



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica



APLICAÇÕES DOS CRIOGÉNICOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS DO SETOR ALIMENTAR

38755 – JOÃO PEDRO ANASTÁCIO FRANÇA

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre

em Engenharia Mecânica

Orientador:

Engº Especialista Francisco Manuel Gonçalves dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Prof. Doutor. João Nuno Pinto Miranda Garcia

Engº Especialista Francisco Manuel Gonçalves dos Santos

Outubro de 2017



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

APLICAÇÕES DOS CRIOGÉNICOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS DO SETOR ALIMENTAR

38755 – JOÃO PEDRO ANASTÁCIO FRANÇA

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

**Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica**

Orientador:

Eng.º. Especialista Francisco Manuel Gonçalves dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado

Vogais:

Prof. Doutor João Nuno Pinto Miranda Garcia

Eng.º. Especialista Francisco Manuel Gonçalves dos Santos

Outubro de 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar expresso os meus sinceros agradecimentos ao orientador, o Prof. Francisco Manuel Gonçalves dos Santos, pela dedicação prestada na fase de escolha do tema do presente trabalho, e a forma como me motivou e orientou durante todo o desenvolvimento deste, bem como pela disponibilidade demonstrada para o esclarecimento de dúvidas e recomendações.

Deixo um agradecimento a Todos os colegas da empresa Praxair, que forneceram imensa documentação e informação sobre este tema, e demonstraram uma disponibilidade enorme para esclarecimento de eventuais dúvidas e por terem acompanhado em visitas a empresas que utilizam algumas das aplicações apresentadas.

O momento em que me encontro agora é devido aos meus pais, e este trabalho pretendo que seja visto como um reflexo do amor e suporte que sempre me foram dando ao longo de toda a minha vida. E no fim deste ciclo académico, não posso deixar de agradecer pelos sacrifícios que tiveram de fazer de forma a garantirem que todas as minhas necessidades fossem satisfeitas, ao mesmo tempo que me inspiraram a trabalhar dignamente para que conseguisse atingir os meus sonhos e objetivos.

Aos meus colegas do ISEL e amigos, que ao longo destes anos me acompanharam e motivaram em momentos de estudo e de trabalho sempre com boa disposição.

Por fim, e não menos importante agradeço aos meus avós e restante família por todo o carinho, inspiração e encorajamento que me proporcionaram para chegar a esta fase decisiva do meu percurso académico.

Resumo

Atualmente, a conservação por frio de um produto transformou-se num simples elo na cadeia de processos industriais que constituem a elaboração e comercialização dos alimentos. Como tal, deve estar orientado para maximizar a qualidade do produto final, otimizar a produtividade e incidir da menor forma possível no aumento dos custos.

Como resposta ao anterior, os fluídos criogénicos permitiram-nos contar com uma alternativa ao tradicional método de refrigeração por meio de um fluído refrigerante num ciclo de expansão-compressão, o que normalmente designamos por frio mecânico. Assim, o frio criogénico tem a sua fronteira térmica nos processos que operam a temperaturas inferiores a -45 °C, conhecido como o limite térmico tecnicamente comum dos equipamentos de arrefecimento mecânico. A obtenção de temperaturas de trabalho inferiores é possível pelo aproveitamento da elevada potência térmica dos fluídos criogénicos, como o azoto e o dióxido de carbono líquidos, cujas temperaturas de ebulição à pressão atmosférica correspondem a -195,6 °C e -78,9 °C, respetivamente.

Este trabalho incide sobretudo na apresentação das soluções criogénicas alternativas ao frio mecânico aplicadas nos processos de conservação dos produtos alimentares. Demonstrando as vantagens na sua utilização, principalmente da importância na formação de cristais de gelo durante o processo de congelação criogénica. Faz-se também uma descrição dos equipamentos utilizados neste tipo de processo criogénico, ou as adaptações necessárias para esse efeito, descrevendo o seu modo de funcionamento e os cuidados a ter para um aproveitamento ideal.

Por fim exemplifica-se um caso de estudo criogénico aplicado à ultracongelação de framboesas e morangos, onde se adota uma solução crio-mecânica mediante dois possíveis cenários. Este estudo pretende demonstrar a capacidade frigorífica necessária e o consumo de azoto, para cada um dos cenários, aproveitando ainda para quantificar economicamente as consequências do fenómeno de desidratação dos produtos alimentares com alto teor de água. Permitindo tirar algumas conclusões interessantes sobre o impacto económico no produto devido ao custo e consumo do azoto como agente criogénico.

Palavras Chave: Refrigeração, Congelação, Conservação de produtos alimentares, Métodos de Congelação Criogénica, Líquidos Criogénicos, Equipamentos Criogénicos, Ciclo de Linde-Hampson.

Abstract

Currently, the cold storage of a product has become a simple link in the chain of industrial processes that constitute the elaboration and commercialization of foods. As such, it should be geared to maximize the quality of the final product, optimize productivity and focus as little as possible on increasing costs.

In response to the above, the cryogenic fluids have enabled us to rely on an alternative to the traditional refrigeration method by means of a refrigerant in an expansion-compression cycle, which is usually referred to as mechanical cold. Thus, cryogenic cold has its thermal boundary in processes operating at temperatures below $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, known as the technically common thermal limit of mechanical cooling equipment. Lower working temperatures are achieved by exploiting the high thermal power of cryogenic fluids, such as liquid nitrogen and carbon dioxide, whose boiling temperatures at atmospheric pressure correspond to $-195,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-78,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively.

This work focuses mainly on the presentation of alternative cryogenic solutions to mechanical cold applied in food preservation processes. Demonstrating the advantages in its use, especially in the importance of the formation of ice crystals during the cryogenic freezing process. A description is also given of the equipment used in this type of cryogenic process, or the adaptations necessary for this purpose, describing its operation and the care to be taken for optimal use.

Finally, a case of cryogenic study applied to deep-freezing of raspberries and strawberries is presented, where a cryo-mechanical solution is adopted through two possible scenarios. This study aims to demonstrate the necessary refrigeration capacity and nitrogen consumption for each of the scenarios, taking advantage of the economical quantification of the consequences of the dehydration phenomenon of food products with high water content. Allowing to draw some interesting conclusions about the economic impact on the product due to the cost and consumption of nitrogen as a cryogenic agent.

Keywords: Refrigeration, Freezing, Food Preservation, Cryogenic Freezing Methods, Cryogenic Liquids, Cryogenic Equipment, Linde-Hampson Cycle

Lista de Símbolos

C1 – Calor Específico antes da congelação (kJ /kg)

C2 – Calor Específico após congelação – (kJ /kg)

CE – Consumo específico de azoto (kg N₂ / kg produto)

COP – Coeficiente de Performance

H - Coeficiente da transferência térmica na superfície (W / m² °C).

h – Entalpia (kJ/kg)

k - Condutividade térmica do produto congelado (W / m °C).

L – Calor latente de congelação (kJ/ kg)

m – Taxa de congelação (kg / h)

\dot{m} – Caudal mássico (kJ/kg)

P e R – Constantes de forma do produto

P1 – Peso do produto vidrado (g)

P2 – Peso do produto sem vidragem (g)

Q – Calor libertado na compressão

Q_c – Calor útil do ciclo

s – Entropia (kJ/°C)

T – Temperatura (°C)

T_i – Temperatura ambiente do alimento (°C)

T_f – Temperatura final de congelação (°C)

T1- Temperatura à entrada do túnel (°C)

T2- Temperatura do ponto de congelação (°C)

T3 – Temperatura à saída do túnel de congelação (°C)

W_c – Trabalho fornecido ao compressor (kJ)

W_{c1} – Trabalho fornecido ao compressor do ciclo de liquefação (kJ)

W_{c2} – Trabalho fornecido ao compressor do ciclo de pré-arrefecimento (kJ)

W_T – Trabalho total de compressão (kJ)

λ – Rendimento líquido (%)

$\lambda_{\text{máx}}$ – Rendimento líquido máximo (%)

$\eta_{2^{\text{a}}\text{lei}}$ – Eficiência do ciclo pela 2ª lei da termodinâmica (%)

Nomenclatura

ASU – Unidades de Separação de Ar

Aw – Atividade de água

CO₂ – Dióxido de Carbono

COP – Coeficiente de Performance

DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia

Eh – Potencial de Oxidação/Redução

IQF – *Individual Quick Frozen*

LCO₂ – Dióxido de Carbono Líquido

LN₂ ou LIN – Azoto Líquido

N₂ – Azoto

PET - Polietileno tereftalato

pH – Nível de acidez

PID - Controlador proporcional integral

TKT - *Termocontainers for transport*

Índice

1	Introdução.....	1
2	Estado da Arte/Enquadramento Teórico	3
2.1	Abordagem histórica.....	3
2.2	Produtos Alimentares.....	4
2.3	Importância da qualidade de conservação de produtos alimentares	5
2.4	Técnicas de conservação com o uso do frio	6
2.4.1	Refrigeração.....	7
2.4.2	Congelação	8
2.5	Consumos energéticos associados à refrigeração e congelação de produtos alimentares	13
3	Líquidos Criogénicos	16
3.1	História da Criogenia	16
3.2	Produção e Armazenamento de Líquidos Criogénicos.....	17
3.2.1	Ciclo de Linde – Hampson	18
3.2.2	Ciclo de Linde – Hampson com Arrefecimento prévio.....	21
3.2.3	Destilação fracionada	24
3.2.4	Unidades de Separação de Ar.....	27
3.2.5	Captação de Dióxido de Carbono puro	29
3.3	Líquidos criogénicos utilizados no setor alimentar	30
3.4	Características e Propriedades dos Líquidos Criogénicos	31
3.4.1	Azoto	31
3.4.2	Dióxido de Carbono	33
3.4.3	Análise comparativa entre Azoto Líquido vs Dióxido de Carbono.....	34
4	Aplicações Criogénicas no Setor Alimentar e Bebidas.....	36
4.1	Congelação Criogénica	36
4.1.1	Congelação criogénica por imersão.....	38

4.1.2	Congelação criogénica por pulverização.....	39
4.1.3	Congelação Criomecânica	41
4.2	Vidragem	42
4.3	Golpe de Frio	43
4.4	Pressurização dos recipientes de bebidas.....	45
4.5	Arrefecimento de Massas.....	46
4.6	Transportes Refrigerados	48
5	Produtos alimentares propícios a processos criogénicos.....	50
6	Instalação e Funcionamento de Equipamentos Criogénicos	52
6.1	Descrição de uma Instalação criogénica.....	52
6.2	Equipamentos Criogénicos	53
6.2.1	Túnel de Congelação: Descrição, Funcionamento e Aproveitamento ideal.....	54
6.2.2	Armário de congelação: Descrição, Funcionamento e Aproveitamento ideal ...	56
7	Exemplo de um Estudo Criogénico.....	59
7.1	Cenário 1	59
7.2	Cenário 2.....	60
7.3	Estudo térmico	62
7.4	Seleção do Equipamento.....	64
7.5	Estudo Económico	64
8	Conclusão	67
9	Referências Bibliográficas	69
10	Anexos.....	73
	Anexo I - Balanço Energético Nacional na indústria alimentar e bebidas.	74
	Anexo II - Diagrama geral de fluxo de uma Unidade de Separação de Ar	78
	Anexo III – Representação esquemática Sistema de Separação de ar atmosférico (ASU) ..	81
	Anexo IV – Catálogo de equipamentos – Armário e Túnel Criogénico.....	82

