = 885 kJ/kg. Não há resfriamento forçado, portanto a temperatura do gás é em torno de 25 a 30° C entre os estágios.

Cálculo da potência de compressão no estágio 1:

$$P = \dot{m}(h2 - h1) = 0{,}0002905 \times (912 - 808) = 30.212\, J/s \quad [=]\, W$$

Cálculo da potência de compressão no estágio 2:

$$P = \dot{m}(h4 - h3) = 0{,}0002905 \times (878 - 808) = 20.34\, J/s \quad [=]\, W$$

Cálculo da potência de compressão no estágio 3:

$$P = \dot{m}(h6 - h5) = 0{,}0002905 \times (885 - 792) = 27{,}02\, J/s \quad [=]\, W$$

Potência total de compressão = 77,57 W

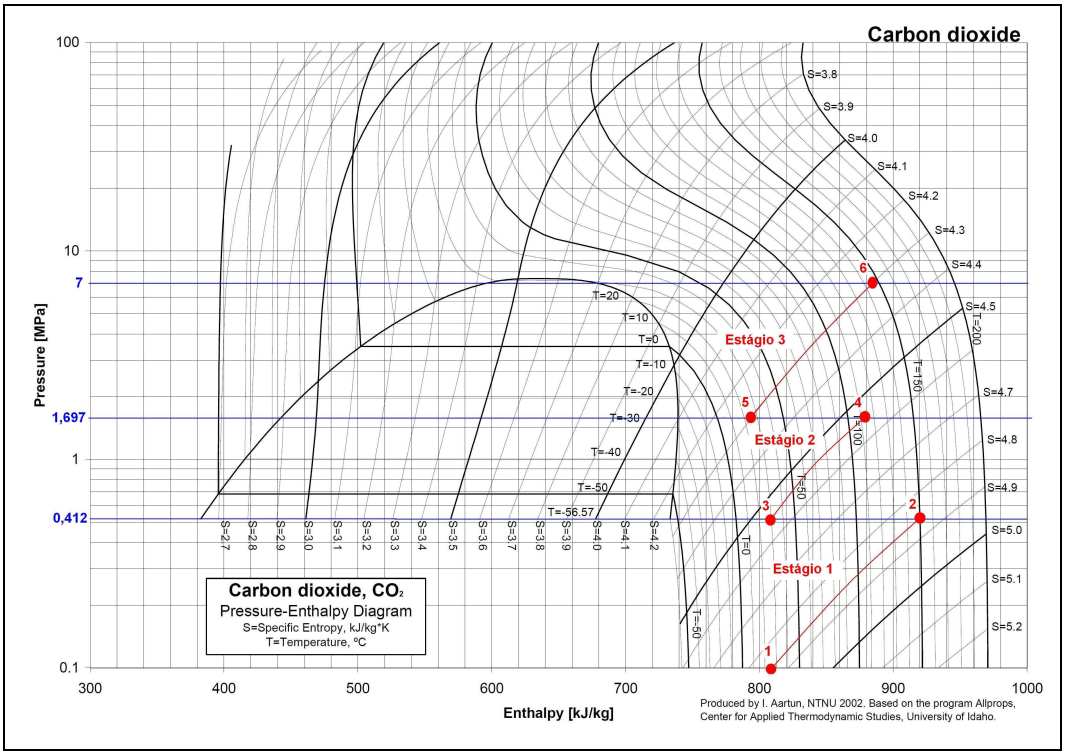


Figura 20: Compressão de CO_2 em três estágios adaptado de AARTUN (2002)

4 PLANTA DE REAPROVEITAMENTO DE CO_2

A planta de reaproveitamento proposta para as microcervejarias, como mostrado na figura 21, é mais simples que as plantas encontradas na bibliografia (capítulo 2.6). A separação da umidade ocorre no tanque de armazenagem, por diferença de densidade. Como a densidade da água é maior que a do CO_2 líquido, ela irá armazenar-se no fundo do tanque de CO_2. Assim, pode-se retirar a água purgando-a do fundo do tanque. Além disso, a água é uma substância polar, enquanto o CO_2 é apolar, sendo uma mistura de duas fases de fácil separação. Não somente água, como outras substâncias solúveis estarão misturadas, assim como o próprio CO_2, formando ácido carbônico. Com a formação de ácido carbônico, é previsto que a solução aquosa seja ácida, podendo reduzir a vida útil do tanque de armazenagem, promovendo a corrosão das paredes. Portanto, a superfície interna do tanque, deverá ser revestida com material resistente à corrosão.