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama de congelação de água e de uma solução aquosa.....	9
Figura 2 – Representação das fases de micro – cristalização que ocorrem durante uma congelação lenta	10
Figura 3 – Representação da estrutura orgânica das células quando aplicado processos de ultracongelação.....	11
Figura 4 - Consumo estimado de energia e usos finais no subsector de produção de frutas, sumos e legumes congelados, nos EUA em 2002	15
Figura 5 - Gráfico das Curvas de pressão de vapor de gases atmosféricos.....	17
Figura 6 - Esquema do sistema de Linde-Hampson e o diagrama T-s do ciclo	18
Figura 7 - Esquema do sistema de Linde-Hampson com pré-arrefecimento	22
Figura 8 - Esquema de coluna de destilação simples para produção de Oxigénio Líquido	25
Figura 9 - Esquema de coluna de destilação dupla para Produção de Oxigénio e Azoto	26
Figura 10 - Unidade de Separação de Ar (ASU).....	27
Figura 11 - Fontes de Matéria-Prima para captação e liquefação de Dióxido de carbono.....	30
Figura 12 - Evolução da temperatura do centro de um hambúrguer durante a congelação, em função do processo usado	37
Figura 13 - Representação de túnel criogénico de imersão	39
Figura 14 - Representação de túnel criogénico linear de pulverização	40
Figura 15 - Armário criogénico	40
Figura 16 - Representação esquemática do processo de congelação criomecânico	42
Figura 17 - Gráfico da evolução da temperatura no centro de pré-cozinhados por método de congelação convencional e por método criogénico	45
Figura 18 - Pressurização de garrafas PET com gotículas de azoto líquido.....	46
Figura 19 - Arrefecimento de massas em amassadora com injeção de CO2 líquido	47
Figura 20 -Depósito de transporte isolado arrefecido por placas eutécticas com neve carbónica	49

Figura 21 - Representação dos principais componentes de uma instalação de congelação criogénica.....	52
Figura 22 - Representação esquemática de um túnel linear de congelação.....	55
Figura 23 - Cenário 1 - Túnel criogénico à entrada e depois túnel espiral mecânico	59
Figura 24 - Cenário 1 - Túnel criogénico à saída do túnel espiral mecânico	61
Figura 25 - Diagrama de Fluxo de uma Unidade de Separação de Ar	78
Figura 26 - Diagrama de Mollier N2 do processo de congelação em túnel criogénico	85

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre congelação rápida e congelação lenta	11
Tabela 2 - Valores para as constantes de forma P e R.....	13
Tabela 3- Dependência do uso da eletricidade relacionada com a refrigeração.....	14
Tabela 4 - Composição e temperatura de ebulição dos principais componentes do Ar	24
Tabela 5 - Especificações padrão de ASU criogénicas	28
Tabela 6 - Características físico-químicas do azoto	32
Tabela 7 - Fatores de conversão para o azoto.....	32
Tabela 8 - Características físico-químicas do dióxido de carbono	33
Tabela 9 - Fatores de conversão para o dióxido de carbono	34
Tabela 10 - Comparação entre a utilização de Azoto ou Dióxido de Carbono em diversos parâmetros operacionais	34
Tabela 11 - Comparação entre a congelação criogénica e mecânica	38
Tabela 12 - Especificações do Produto e do Processo de congelação do cenário 1	60
Tabela 13 - - Especificações do Produto e do Processo de congelação do cenário 2.....	61
Tabela 14 - Características do Túnel Criogénico Cryofood 1,2X9	64
Tabela 15 - Impacto económico relativo ao custo e consumo de azoto	66

1 Introdução

A conservação dos alimentos sempre foi um desafio para o homem, a partir do momento em que este se passou a estabelecer num único lugar e surgiu a necessidade de armazenar e preservar a sua comida, especialmente os produtos excedentes e em zonas sujeitas a grande sazonalidade. Resultando no facto dos processos de conservação dos alimentos, tal como os comportamentos alimentares estivessem sempre de certa forma relacionados com as características específicas de cada país, fazendo com que fossem determinadas pela estrutura socioeconómica, a qual envolve principalmente as políticas económica, social e agrícola.

Ao longo dos tempos, com a globalização mundial os processos de conservação dos alimentos foram ficando cada vez mais uniformizados, resultado do desenvolvimento da tecnologia e à facilidade da transmissão da informação destes avanços tecnológicos, graças aos meios de comunicação escrita e visual e às novas estratégias de marketing.

Atualmente, destacam-se a refrigeração e a congelação como métodos que utilizam temperaturas baixas para conservação dos alimentos. Na refrigeração, o alimento é mantido numa temperatura que varia entre 0 °C e 7 °C e para uma congelação eficiente é necessária uma temperatura inferior a -18 °C porque, nessas temperaturas, a atividade microbiana é inibida.

Os produtos criogénicos permitir-nos contar com uma alternativa ao tradicional método de congelação por meio de um fluido refrigerante reciclável num ciclo de expansão - compressão (o que normalmente designamos por frio mecânico): o frio criogénico. Assim, a criogenia tem a sua fronteira térmica nos processos que operam a temperaturas inferiores a -45 °C, conhecido como o limite térmico tecnicamente comum em processos de frio mecânico. A obtenção destas temperaturas de trabalho inferiores é possível pelo aproveitamento da elevada potência térmica dos gases liquefeitos, como o azoto e o dióxido de carbono líquidos, cujas temperaturas de ebulição à pressão atmosférica correspondem a -195,6 °C e -78,9 °C, respetivamente.

Neste trabalho pretende-se apresentar o desenvolvimento dos processos de conservação por congelação, com a utilização de líquidos criogénicos, o aparecimento de novas aplicações criogénicas nos processos da indústria alimentar para além da congelação simples. Procura-se promover novas soluções tecnologicamente inovadoras e emergentes em matérias da

conservação a baixas temperaturas de produtos alimentares perecíveis, melhorando assim a sua qualidade e o seu tempo de vida útil.

Demonstra-se também soluções otimizadas aos processos produtivos de empresas do setor alimentar, retirando o máximo partido das características e propriedades frigoríficas dos líquidos criogénicos.

Quanto aos equipamentos criogénicos, estes são descritos quanto ao modo de funcionamento, bem como a recomendações para o seu aproveitamento ideal.

Assim ao longo do presente trabalho, tem-se como objetivo o estudo dos seguintes pontos:

- Demonstrar a importância de uma boa qualidade de conservação de produtos alimentares, através da utilização de processos de congelação;
- Consumos energéticos associados à refrigeração e congelação de produtos alimentares;
- Apresentação dos líquidos criogénicos, as suas formas de obtenção, armazenamento e transporte, tal como as principais aplicações na indústria
- Apresentação e caracterização das diversas aplicações dos criogénicos aplicados nas indústrias do setor alimentar e bebidas.
- Descrição dos equipamentos criogénicos e do seu modo de funcionamento, levantamento das necessidades de engenharia para uma instalação de congelação criogénica.
- Demonstração de um caso prático de implementação de um equipamento criogénico com a instalação de congelação convencional existente.

Espera-se que no fim do estudo, haja uma verdadeira e útil contribuição para o aumento do conhecimento existente nesta área específica de frio industrial.

2 Estado da Arte/Enquadramento Teórico

2.1 Abordagem histórica

Os métodos de conservação de alimentos, ao longo da história da alimentação da humanidade acompanharam e permitiram o desenvolvimento do homem. [1]

No período pré-histórico, o homem caçava e colhia alimentos para satisfazer a sua fome imediata. A disponibilidade dos alimentos estava intimamente relacionada com a maneira da qual ele vivia. A partir do momento em que a população humana se fixou numa certa área e começou a cultivar e a criar animais, houve uma melhoria na provisão de comida da comunidade. Essa mudança na forma de obter os alimentos alterou os hábitos alimentares da população, que passou a contar com um excedente de produção que poderia ser consumido nos períodos de escassez. [2]

Assim a partir de experiências do dia-a-dia, o homem pré-histórico foi descobrindo os meios para conservar o seu sustento e garantir a sobrevivência. O calor do sol, o fogo e gelo, elementos encontrados na natureza, foram os recursos primitivos mais utilizados e dos quais se baseou. Esses elementos é que ofereceram as pistas para o futuro da preservação. Na era moderna, a pasteurização e a liofilização, métodos tecnologicamente avançados e muito eficientes para a conservação de alimentos, são baseados nos mesmos princípios do uso do calor e do frio para a conservação.

Outras formas de conservar alimentos foram utilizadas, como a preparação das conservas por meio da adição de conservantes naturais, como sal, mel, vinagre, óleos e gordura animal.

No começo dos anos 1800, a conservação pelo uso do frio já era tida como uma forma eficiente para a preservação de alimentos. Os norte-americanos passaram a utilizar o método desde a segunda metade do século XIX para conservar peixes em recipientes rodeados por gelo e sal. E nos anos 1900, já congelavam ovos e frutas, enquanto as verduras, sumos concentrados, alimentos cozidos e pratos pré-cozinhados, só na segunda metade do século XX. [1]

Originando que, a técnica que mais se destacou nesse período tenha sido a refrigeração artificial, que a partir de experiências com gases, levadas a cabo por diversos físicos, entre

eles Gay-Lussac, descobriu-se que a expansão de gases retira calor do ambiente, o que levou, à criação de um método de compressão de gás, seguido da sua expansão, seria capaz de promover a refrigeração, dando origem às câmaras frigoríficas, que passaram a criar ambiente frios e não simplesmente conservativos. Este é, aliás, o princípio de funcionamento dos sistemas clássicos de produção de frio.

As primeiras máquinas de refrigeração à base de amônia, destinadas primeiramente a armazenar peixes, foram fabricadas por volta de 1880. [2]

A primeira utilização da criogenia para conservação de alimentos remonta a meados dos anos 90 do séc. XIX onde foi usado o dióxido de carbono para o transporte ferroviário de frutas sem o recurso à refrigeração. Mais tarde em 1930 foi usado no transporte comercial de carne. Em 1958 teve lugar a primeira comercialização e utilização da congelação criogénica. Na década de 60 foi utilizado em conjunto, o transporte refrigerado com a atmosfera modificada. Finalmente, em 1980 aprova-se a utilização do azoto e do dióxido de carbono para o armazenamento de todo o tipo de produtos frescos, processados e vegetais. [3]

2.2 Produtos Alimentares

Nem todos os alimentos sofrem deterioração e se tornam impróprios para consumo com a mesma facilidade, para isso é necessário saber distinguir a sua classificação em função da sua velocidade de deterioração. [4]

- Alimentos não perecíveis ou estáveis – não sofrem deterioração, por longos períodos de tempo, se forem manuseados e armazenados corretamente. (ex: açúcar, farinha e feijão seco)
- Alimentos pouco perecíveis – conservam-se em boas condições, durante um período longo de tempo, se corretamente manuseados e armazenados. (ex: batatas e algumas variedades de maçãs)
- Alimentos perecíveis – degradam-se rapidamente se não forem sujeitos a métodos de conservação. (ex: carne, peixe, aves, ovos, leite e a maior parte dos frutos e vegetais)

Em relação à qualidade de conservação dos produtos alimentares estes também são classificados segundo norma NP EN 1524: [4]

- **Produto Fresco:** todo o produto que não sofreu qualquer tratamento que possa modificar o seu estado natural, sem exceção da refrigeração.
- **Produto refrigerado:** todo o produto que sofre um arrefecimento sem que seja atingida a temperatura do seu ponto de congelação.
- **Produto congelado:** todo o produto cuja água de constituição fica congelada, atingindo uma temperatura de -10°C em todos os seus pontos, e que é em seguida mantido a essa temperatura até entrega ao consumidor.
- **Produto ultracongelado:** todo o produto que, depois de ultrapassar rapidamente a zona de cristalização máxima, atinge -18°C (pode ir formalmente a -25°C , -30°C) em todos os seus pontos e até entrega ao consumidor.

2.3 Importância da qualidade de conservação de produtos alimentares

A conservação dos produtos alimentares consiste em manter as características e propriedades destes o mais estável possível, mesmo em condições nas quais isso não seria viável. Assim os processos de conservação têm por objetivo evitar as alterações nos alimentos, sejam elas de origem microbiana, enzimática, física ou química. O que permite comercializar alimentos não só dotados de qualidades nutritivas e sensoriais, mas principalmente, isentos de microrganismos nocivos e as suas toxinas. [5]

Assim, diz-se que conservar é manter as características do alimento estáveis, por isso, é importante ressaltar que o alimento a ser conservado precisa de chegar à etapa de conservação com boa qualidade, uma vez que o processo de conservação não reverte o quadro de deterioração já iniciado, podendo apenas retardá-lo. [5]

Os processos de conservação de alimentos permitem:

- Aumentar o período de tempo durante o qual os alimentos podem ser consumidos com segurança;
- Em certos casos, melhorar as propriedades organoléticas dos alimentos, isto é, propriedades agradáveis aos órgãos dos sentidos;
- Ultrapassar a sazonalidade do consumo de certos alimentos, tornando a dieta mais variada e equilibrada;

- Aumentar a higiene alimentar;
- Facilitar a tarefa de preparação dos alimentos.

A conservação de alimentos torna-se um processo de elevada importância uma vez que, nem todos os alimentos sofrem deterioração e se tornam impróprios para consumo com a mesma facilidade, isto porque os microrganismos não utilizam as mesmas substâncias no seu metabolismo, e faz com que a composição dos alimentos esteja associada ao tipo de microrganismos que se podem desenvolver. [6]

Os principais fatores intrínsecos dos produtos alimentares que afetam o crescimento microbiano são:

- Atividade da água (a_w);
- Acidez (pH);
- Potencial de oxidação/redução (Eh);
- Composição química do alimento;
- Estrutura biológica do alimento;
- Substâncias antimicrobianas naturais presentes no alimento.

Por sua vez, os principais fatores extrínsecos dos produtos alimentares que afetam o crescimento microbiano são:

- Temperatura
- Humidade relativa e a composição do meio;

2.4 Técnicas de conservação com o uso do frio

A produção de frio para a indústria de alimentos foi um grande avanço e possibilitou o armazenamento e transporte de produtos perecíveis. Essa tecnologia oferece alimentos dotados de qualidades nutritivas e sensoriais durante longo período de tempo. [7]

O método de conservação pelo frio foi um dos primeiros métodos utilizados para a conservação de alimentos perecíveis, sendo a sua principal função conservá-los a uma temperatura reduzida de modo a não permitir a sua deterioração, através da extração de calor dos mesmos. [8]

O uso do frio no processamento de alimentos age de maneira inibitória. De modo geral, as reações químicas, enzimáticas e o crescimento microbiológico são apenas inibidos com a diminuição da temperatura. Esse tipo de processo não melhora a qualidade dos produtos, desse modo, apenas produtos bons e de qualidade devem ser refrigerados, uma vez que a temperatura baixa não destrói o agente patogênico, apenas diminui sua atividade [7].

2.4.1 Refrigeração

Uma das formas do uso do frio na conservação de alimentos é a refrigeração, nesse processo o alimento tem sua temperatura reduzida para valores entre 0°C e 8° C, ou seja, implica mudanças no calor sensível do produto. A refrigeração implica transferir a energia de um corpo que se pretende arrefecer para outro. Pois a temperatura é o reflexo da quantidade de energia que possui o corpo, e estes têm ou mais ou menos energia térmica associada. Com base nisto, refrigerar corresponde a retirar energia (calor) e não deve pensar-se em termos de produzir frio ou adicionar frio.

Deste modo, a refrigeração de alimentos pretende reduzir a velocidade das transformações microbiológicas e bioquímicas nos alimentos, prolongando assim a sua vida útil por dias ou semanas [9].

Para que o processo de conservação dos alimentos por refrigeração seja eficaz é necessário ter em conta e controlar certos parâmetros tais como, a temperatura de refrigeração que é aplicada, a humidade relativa, a velocidade de circulação do ar e também a composição da atmosfera circundante.

- A temperatura de refrigeração deve ser aplicada em função do tipo de alimentos ou do tempo de conservação pretendido. Dentro da câmara frigorífica a temperatura não deve sofrer flutuações superiores a 1 ° C, para se manterem as condições de conservação homogêneas em todo o produto.
- A humidade relativa é outro dos parâmetros que deve ser controlado, pois uma humidade relativa demasiado baixa vai provocar perdas de água dos alimentos, sendo que o produto vai perder peso e certas características em termos de qualidade. No entanto se for aplicada uma humidade relativa muito elevada, vai favorecer a multiplicação dos microrganismos, sendo que variações de humidade e também de temperaturas podem causar condensação da água nas superfícies dos alimentos.

- A velocidade de circulação do ar tem importância na medida em que ajuda a manter uma humidade relativa uniforme em toda a câmara, assim como a temperatura

Concluindo, o controlo destes parâmetros de refrigeração durante o armazenamento dos produtos alimentares bem como o conhecimento dos intervalos de temperaturas em que diferentes microrganismos se podem desenvolver, é muito importante para garantirmos a qualidade, credibilidade e segurança do alimento. [10]

2.4.2 Congelação

Outra forma de conservação de alimentos através de baixas temperaturas é pelo método de congelação. Neste método parte da água do alimento sofre mudança de estado, formando cristais de gelo [11].

Desse modo, a quantidade de água do alimento é reduzida, o que proporciona o aumento da vida útil do produto. A congelação retarda, mas não pára as reações físico-químicas e bioquímicas que levam a deterioração dos alimentos, e durante o armazenamento congelado ocorre uma mudança lenta e progressiva na qualidade sensorial dos produtos alimentícios [12].

Em geral, nas condições típicas de congelação (-18 °C), a atividade microbiana é praticamente impedida, tendo em vista que a maioria dos microrganismos não se desenvolve em temperaturas inferiores a -10 °C.

Os principais métodos de congelação podem ser através de:

- **Ar forçado** – Uma corrente de ar frio extrai o calor do produto até que este atinja a temperatura final pretendida.
- **Contacto direto** – Uma superfície fria em contacto com o produto que extrai o calor.
- **Criogenização** – Utiliza-se fluídos criogénicos, azoto ou dióxido de carbono, que substituem o ar frio para conseguir o efeito de congelação.

A figura 1 demonstra através de um gráfico a evolução da temperatura da água ao longo do tempo e de uma solução aquosa que simula o congelamento de um produto alimentar.

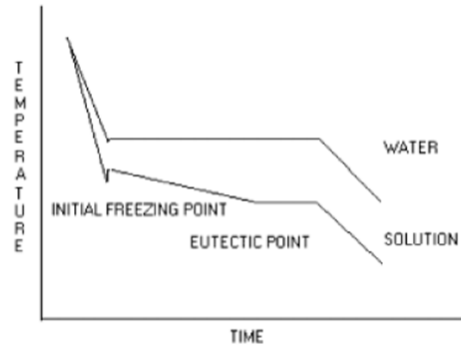


Figura 1 - Diagrama de congelamento de água e de uma solução aquosa

[Fonte: Khadatkhar, et al.,2004]

Pode dividir-se a análise da congelamento de uma solução aquosa em quatro partes. Primeiro, enquanto esta se encontra na fase líquida, a sua temperatura baixa, ao ser removido calor, até chegar próximo do ponto de congelamento. O ponto de congelamento destes produtos depende da concentração de substâncias dissolvidas e não do teor de água. De seguida é removido o calor latente acompanhado pela mudança de fase a uma temperatura constante. No entanto, ao contrário da água, o ponto eutético da solução aquosa não coincide com o começo da solidificação da fase líquida, e como tal, o início da remoção do calor latente vem acompanhado de um decréscimo de temperatura, até ser atingido o ponto eutético a partir do qual o calor latente é removido a temperatura constante. Após esta fase, quando todo o produto se encontra na fase sólida, a temperatura continua a decrescer à medida que o calor sensível é removido do gelo [13].

O comportamento da congelamento dos produtos alimentares, é bastante semelhante ao descrito acima, para uma solução aquosa e está de acordo com a figura 1.

Durante a congelamento, os alimentos são arrefecidos pela remoção de calor sensível e latente através de um meio químico de arrefecimento. O processo de congelamento é um problema de transmissão de calor, durante o qual ocorre uma mudança de fase dentro do produto alimentar. Em que o alimento é refrigerado da temperatura de partida T_i até à temperatura em que se inicia a congelamento, isto é a temperatura do ponto de congelamento T_2 (calor sensível); nesta temperatura a água contida no alimento começa a solidificar (calor latente), mantendo-se constante até ocorrer por completo a mudança de fase do teor de água do alimento, formando os cristais de gelo. Por fim o alimento continua a ser arrefecido até atingir a temperatura final de congelamento desejada T_f (calor sensível). [42]

Enquanto a mudança de fase do produto ocorre a denominada cristalização que mais não é do que a formação de pequenos cristais de gelo. Esta cristalização ocorre em duas etapas seguidas, começando pela formação dos seus núcleos seguida do crescimento dos cristais. O processo e tempo de formação dos núcleos têm uma influência direta no tamanho dos cristais de gelo.

Se a taxa de remoção de calor for lenta, ou seja, se a congelação for demorada, permanecendo demasiado tempo próximo dos 0°C formam-se poucos núcleos, que posteriormente irão crescer até um grande tamanho nos espaços intercelulares, deformando e rompendo a parede celular das células adjacentes, provocando a sua desidratação e conseqüentemente a perda de matérias orgânicas e proteicas, prejudicando a qualidade e valor alimentar do produto. [15]

No processo lento os produtos alimentares são colocados em câmaras de congelação com temperatura entre -4°C e -29°C. Com estas condições a congelação pode demorar entre 3 a 72 horas sendo os tradicionais congeladores domésticos um bom exemplo deste tipo de método. [30]

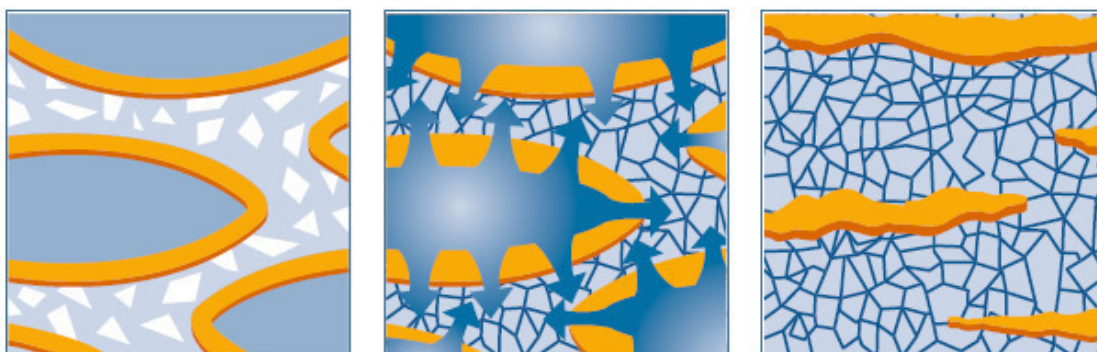


Figura 2 – Representação das fases de micro – cristalização que ocorrem durante uma congelação lenta

[Fonte: Linde, 2014]

A faixa de temperaturas entre os 0°C e os -4°C é a mais crítica porque é neste intervalo que se dá o ponto de congelação do produto e há a maior taxa de formação de cristais de gelo. É, portanto, imperativo que se passe essa faixa de temperaturas o mais rapidamente possível, aumentando a velocidade de congelação. Assim, se a taxa de remoção de calor for rápida, ou seja, um congelamento rápido, forma-se uma grande quantidade de núcleos impossibilitando o seu crescimento, resultando conforme representado na figura 3, num tamanho final muito reduzido e uniforme de microcristais que não alteram de maneira significativa a textura do produto. [15].