Em lugares em que a temperatura alcance valores superiores a temperatura crítica do CO_2 (31,05°C), o CO_2 armazenado não estaria no estado líquido, e sim no estado supercrítico. Portanto a temperatura do tanque deverá ser reduzida a valores abaixo de 31,05° C. Uma alternativa proposta é a utilização de tanques de armazenagem de CO_2 com isolamento térmico e válvula de alívio de pressão, liberando pressão quando esta estiver acima da pressão crítica do CO_2 (73,83 bar). A liberação de pressão irá expandir o gás, causando a redução de temperatura dentro do tanque. Assim, a temperatura do CO_2 ficará abaixo da temperatura crítica, permanecendo em estado líquido. Conforme visto na tabela 4, a temperatura crítica do O_2 é muito baixa (-118,55° C), não podendo ser liquefeito no tanque. Mesmo assim, a quantidade de O_2 presente nos gases de fermentação é não detectável conforme visto no capítulo 2.4.2.

Se o objetivo do armazenamento de CO_2 for o enchimento de cilindros com líquido, na saída do tanque deverá haver uma bomba de diafragma, com funcionamento similar aos compressores de diafragma, porém com diferenças de pressão menores.

O balão, como visto na figura 21, funciona como um “tanque pulmão”, pois a taxa de formação de CO_2 durante a fermentação é variável, e a taxa mássica de compressão é constante. O balão é feito de material flexível, como lonas, podendo variar seu volume para o armazenamento de gás. O separador de espuma é um recipiente em que o gás proveniente do fermentador é borbulhado em água, evitando que a espuma da fermentação entre na linha.

Controles automáticos, com sensores de vazão, deverão acionar e desligar o compressor diafragma. Dentro do tanque, deve haver uma bóia para controle do nível de CO_2 do tanque. Se o nível estiver acima do especificado, o compressor não é acionado, e o excesso de CO_2, deverá escapar pelo balão. O processo é explicado de forma simplificada em fluxograma da figura 21.

.