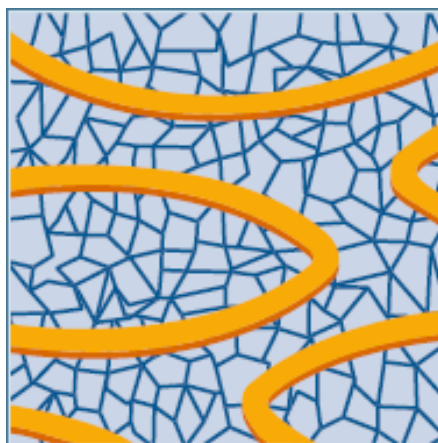


Figura 3 – Representação da estrutura orgânica das células quando aplicado processos de ultracongelamento

[Fonte: Linde, 2014]

Tanto no processo lento como no processo rápido, podem ser usados dois tipos de ventilação, ventilação natural e ventilação forçada, embora no processo rápido seja recomendável o uso de ventilação forçada, de modo a diminuir o tempo de congelamento. A tabela 1 resume as principais diferenças entre a congelamento rápida e lenta.

Tabela 1 - Comparação entre congelamento rápida e congelamento lenta

[Fonte: Dinçer, 2003]

Congelamento Rápido	Congelamento Lento
Formação de pequenos cristais de gelo	Formação de grandes cristais de gelo
Breve exposição a substâncias adversas	Longa exposição a substâncias adversas
Nenhuma adaptação a baixas temperaturas	Adaptação gradual a baixas temperaturas
Choque térmico	Nenhum efeito de choque térmico
Nenhum efeito protetor	Acumulação concentrada de solutos com efeitos benéficos
Microrganismos congelados em cristais	
Evita o desequilíbrio metabólico interno	

Não se deve, porém, afirmar que a congelamento rápida é benéfica para todos géneros alimentícios. De facto, uma congelamento demasiado rápida, pode ser prejudicial para certos produtos, pois pode induzir defeitos na textura, de produtos mais sensíveis, tornando-a mole e/ou esponjosa. Estes danos estão principalmente relacionados com as queimaduras por frio que podem originar também alteração de cor. [14]

Os tempos de congelação podem ser calculados analiticamente, mas geralmente não se tem as informações suficientes para tornar esse cálculo exato. No entanto, este cálculo dos tempos de congelação pode ser bastante preciso em produtos com formatos uniformes, para os produtos com formas irregulares, este cálculo fornece apenas uma referência aproximada. [44]

A fórmula de Plank utilizada para o cálculo do tempo de congelação dos produtos alimentares, tem sido amplamente utilizada, tendo sido particularmente valiosa para comprovar os resultados dos estudos experimentais, cobrindo uma ampla gama de variáveis. De forma que se for medido com precisão o tempo de congelação de um produto, este pode ser calculado para outros produtos se a maioria das condições forem semelhantes. [44]

Porém, esta equação apenas pode ser utilizada tendo em conta os seguintes pressupostos: (1) tratar-se de um problema unidimensional e estacionário; (2) considerando apenas o calor latente a ser removido dos alimentos; (3) não ter em conta o calor sensível necessário para arrefecer o alimento de T_i para T_2 (fase de pré-arrefecimento) e de T_2 para T_f (fase de sub-arrefecimento); e (4) assume-se que a temperatura de congelação e as propriedades térmicas do produto são constantes durante a mudança de fase. [42]

A fórmula genérica da equação de Plank para calcular o tempo de congelação é dada por:

$$t_{plank} = \frac{L}{T_2 - T_m} \left(\frac{P \times D}{H} - \frac{R \times D^2}{k} \right) \quad (1)$$

Em que L é o calor latente necessário para o produto congelar por completo, T_2 é a temperatura de início da congelação, T_m é a temperatura média do fluido refrigerante, os coeficientes h e k representam respetivamente, o coeficiente da transferência térmica na superfície, e o coeficiente de condutividade térmica do produto. O parâmetro D representa a espessura do produto na direção da transferência térmica e os restantes parâmetros P e R são fatores constantes que dependem da forma geométrica do produto. Com base na equação de Plank, demonstra-se que o tempo de congelação é inversamente proporcional à diferença de temperatura e é proporcional ao quadrado da espessura do produto. [43]

Através desta relação é possível calcular o tempo de congelação aproximado para outros produtos, tendo em conta os parâmetros de conceção da tabela 2.

Tabela 2 - Valores para as constantes de forma P e R

[Fonte: Gonçalves dos Santos, 2008]

Formato	P	R
Esférico	0,167	0,042
Cilíndrico	0,167	0,042
Folha	0,500	0,250

2.5 Consumos energéticos associados à refrigeração e congelação de produtos alimentares

O setor alimentar é considerado um grande consumidor de energia devido à grande necessidade em alguns processos de transformação e de conservação dos produtos associados a este setor.

Dos processos de transformação são utilizados principalmente dois tipos de energia:

Energia térmica: utiliza-se nas operações de transformação, como os processos de cozedura, esterilização e limpezas, utilizando frequentemente água quente e vapor.

Energia elétrica: utiliza-se nas operações de congelação, refrigeração, arrefecimento de materiais, no funcionamento de outros equipamentos elétricos, como, bombas, motores, cintas transportadores, entre outros. E em processos de transformação, o que, por questões de segurança alimentar, não se utilizam combustíveis fósseis, por exemplo, indústria de pastelaria.

Com base nos balanços energéticos disponíveis na Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), no setor da Indústria Alimentar e de Bebidas são utilizados vários tipos de energia, quer no processo produtivo e nas instalações, quer nas instalações a funcionar com cogeração. Nas tabelas e gráficos que se encontram no Anexo I, apresenta-se o balanço energético e a sua evolução de 1990 a 2009, nas indústrias alimentar e bebidas assim como nas cogerações inseridas nestes sectores. [16]

Através da análise do Anexo I, verificamos que o consumo de petróleo na Indústria Alimentar e de Bebidas diminuiu ao longo dos anos ao invés do gás natural que subiu o seu consumo, desde a sua introdução no mercado. Por sua vez, o consumo de energia elétrica tem mantido um aumento gradual durante os anos, do qual uma das possíveis razões para este cenário, se deva ao facto de ser cada vez maior a importância dada aos processos de refrigeração e congelação.

No entanto, com as tecnologias de cogeração, alguns setores da indústria alimentar nos seus processos conseguem tirar partido desta tecnologia, diminuindo o consumo à rede e aproveitando uma produção elétrica local (*on-site*), ou pela recuperação do calor libertado durante a queima do combustível para processos de cozedura, ou outros que seja necessário água quente ou vapor.

Os sistemas de refrigeração e congelação são dos maiores consumidores de eletricidade em muitas fábricas do setor alimentar e bebidas. A energia é utilizada pelos compressores de refrigeração e também por sistemas auxiliares como bombas e ventiladores. A importância da refrigeração e o consumo elétrico associado em diferentes setores da indústria, é tipicamente como demonstrado na Tabela 3. [17]

Tabela 3- Dependência do uso da eletricidade relacionada com a refrigeração

[Fonte: Food & Drink Industry Refrigeration Efficiency Initiative]

Setor da Indústria	% de eletricidade utilizada na refrigeração
Processamento de Leite	25 %
Cervejarias	35 %
Pastelaria e Confeitarias	40 %
Pré-cozinhados	50 %
Alimentos congelados	60 %
Armazenamento em câmaras frigoríficas	85 %

Outro exemplo do consumo energético na indústria agroalimentar, é o apresentado na Figura 4, que fornece uma repartição ilustrada das fontes de energia e usos finais no subsetor de frutas congeladas, sumos e vegetais, nos Estados Unidos da América em 2002.

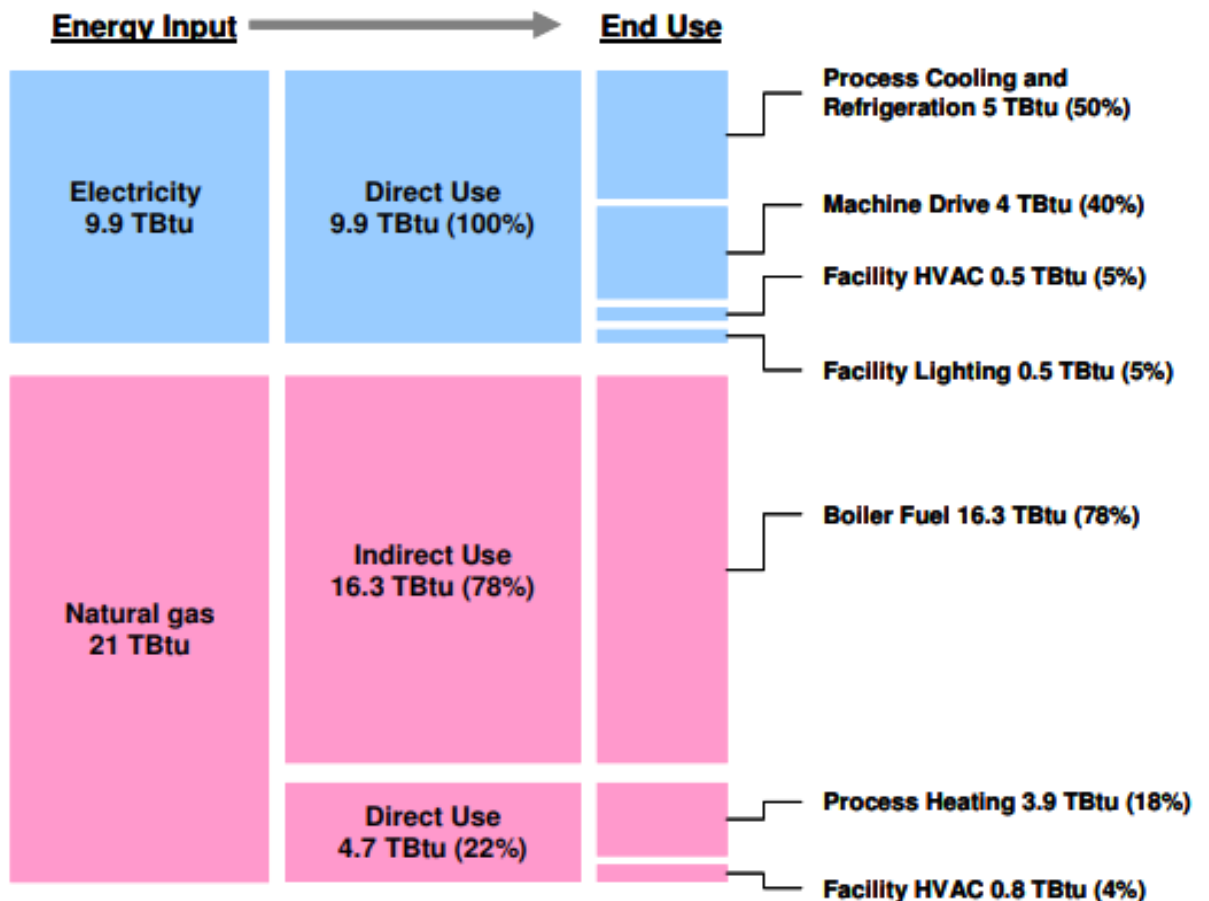


Figura 4 - Consumo estimado de energia e usos finais no subsector de produção de frutas, sumos e legumes congelados, nos EUA em 2002

[Fonte: Berkeley National Laboratory, Março 2008]

A maior parte do gás natural (78%) foi indiretamente utilizado como combustível para caldeiras. A eletricidade representava cerca de um terço de toda a energia consumida no subsector. Cerca de metade do consumo de eletricidade foi para o processo de refrigeração e congelação. [18]

Assim verifica-se que de forma geral, na indústria alimentar, os processos de refrigeração ou congelação clássica são os que possuem a maior fatia em termos de consumos energéticos, enquanto que a congelação criogénica acarreta maiores custos devido sobretudo ao fluido criogénico.