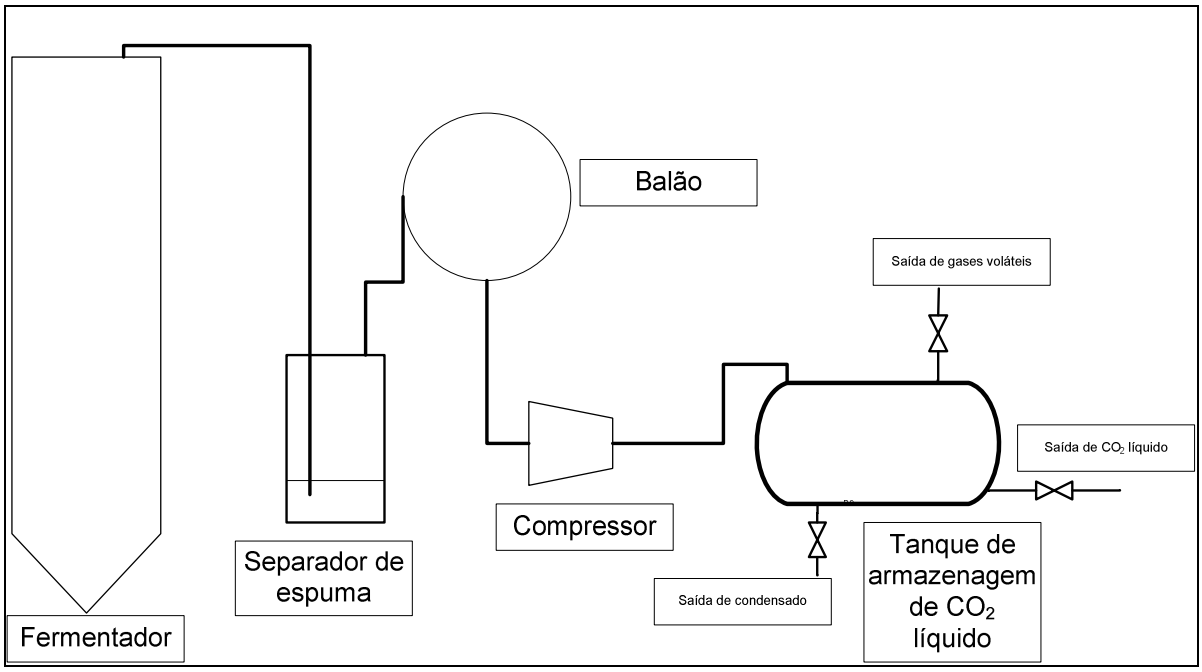


Figura 21: Planta de recuperação de CO_2 proposta para microcervejarias

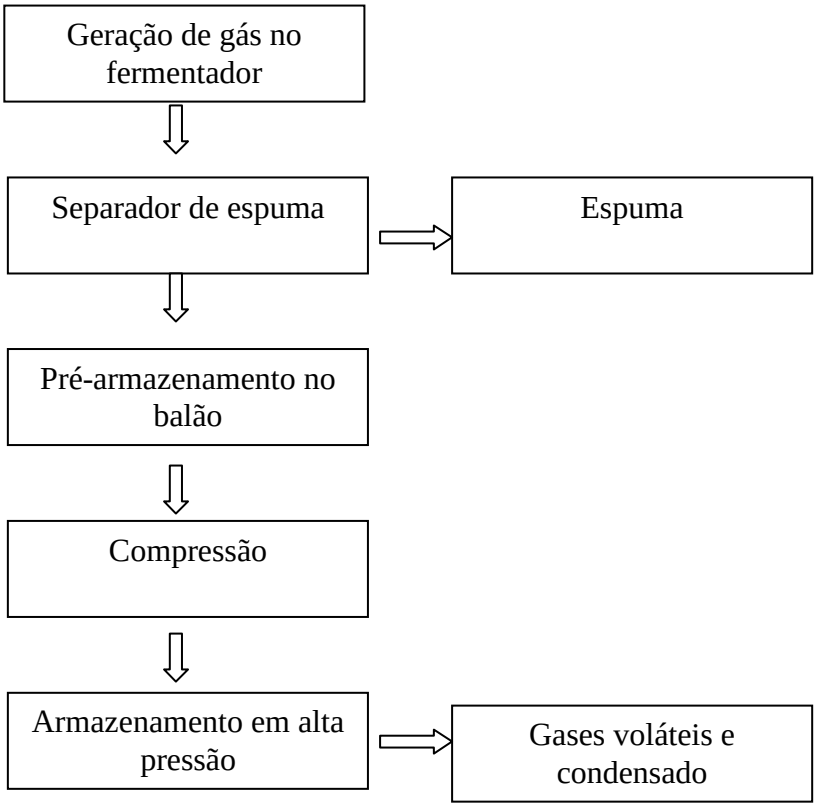


Figura 22: Fluxograma do processo de recuperação de CO_2

5 CONCLUSÃO

A recuperação de CO_2 em microcervejarias é perfeitamente plausível, porém dever-se-á realizar um estudo para definir qual a quantidade mínima de cerveja que uma microcervejaria deverá produzir, para que o investimento tenha retorno. Conforme calculado no capítulo 3, a potência de compressão para a produção de 10000 litros ao mês, em tanque de 5000 litros, é muito baixa, não chegando a 80 Watts, podendo ser usado compressor de baixa capacidade, com preço mais acessível. Logicamente, a potência do motor do compressor será maior que os 80 Watts. A reutilização do CO_2 para microcervejarias ajuda a reduzir as emissões na atmosfera. Há necessidade de testes na planta de recuperação de CO_2 proposto na figura 21, para melhorias no processo.

6 BIBLIOGRAFIA

AARTUN I. **Diagrama de pressão e entalpia do CO_2**. 2002. Disponível em: <http://www.nt.ntnu.no/users/haugwarb/Phase_diagrams_and_thermodynamic_tables/Phase Diagrams/CO2.pdf>, acesso em 28 de novembro de 2010.

ÁRIAS, G. **Mejoramiento genético y producción de cebada cervecera en América del Sur**. Santiago: FAO, 1995. 157p.

BAMFORTH. C. **Beer: Tap into the Art and Science of Brewing, Second Edition**, New York: Oxford University Press, 2003.

BEERBLOTER. [sem título]. Disponível em: <http://beerblotter.files.wordpress.com/2010/07/hop-leaf.jpg>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010.

BLOCH, H. P. **A pratical guide to compressor technology,** New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

BOULTON, C. QUAIN, D. **Brewing Yeast and Fermentation**, Oxford: Blackwell Science. 2001.

BRIGGS, D.E. et al. **Brewing Science and Practice**, Boca Raton: CRC Press LLC, 2004.

CASSÁ, R. **Raíces y desarrollo de un orgullo dominicano. Historia de la cerveza en la República Dominicana** , Santo Domingo : Grupo León Jimenes, 2003.

COMPONENTS of hops. Disponível em < http://www.hopunion.com/education/componentsofhops.html>. Acessado em: 28 de novembro de 2010.

EβLINGER, H. M. **Handbook of Brewing**, Weinheim: WILEY-VCH, 2009.