3 Líquidos Criogénicos

3.1 História da Criogenia

A criogenia (*crio-gen* – do grego que significa “produção” de frio) pode ser entendida, em linhas gerais, como a produção e utilização de frio muito intenso, alcançado por alguns gases no estado líquido.

O desenvolvimento da refrigeração e processos de baixa temperatura pode considerar como marco o ano de 1883, quando foram obtidas temperaturas abaixo de 100 K com a liquefação do ar, azoto e Oxigénio. [19]

Posteriormente, em 1898, James Dewar obteve a liquefação do hidrogênio a 20 K. Relata-se também nesta época a identificação do hélio, sendo este o Hélio 4 (^4He) finalmente liquefeito em 1908 a 4,2 K. Desde então, estabeleceu-se um grande esforço para a conquista de temperaturas mais baixas, próximas ao zero absoluto. Várias tecnologias foram propostas na tentativa de obtenção de temperaturas cada vez menores, possibilitando alcançar a ordem de grandeza de milikelvin e, posteriormente, microkelvin. [20]

Justifica-se o empenho das pesquisas na área da criogenia devido à diversidade de utilizações verificadas na atualidade. Foi possível a identificação de várias linhas de aplicação, destacando-se a medicina, a congelação rápida de alimentos e a conservação de material humano indispensável às atividades de engenharia genética.

As temperaturas “super frias” provocam modificações nas propriedades dos materiais, sendo aplicadas na propulsão de foguetes, no processamento eletrónico de dados, no campo dos materiais magnéticos (supercondutores), em processos industriais, nas siderurgias, onde o uso de oxigénio acelera a produção de aço, e no setor químico, onde se observa grande atuação na utilização de azoto para fabricação de amónia ou em processos de liofilização de medicamentos.

Em 1958 teve lugar a primeira comercialização e utilização da congelação criogénica. Na década de 60 do séc. XX foi utilizado em conjunto, o transporte refrigerado com a atmosfera modificada. Finalmente, em 1980 aprova-se a utilização do azoto e do dióxido de carbono para o armazenamento de todo o tipo de produtos frescos, processados e vegetais. [21]

3.2 Produção e Armazenamento de Líquidos Criogénicos

Carl von Linde criou o primeiro sistema contínuo de liquefação de componentes de ar, também capaz de separar oxigénio do azoto em Maio de 1895 em Munique. O seu sistema cíclico (sistema de Linde-Hampson) baseava-se no efeito de Joule-Thomson, isto é, conseguia atingir temperaturas extremamente baixas através da expansão do fluido. Esta sua experiência contribuiu para o início da indústria dos criogénicos.

Atualmente para possibilitar a separação do ar nos seus principais constituintes (azoto, oxigénio e árgon) é usado o processo da destilação fracionada, onde os seus constituintes são separados através dos seus diferentes pontos de ebulição numa coluna de destilação. No entanto, antes de se poder proceder à sua separação, é necessário condensá-lo, sendo que este só pode passar ao estado líquido a partir do ponto crítico, que neste caso é: 132,5K (-140,7°C) e 37,7 bar.

O gráfico da figura 5, com a curva de pressão de vapor ilustra as condições de temperaturas e pressões em que um gás condensa ou um líquido evapora. [22]

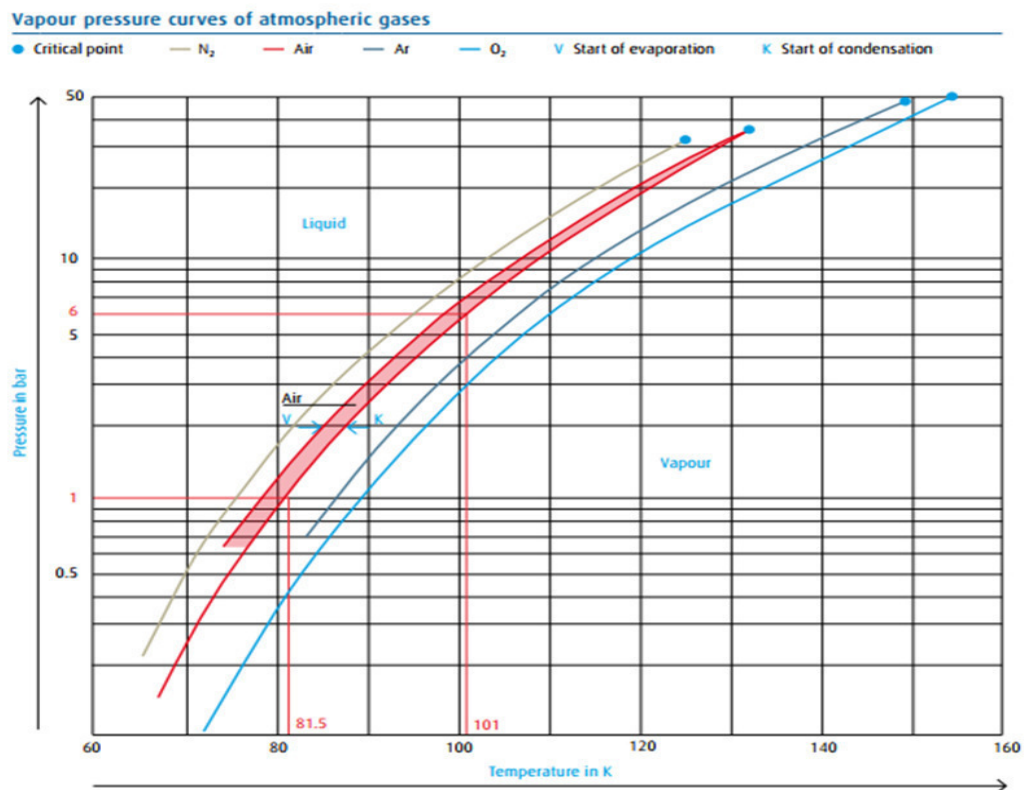


Figura 5 - Gráfico das Curvas de pressão de vapor de gases atmosféricos

[Fonte: Linde, sem data]

Pelo gráfico afere-se que os pontos de ebulição e condições de condensação das misturas de gases, como neste caso para os constituintes do ar não são idênticas, é verificável a existência de uma linha de condensação e uma linha de ponto de ebulição delineiam um intervalo do ponto de ebulição. Também através da análise do gráfico, conclui-se que: [22]

- O ar abaixo da pressão atmosférica (1 bar) deve ser arrefecido até $-192\text{ }^{\circ}\text{C}$ (81,5 K) para se dar a condensação;
- O ar abaixo de uma pressão de 6 bar deve ser arrefecido até $-172\text{ }^{\circ}\text{C}$ (101 K) antes de a condensação começar

3.2.1 Ciclo de Linde – Hampson

O sistema de Linde-Hampson é um sistema de liquefação de gás muito usado em criogenia sobretudo devido à sua grande simplicidade. Este ciclo baseia-se no efeito de Joule - Thomson e tem os seguintes elementos básicos para um ciclo frigorífico: compressor, permutador de calor, válvula de expansão e depósito.

O esquema do sistema e o ciclo termodinâmico, representado num diagrama T-s, encontram-se exemplificados na figura 6.

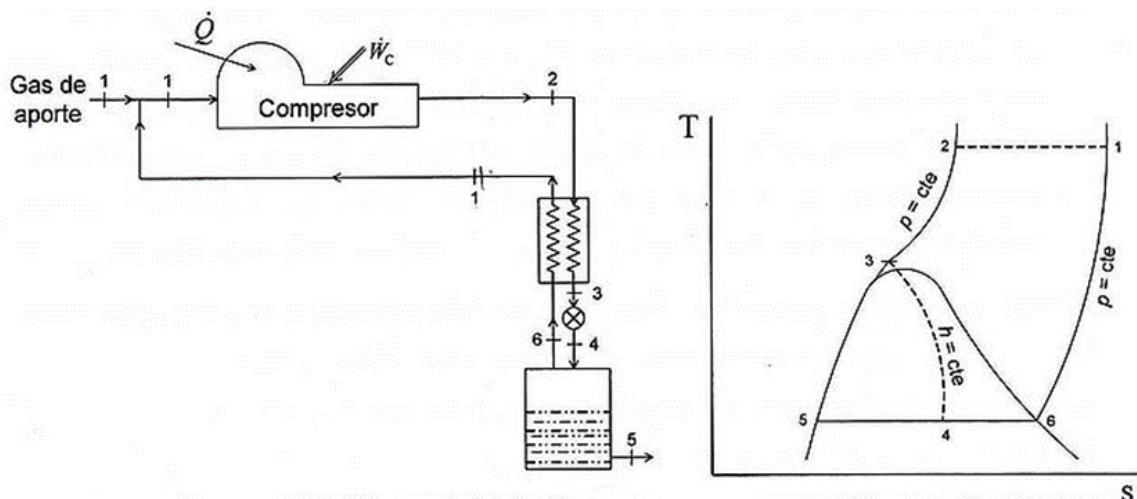


Figura 6 - Esquema do sistema de Linde-Hampson e o diagrama T-s do ciclo

[Fonte: ETSIA-UPM,2005]

Na análise do sistema de liquefação de Linde-Hampson simples, deve-se assumir algumas hipóteses simplificadoras, tais como: processos reversíveis, exceto na válvula de expansão; sistema adiabático; equipamentos ideais, isto é, que apresentam eficiência de 100%.

O ar admitido é introduzido no sistema e é imediatamente misturada com o fluido gasoso proveniente do depósito de líquido, antes de entrar unidade compressora onde é misturada. A esta mistura é então fornecido trabalho ao mesmo tempo que se lhe retira calor, de modo a realizar uma compressão praticamente isotérmica (1-2). Uma vez que a razão de pressão apresenta valores muito altos, é necessário a utilização de vários andares de compressão.