GIAMPAOLO, T. **Compressor HandBook: Principles and Pratice,** Lilburn: The Fairmont Press, 2010.

GOMES. P. **Paras as cervejarias parece que é verão**, Lages: Diário Catarinense, julho de 2010. Disponível em: <http://www.clicrbs.com.br/diariocatarinense/jsp/default2.jsp?uf=2&local=18&source=a2935004.xml&template=3898.dwt&edition=14880&section=129>. Acesso em 22 de setembro de 2010.

HAFFMANS, B. Carbon dioxide recovery in breweries. Brauwelt, 1996.

HANLON P.C. **Compressor Handbook**, United States of America: McGraw-Hill, 2001

HENN, E. A. L., **Máquinas de Fluído**, Santa Maria: Ed. UFSM, 2001

HORNSEY, I. S. **Brewing**, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1999.

HORNSEY, I. S. **A History of Beer and Brewing**, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2003.

HOP POWDER pellets. Disponível em <http://www.hopunion.com/hoppowderpellets.html>. Acessado em: 28 de novembro de 2010.

GERSTE. Disponível em: <http://www2.mpiz-koeln.mpg.de/pr/garten/schau/HordeumvulgareL./Gerste.html>. Acesso em 28 de novembro de 2010

HOUGH, J. S.; BRIGGS, D. E.; STEVENS, R.; YOUNG, T. W. **Malting and Brewing Science,** Volume 2, 2nd Edition, Aspen, Gaithersburg, Maryland, 1982.

HOUGH, J. S. **Biotecnología de la Cerveza y de la Malta,** Zaragoza: Editorial Acríbia S.A., 1990

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P; **Fundamentos de Calor e de Massa, 5ª ed.,** Rio de Janeiro: LTC, 2003.

KÖB , E. **Wie das Bier brasilianisch wurde , in Jahrbuch der Gesellschaft für die Geschichte und Bibliographie des Brauwesens 1998**, Berlin: Institut für Gärungsgewerbe, 1999.

MELO, J. **A Cerveja**, 1ª edição, São Paulo: Publifolha, 2000

DE MELO, P.M.; **Carnaval de Impostos**, Coluna de Monitor Mercantil Digital. Disponível em <http://www.monitormercantil.com.br/mostranoticia.php?id=58045>. Acesso em 22 de setembro de 2010.

MINELLA, E. et al. **Cevada BR2: Culticar de Cevada Cervejeira resistente à Mancha-Reticular Causada por *Pyrenophora Teres***. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.34, n.11, p.2163-2168, nov. 1999

EL MUNDO en un vaso: la cerveza. **The History Channel**, Diretor: Richard Weller, Produtor: Ângela Buchanan, Programa de televisão: documentário, Produzido por SMG TV Productions para The History Channel., 2005. Disponível em rede (internet) via rede eD2K

THOMÉ, D. **Pequenas Cervejarias se Profissionalizam**. O Estado de São Paulo. Disponível em <http://www.estadao.com.br/noticias/economia,pequenas-cervejarias-se-profissionalizam,498047,0.htm>. Acesso em 22 de setembro de 2010.

KUNZE, W. **Technology Brewing and Malting: International Edition**, Berlin: VLB, 1996.

LEWIS, M. J.; BAMFORTH, C W. **Essays in Brewing Science,** New York: Springer, 2006.

OURA, E., HAARASILTA, S.; LONDESBOROUGH, J. **Carbon Dioxide Fixation by Baker's Yeast Under a Variety of Growth Conditions**, Journal of General Microbiology, 118, 51-8, 1980.

PERRY R. H.; GREEN D. W. **Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed.**, United Estates of America: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1997

PRIEST, F.G.; STEWART, G. G. **Handbook of Brewing: Second Edition**, Boca Raton, CRC Press, 2006

SHREVE, R. N.; BRINK, J. A. Jr. **Indústrias de Processos Químicos, quarta edição,** Rio de janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 1997

SINDICERV. Disponível em: <http://www.sindicerv.com.br/mercado.php>. Acesso em: 21 de setembro de 2010.

SMITH, J.M. et al. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química 7ª Ed.,** Rio de Janeiro: LTC, 2007.

STOECKER, W.F.; JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**, São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1998.

TRÖEGS Brewing Company. Disponível em: <http://www.kysela.com/beers/troegs.htm>. Acesso em: 28 de novembro de 2010.

VENTURINI FILHO, W. G. **Tecnologia Cervejeira,** Botucatu: Funep, 2000

VENTURINI, O. J.; PIRANI, M. J. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial: manual prático**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.