Após a compressão, a mistura é filtrada onde as partículas sólidas e alguns vestígios de fluido lubrificante do compressor ou água são removidos. Partículas estas que poderiam colmatar ou mesmo bloquear quer o permutador de calor quer a válvula de expansão. De seguida o gás comprimido passa pelo permutador de calor, geralmente de fluxos cruzados, onde perde calor a uma pressão constante (2-3), aproximando-se da curva de saturação. O fluido a alta pressão é expandido isentalpicamente (3-4) até à pressão ambiente, entrando dentro da zona de mistura, isto é, parte do fluido que se encontrava em estado gasoso passou ao estado líquido saturado (5), pronto a ser reencaminhado para o processo de separação, e o restante ao estado de vapor saturado (6) que é reencaminhado para o permutador onde absorve calor, provocando um arrefecimento da temperatura do gás proveniente do compressor. O vapor saturado é misturado com o ar exterior de reposição, recomeçando novamente o ciclo. [23]

Para se efetuar uma análise termodinâmica ao ciclo tendo como base o esquema da figura 6, começa-se por determinar o trabalho fornecido ao compressor, (em regime estacionário) utilizando a primeira lei da termodinâmica, tem-se: [45]

$$\dot{W}_c - \dot{Q} + \dot{m}(h_1 - h_2) = 0 \quad (2)$$

Pela segunda lei em torno do compressor, sabe-se o calor gerado na compressão, considerando que esta é isotérmica, é dado por:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times T_1(s_1 - s_2) \quad (3)$$

Combinando as duas equações obtém-se o trabalho necessário a fornecer ao compressor em função do caudal mássico de compressão:

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) - T_1(s_1 - s_2) \quad (4)$$

Aplicando a teoria do volume de controlo e realizando um balanço mássico ao permutador (para um permutador de calor ideal):

$$\dot{m}_2(h_3 - h_2) = \dot{m}_6(h_1 - h_6) \quad (5)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_2 - \dot{m}_5 \quad (6)$$

$$\dot{m}_2(h_3 - h_2) = (\dot{m}_2 - \dot{m}_5)(h_1 - h_6) \quad (7)$$

Para podermos determinar o caudal mássico de liquido que sai do reservatório, podemos efetuar o mesmo raciocínio efetuado para o permutador de calor, através de um balanço mássico:

$$\dot{m}_2 \times h_4 = \dot{m}_5 \times h_5 + \dot{m}_6 \times h_6 \quad (8)$$

$$\dot{m}_2 \times h_4 = \dot{m}_5 \times h_5 + (\dot{m}_2 - \dot{m}_5) \times h_6 \quad (9)$$

$$\frac{\dot{m}_2 \times h_4}{\dot{m}_5} = h_5 + (\dot{m}_2 - 1) \times h_6 \quad (10)$$

$$\dot{m}_5 = \frac{\dot{m}_2 \times h_4}{h_5 + (\dot{m}_2 - 1) \times h_6} \quad (11)$$

Para quantificarmos o trabalho do compressor em função do caudal mássico de liquido, aplica-se a 1ª lei da termodinâmica ao sistema permutador e depósito, não considerando o compressor, tem-se:

$$\dot{m}(h_1 - h_2) = \dot{m}_5(h_1 - h_5) \quad (12)$$

Desta forma, introduz-se o conceito de rendimento líquido λ que corresponde à percentagem de caudal mássico de fluido que se extrai do ponto 5, em função do caudal mássico total do ciclo:

$$\frac{\dot{m}_5}{\dot{m}} = \lambda = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_5} \quad (13)$$

$$\frac{\dot{W}_c}{\dot{m}_5} = \frac{\dot{W}_c}{\dot{m} \times \lambda} = ((h_1 - h_2) - T_1(s_2 - s_1)) \times \left(\frac{h_1 - h_5}{h_1 - h_2} \right) \quad (14)$$

Considerando Q_c como a Capacidade útil produzida pelo sistema, e voltando a aplicar a 1ª lei (balanço energético) a tudo, exceto o compressor, dá:

$$\dot{Q}_c = \dot{m} \times (h_1 - h_2) = \dot{m} \times \lambda(h_6 - h_5) \quad (15)$$

Combinando com a expressão para o trabalho do compressor ficamos com uma equação que representa o Coeficiente de Performance (COP) do ciclo:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_c} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_2) - T_1(s_1 - s_2)} \quad (16)$$

3.2.2 Ciclo de Linde – Hampson com Arrefecimento prévio

Este sistema é uma modificação do sistema anteriormente descrito. A modificação consiste num pré-arrefecimento do gás que sai do compressor para temperaturas abaixo da temperatura ambiente, através do recurso a outro sistema frigorífico a funcionar em cascata, assim com este arrefecimento é possível aumentar a fração liquefeita e reduzir a pressão necessária da compressão, fazendo com que a potência necessária do sistema seja inferior e consequentemente o custo por unidade de gás liquefeito produzido. [23]

Como o intervalo entre a temperatura de entrada do condensador (liquefator) para a temperatura ambiente, e para um desempenho máximo é geralmente muito grande, normalmente utilizam-se grandes máquinas de refrigeração em cascata. Este sistema de refrigeração em cascata, sugerido por Keesom, foi o primeiro sistema utilizado para liquefazer o ar. [23]

Numa instalação de liquefação de azoto, o gás natural como fluido refrigerante é frequentemente utilizado em máquinas frigoríficas em cascata. Uma máquina frigorífica de propano arrefece uma corrente de metano, do qual o evaporador pré-arrefece o azoto a ser liquefeito. [23]

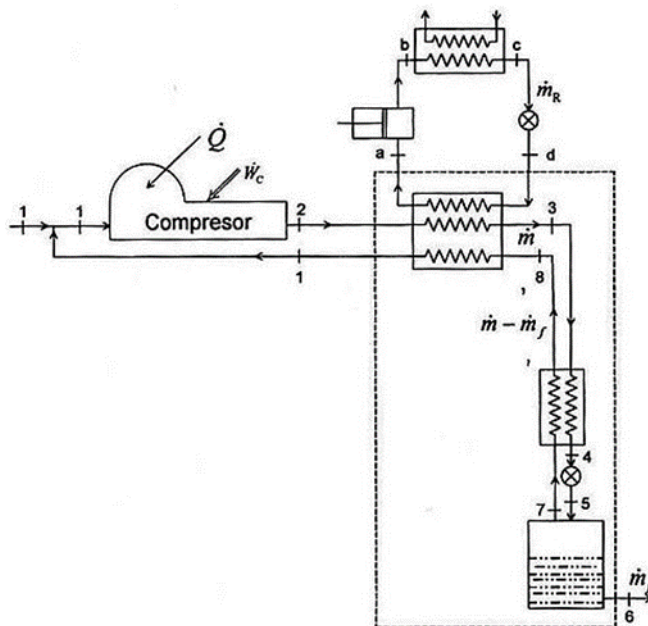


Figura 7 - Esquema do sistema de Linde-Hampson com pré-arrefecimento

[Fonte: ETSIA-UPM,2005]

Efetuada a mesma análise termodinâmica ao ciclo de Linde-Hampson com pré-arrefecimento, através de um balanço energético segundo a 1ª lei da termodinâmica:

$$\dot{m}_r \times h_d + \dot{m} \times h_2 = \dot{m}_r \times h_a + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_1 + \dot{m}_f \times h_6 \quad (17)$$

$$\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} = \lambda = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_6} + r \times \frac{h_a - h_d}{h_1 - h_6} \quad (18)$$

Aplicando a teoria do volume de controle ao permutador de calor do separador de líquido, obtém-se a seguinte expressão:

$$\dot{m} \times h_3 = \dot{m}_f \times h_6 + (\dot{m} - \dot{m}_f)h_8 \quad (19)$$

$$\lambda_{max} = \frac{h_8 - h_3}{h_8 - h_6} \quad (20)$$

Em relação ao trabalho total este será dado pelo trabalho do compressor do ciclo de liquefação e do ciclo de pré-arrefecimento, isto é:

$$W_{total} = W_{c1} + W_{c2} \quad (21)$$

O trabalho do compressor do ciclo de liquefação já determinamos anteriormente no ciclo de Linde-Hampson simples, e era dado por:

$$\frac{\dot{W}_{c1}}{\dot{m}} = (h_1 - h_2) - T_1(s_1 - s_2) \quad (22)$$

Já o trabalho do compressor do sistema de pré-arrefecimento é dado por:

$$\dot{m}_r \times h_a - W_{c2} = \dot{m}_r \times h_b \quad (23)$$

$$W_{c2} = \dot{m}_r(h_a - h_b) \quad (24)$$

$$\frac{\dot{W}_{c2}}{\dot{m}_r} = (h_a - h_b) \quad (25)$$

Substituindo na expressão inicial do trabalho total ficamos com:

$$-\frac{\dot{W}_{total}}{\dot{m}} = T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2) + r(h_b - h_a) \quad (26)$$

O coeficiente de performance do ciclo com pré-arrefecimento é dado por:

$$COP = \frac{Q_{util}}{W_{total}} \quad (27)$$

$$COP = \frac{h_1 - h_6}{W_{total}} \quad (28)$$

A eficiência energética, através da 2ª lei da termodinâmica, caracteriza-se por ser o quociente entre a capacidade útil do ciclo menos a exergia destruída, sobre o trabalho total de compressão:

$$\eta_{2ª lei} = \frac{(h_6 - h_1) - T_0(s_6 - s_1)}{W_{total} \times \dot{m}_f} \quad (29)$$

3.2.3 Destilação fracionada

A destilação fracionada é o principal método usado na separação de líquidos presentes numa mistura homogénea ou heterogénea, este baseia-se no princípio do equilíbrio líquido-vapor das misturas quando mantido em sistemas fechados.

Assim, após se proceder à total condensação do ar, através de um processo baseado no ciclo de Linde-Hampton, eleva-se a temperatura até que se alcance o ponto de ebulição do líquido que apresente a sua temperatura de ebulição mais baixa, ou seja, até que o primeiro componente passe ao estado gasoso, para que se proceda à sua destilação e separação. Posteriormente, faz-se com que a temperatura se eleve até ao ponto de ebulição do segundo componente, separando-o de seguida.

Quanto mais próximos forem os pontos de ebulição dos líquidos, menor o grau de pureza das frações destiladas uma vez que é mais difícil proceder à evaporação de um constituinte isolado.

Para o caso dos principais constituintes do ar atmosférico as temperaturas de ebulição, do oxigénio e do árgon são relativamente próximas o que torna mais complexa a total separação dos componentes. As temperaturas de ebulição dos principais constituintes do ar são as seguintes: [24]

Tabela 4 - Composição e temperatura de ebulição dos principais componentes do Ar

Componente	Volume (%)	Temperatura de ebulição (°C)
Azoto	78,08	-196
Oxigénio	20,95	-183
Árgon	0,934	-186

O processo acima descrito trata-se de uma explicação básica do funcionamento de uma unidade de separação dos constituintes do ar, sendo eles azoto, oxigénio e árgon. Mas na realidade a destilação industrial é um processo algo complexo, em que a separação dos constituintes do ar ocorre na denominada coluna de destilação, que são grandes colunas cilíndricas verticais cujo diâmetro pode ir até 6m e em altura variar entre os 10 e os 60m.

A mistura de fluidos que provêm do processo de liquefação, maioritariamente constituída por oxigénio e azoto, é admitida no equipamento de destilação fracionada onde é aquecida na sua base e enviada para o topo da coluna. Uma vez que o azoto passa ao estado de vapor antes do oxigénio, este tende a vaporizar e sobe ao longo da coluna, enquanto o oxigénio ainda no estado líquido desce até à sua parte inferior [24].

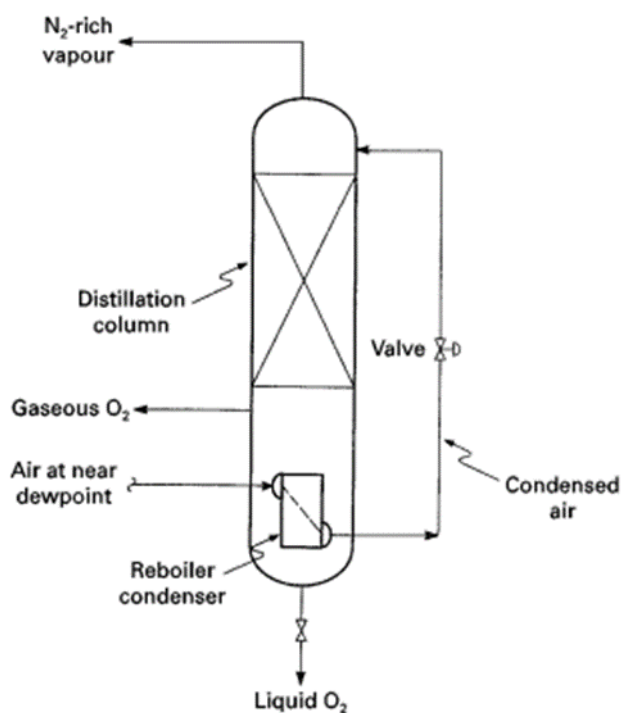


Figura 8 - Esquema de coluna de destilação simples para produção de Oxigénio Líquido

[Fonte: Kister et. al, 1992]

A coluna está repleta de níveis com obstáculos que vão forçar o contacto entre o vapor de azoto que está a ascender e o oxigénio líquido que está a descer, aumentando assim purificação dos componentes e por consequentemente a eficiência da separação. Este aumento de rendimento é conseguido uma vez que os obstáculos criam uma série de estágios vaporização-condensação, purificando a matéria final, resultando num enriquecimento da fase de vapor e num aumento de concentração da fase líquida [24]

Este sistema ilustrado na figura 8 constituído apenas por uma simples coluna, apenas permite a extração de oxigénio puro uma vez que o azoto ainda possui cerca de 7% de oxigénio.

O princípio da destilação de duas colunas é caracterizado através da combinação de um condensador e evaporador que se representa como um permutador de calor comum na unidade

da coluna. Por este meio, a separação por destilação é dividida em duas áreas com diferentes pressões. [24]

Uma configuração típica de coluna de destilação dupla é mostrado na figura 9. Nesta configuração o ar, comprimido, limpo e arrefecido é agora enviado para a coluna de destilação de alta pressão que opera a cerca de 6 bar.

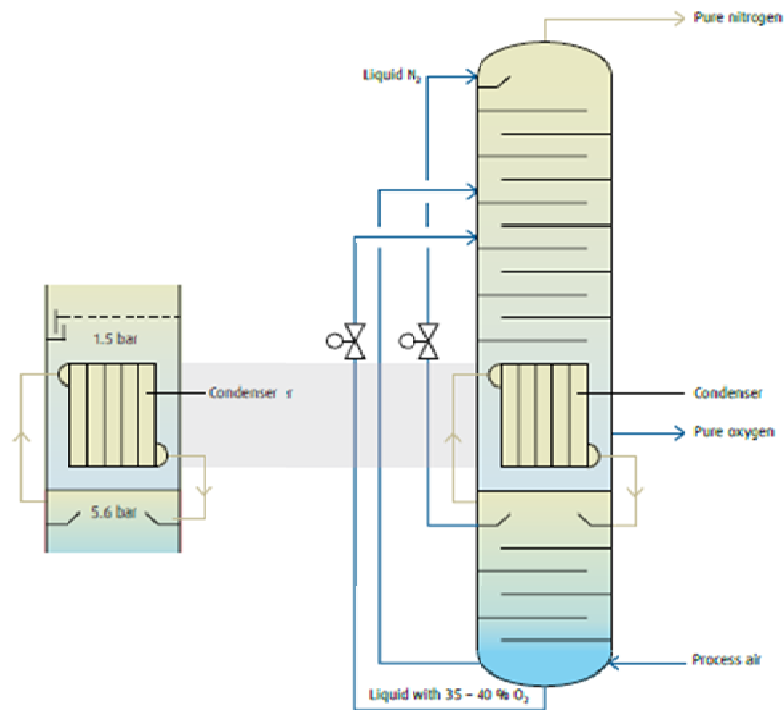


Figura 9 - Esquema de coluna de destilação dupla para Produção de Oxigênio e Azoto

[Fonte: Linde, sem data]

À medida que o vapor se eleva na coluna de alta pressão, fica enriquecido em azoto no topo da coluna, e a concentração de oxigênio nesse vapor fica extremamente reduzida. O vapor de azoto é condensado por troca de calor no permutador. A partir deste fluxo de azoto condensado, cerca de 60% é devolvido ao topo da zona de baixa pressão como refluxo líquido. O restante líquido que desce a coluna de alta pressão torna-se enriquecido em oxigênio para produzir oxigênio líquido que sai do fundo (geralmente com 35% de oxigênio). A este oxigênio líquido é reduzida a sua pressão através de uma válvula e vai ser enviado para um nível intermediário na coluna de baixa pressão.

Nesta zona da coluna o oxigênio líquido é destilado para se obter no topo um azoto gasoso bastante puro, e no fundo um fluxo de oxigênio líquido já com um elevado grau de pureza (cerca de 99,5%), considerado já como produto. [26]

Para uma melhor compreensão de todo o processo de separação de ar, por destilação fracionada, apresenta-se no anexo II um diagrama de fluxo completo de uma instalação tipo, incluindo a separação de árgon.

3.2.4 Unidades de Separação de Ar

As unidades de separação de ar (ASU) são a principal unidade de produção de todos os gases industriais, como o azoto, oxigénio e o árgon, separando o ar atmosférico nos seus componentes constituintes.

A produção de gases atmosféricos das ASU's pode usar uma das três tecnologias:

- Separação de ar criogénico (destilação fracionada);
- Adsorção nas unidades de separação por adsorção ou unidades de adsorção sob vácuo (PSA / VPSA);
- Difusão nas unidades de membrana.

Uma vez que o âmbito do trabalho aborda os processos criogénicos, apenas se descreve as ASU's que operam com separação criogénica. Embora existam estas outras tecnologias para produzir estas moléculas, os processos que utilizam são muito mais dispendiosos e com menor capacidade produtiva e de pureza.



Figura 10 - Unidade de Separação de Ar (ASU)

[Fonte: EnerProcess]

Em termos cronológicos, a primeira planta de separação de ar do mundo é inaugurada em 1902, mas só conseguia produzir oxigénio líquido e nenhum outro gás. Depois disso em 1904

a planta de separação de ar estreou a tecnologia de destilação na coluna com estágios de pressão o que permitiu também a produção de azoto gasoso. Em 1910 surge a primeira planta de separação a funcionar com dupla coluna de destilação. E só em 1954 é que se incluiu no processo de separação do ar, a pré-filtragem e purificação deste, que promoveu um avanço significativo nas purezas dos constituintes. [27]

Em Portugal até à data existem 4 Unidades de Separação de Ar criogénico.

Com isto, podemos verificar que a tecnologia de separação do ar por meio criogénico é considerada uma tecnologia madura. No entanto, a indústria conseguiu grandes melhorias ao longo das últimas 3 décadas na sua evolução, tanto em termos de produtividade das colunas de destilação, bem como na sua eficiência energética. E esta tendência deverá continuar no futuro, uma vez que a energia global de separação ainda é significativamente maior do que a energia de separação teoricamente necessária. [28]

A separação do ar criogénico é um processo intensivo em consumo de energia, pois tipicamente para produzir um 1 Nm³ de oxigénio, isto requer aproximadamente um consumo específico de 0,30 kWh/Nm³ por parte dos compressores, permutadores e bombas. Sendo a maior parte da energia consumida numa ASU é dos compressores, para elevar a pressão do fluxo de ar recebido desde a pressão atmosférica até aos 200bar.

Enquanto uma unidade não criogénica requer menos energia por unidade produzida, esta não é adequada para algumas aplicações, pois não produz líquido e não consegue igualar a pureza do gás à separação criogénica. Devido às pressões competitivas do mercado e preocupações ambientais resultaram numa melhoria contínua na eficiência energética das ASU's através da inovação de processos, design de equipamentos, manutenção e práticas operacionais mais eficientes. [29]

Tabela 5 - Especificações padrão de ASU criogénicas

	Azoto	Oxigénio	Árgon
Capacidade Produção	200 000 Nm ³ / h	70 000 Nm ³ / h	2 500 Nm ³ / h
Pureza	99,9995 %	99,9 %	99,9995 %

A tabela 5 apresenta a capacidade de produção e pureza dos elementos do ar, separados em instalações *standart* de separação criogénica.

Nestas o ar é filtrado, comprimido e arrefecido até à temperatura de liquefação. Os contaminantes (principalmente a humidade, dióxido de carbono e hidrocarbonetos pesados) são removidos, ou são congelados num permutador de calor reverso ou absorvidos por uma peneira molecular. E o ar na fase líquida é então separado nas colunas de destilação.

No anexo III, apresenta-se uma representação esquemática de toda uma unidade de separação de ar.

As ASU são constituídas pelos seguintes equipamentos: [28]

- Compressor de ar principal
- Sistema de Pré-arrefecimento
- Unidade de purificação para remover água e CO₂ antes de entrar na seção criogénica
- Permutadores de calor
- Colunas de destilação
- Vaporizadores / condensadores

A planta é projetada para poder ser operada por um único operador da sala de controle principal que examina toda a instalação. Um sistema de controlo recolhe os dados do processo em tempo real e em toda a planta e envia as informações para a sala de controlo. Onde toda a informação é exibida numa interface de operação composta por monitores e onde o operador pode monitorizar, controlar e otimizar o processo.

O fornecimento dos produtos criogénicos até ao consumidor final, pode ser feito através de condutas, quando a proximidade e o caudal necessário assim o permite, ou através de camiões equipados com tanques cisterna.

3.2.5 Captação de Dióxido de Carbono puro

O dióxido de carbono é obtido através de fontes naturais com hidrocarbonetos ou é formado como subproduto, sobretudo derivado de indústrias químicas e petroquímicas onde este é captado, purificado, comprimido, desumidificado e liquefeito para se obter um CO₂ de alta qualidade e pureza. Para isso é necessário que este seja recuperado e purificado a partir de um

grande fluxo de gás rico em CO₂, tipicamente fluxos que contêm uma alta percentagem de dióxido de carbono gerado como um subproduto. [25]

As fontes mais comuns de matéria-prima de CO₂ para plantas de dióxido de carbono líquido comercialmente viáveis são fábricas de produção de hidrogénio, de amónia ou etanol e grandes indústrias de cervejarias.

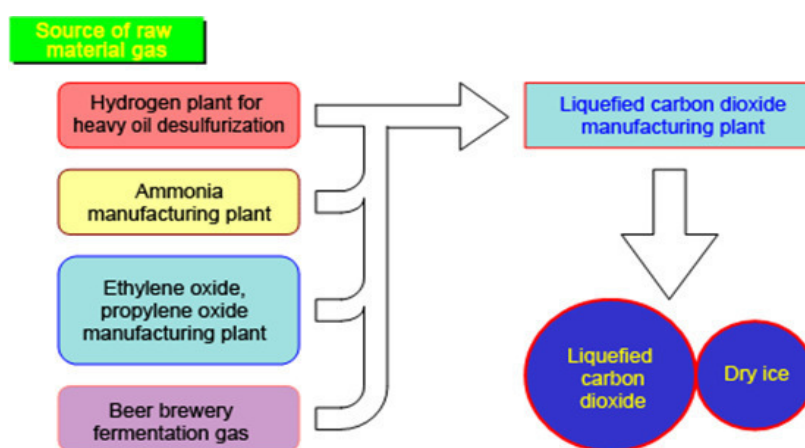


Figura 11 - Fontes de Matéria-Prima para captura e liquefação de Dióxido de carbono
[Fonte Hitachi, 2017]

A remoção de dióxido de carbono dos gases resultantes de um processo de combustão (incineradores, caldeiras ou centrais de energia) pode ser necessária por razões ambientais, mas essas fontes não são bons candidatos para recuperação comercial devido à baixa concentração de CO₂ no gás fonte e à presença de compostos indesejáveis que podem criar sabor, odor ou mesmo problemas de saúde se não forem completamente removidos. [25]

3.3 Líquidos criogénicos utilizados no setor alimentar

Em termos de aplicabilidade dos líquidos criogénicos na indústria alimentar, é muito frequente o uso destes, principalmente do dióxido de carbono (CO₂) e do azoto (N₂).

O dióxido de carbono e o azoto líquidos podem ser armazenados a baixa pressão a temperaturas muito baixas (CO₂ a -78 °C; N₂ a -196 °C), e ao entrar em contacto direto com os produtos alimentares (mais quentes) estes gases liquefeitos vaporizam e absorvem uma grande quantidade de calor, proporcionando o arrefecimento dos mesmos.

Os gases obtidos após a vaporização são ainda utilizados para remover calor, antes de serem libertados em segurança para a atmosfera, permitindo elevados rendimentos dos equipamentos

de congelação. Este método, conhecido como ultracongelação e arrefecimento criogénico, é utilizado industrialmente há mais de 40 anos e é bem conhecido por garantir alimentos congelados ou refrigerados de elevada qualidade.

O dióxido de carbono é aplicado sobretudo no armários criogénicos e contentores de transporte através da neve carbónica ao mesmo tempo que cria um ambiente inerte., no arrefecimento de massas diretamente nas amassadoras.

No entanto, a utilização do azoto é mais frequente na congelação de géneros alimentícios em túneis de congelação, uma vez que permite uma congelação rápida ou um golpe de frio no produto com temperaturas muito mais baixas e uma atmosfera inerte que inibe o crescimento microbiológico, mantendo as características do produto e ao mesmo tempo evita a perda de peso do produto. [30]

As bebidas são muitas vezes protegidas da oxidação através do uso de azoto, ou mistura entre azoto e dióxido de carbono, evitando assim o uso de antioxidantes que seriam adicionados ao produto. O dióxido de carbono é largamente usado na gaseificação de bebidas como é o caso de cervejas, águas minerais e refrigerantes, podendo ser adicionado tanto nas unidades de produção como nos estabelecimentos de venda e consumo, nestes casos já no estado gás comprimido [30]

3.4 Características e Propriedades dos Líquidos Criogénicos

Tanto o Azoto como o Dióxido de Carbono caracterizam-se principalmente por serem gases inertes, isto é, em condições normais não reagem com outras substâncias, estes são também inodoros, incolores e insípidos. Somando ainda a capacidade frigorífica destes dois gases a temperaturas criogénicas, faz com que os produtos alimentares mantenham as suas propriedades como a consistência, sabor e cheiro com a maior qualidade possível.

3.4.1 Azoto

O azoto foi descoberto em 1772 em Edimburgo, Escócia, pelos cientistas Daniel Rutherford e Priestley, mas foi o químico francês Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) que lhe atribuiu a designação de azoto ou nitrogénio em 1775-76. O nome nitrogénio deriva do grego *nitrogenes* que significa gerador de sol.

O azoto é um elemento pouco reativo, pelo que em condições normais não se combina com nenhum outro elemento e é incapaz de entrar em combustão. O azoto é o principal constituinte do ar, constituindo 78,08% do seu volume. No entanto, pode provocar asfixia num espaço confinado ou sem ventilação suficiente, se por acumulação do gás, ocorrer a deslocação do ar e insuficiência de oxigénio. [31]

A tabela 6 mostra as principais características físico-químicas do azoto, enquanto que na tabela 7 se disponibilizam os fatores de conversão entre as principais unidades de medida deste elemento.

Tabela 6 - Características físico-químicas do azoto

[Fonte: Praxair, 2017]

Azoto		
Fórmula		N2
Número Aditivo alimentar		E-941
Densidade do gás (ar = 1)		0,96
Densidade do líquido (água = 1)	À temperatura de liquefação	0,80
Ponto de ebulição	Temperatura	-195,8°C
	Calor latente de ebulição	198,7 kJ/kg
Ponto crítico	Temperatura	-146,9 °C
	Pressão	34 bar
Capacidade útil de Refrigeração		690 kJ/kg

Tabela 7 - Fatores de conversão para o azoto

[Fonte: Praxair, 2017]

Azoto		
m3 de gás (1 bar e 15°C)	Litros de gás em estado líquido (em equilíbrio a 1 atm)	Peso em kg
1	1,447	1,170
0,691	1	0,809
0,855	1,237	1

3.4.2 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono não é inflamável e, sob condições atmosféricas, é quimicamente estável e inerte, porém este pode ter uma reação violenta com determinadas substâncias como, por exemplo, o amoníaco. As reações de combustão são inibidas ou completamente suprimidas pelo CO₂.

O dióxido de carbono dissolve-se na água para produzir o ácido carbônico, que reage como um ácido fraco e tem um efeito corrosivo no aço carbono e nalguns metais não ferroso.

No seu estado gasoso e à pressão atmosférica, o dióxido de carbono é aproximadamente 1,5 vezes mais pesado do que o ar. Por isso, o CO₂ tende a fluir predominantemente no sentido descendente e pode acumular-se em poços, caves ou em depressões naturais. Se existir pouca circulação de ar, estas acumulações de CO₂ podem persistir durante várias horas e causar atmosferas asfíxiantes. [31]

Na tabela 8 apresenta as principais características químicas e físicas do dióxido de carbono, enquanto que a tabela 9 apresenta os fatores de conversão entre as diversas unidades de medida.

Tabela 8 - Características físico-químicas do dióxido de carbono

[Fonte: Praxair, 2017]

Dióxido de Carbono		
Fórmula		CO ₂
Número Aditivo alimentar		E-290
Densidade do gás (ar = 1)		1,53
Densidade do líquido (água = 1)	A 25 °C e 6,4 bar	0,71
Ponto de ebulição	Temperatura	-78,4 °C
	Calor latente de sublimação	573 kJ/kg
Ponto crítico	Temperatura	31 °C
	Pressão	73,8 bar
Capacidade útil de Refrigeração		565 kJ/kg

Tabela 9 - Fatores de conversão para o dióxido de carbono

[Fonte: Praxair, 2017]

Dióxido de Carbono		
m³ de gás (1 bar e 15°C)	Litros de gás em estado líquido (em equilíbrio a 1 atm)	Peso em kg
1	1,569	1,848
0,637	1	1,178
0,541	0,849	1

3.4.3 Análise comparativa entre Azoto Líquido vs Dióxido de Carbono

O azoto líquido e o dióxido de carbono podem ser usados indistintamente em muitas aplicações de congelação de alimentos. No entanto, o azoto líquido em grande parte das vezes oferece mais vantagens em relação ao dióxido de carbono, principalmente devido à sua potência frigorífica ser superior ao dióxido de carbono, onde este tem mais vantagens na congelação em ambientes que se pretenda atmosferas bacteriostáticas. Na tabela 10 apresenta-se a comparação na utilização do azoto e do dióxido de carbono em vários parâmetros operacionais a ter em conta num projeto de congelação criogénica.

Tabela 10 - Comparação entre a utilização de Azoto ou Dióxido de Carbono em diversos parâmetros operacionais

[Fonte: Matheson Gas, 2010]

	Azoto	Dióxido de Carbono
Investimento inicial	<ul style="list-style-type: none"> • Consegue alcançar menores Temperaturas de congelação • Tamanho e custo do equipamento é menor 	<ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas de congelação superiores, equivalem a que os equipamentos sejam proporcionalmente maiores.
Qualidade do Produto	<ul style="list-style-type: none"> • A congelação rápida não permite a criação de grandes cristais de gelo no interior do produto, preservando a sua textura 	<ul style="list-style-type: none"> • Um congelamento lento pode afetar negativamente a qualidade final do produto
Custos Operativo	<ul style="list-style-type: none"> • Nas mesmas condições termodinâmicas, o azoto tem uma capacidade frigorífica superior de cerca de 22 % em relação ao CO₂. • O processo irá utilizar menos quantidade de LN₂ do que CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Mesmo sendo mais barato do que o LN₂, o custo de congelação pode ser superior uma vez que requer mais quantidade de líquido criogénico
Custo de manutenção	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos simples, requerem uma manutenção simples 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos um pouco mais complexos logo necessitam de uma manutenção mais exigente
Flexibilidade operacional	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento de menor dimensão, deixa margem para possibilidade de expansão • Mais simples de operar • Pode operar de modo eficiente mesmo quando sai fora das especificações de projeto 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de maiores dimensões ocupam mais espaço • Menos “<i>user-friendly</i>”, requer uma maior supervisão • Tem de ser dimensionado para um produto e quantidade específicos

Tal como se pode verificar, a utilização do azoto líquido num túnel de congelação apresenta uma imediata vantagem face ao dióxido de carbono. Até mesmo em termos de consumo de

dióxido de carbono é maior do que o de azoto líquido, mas as perdas no armazenamento do líquido são menores.

De facto, não é muito comum recorrer-se ao dióxido de carbono para proceder à congelação pura de géneros alimentícios.

4 Aplicações Criogénicas no Setor Alimentar e Bebidas

Na indústria alimentar atual, em rápida evolução, o congelamento clássico é visto como uma forma de tecnologia de congelação estabelecida há muito tempo, enquanto que a congelação por meio criogénico é vista como uma nova alternativa, especialmente na produção de géneros alimentícios de valor acrescentado e também pela sua capacidade de variação dos parâmetros em função do produto a congelar.

Neste capítulo pretende-se apresentar as principais aplicações criogénicas utilizadas na indústria alimentar, sobretudo na área da congelação criogénica onde esta pode ser conciliada com diversos sub-processos, como é o caso da vidragem no setor da pesca (criação de camada aquosa protetora em redor do alimento) ou a redução térmica na indústria dos produtos pré-cozinhados, para evitar o crescimento microbiano e as degradações do produto.

4.1 Congelação Criogénica

A congelação criogénica baseia-se na redução da temperatura do produto através da aplicação direta de um meio químico, geralmente dióxido de carbono ou azoto líquido.

Dos métodos criogénicos, a congelação é a mais comum na indústria alimentar, pois possui inúmeras vantagens, como a velocidade muito rápida em que produto congela, devido ao facto de, no caso do azoto líquido, cerca de 48% das frigorias que proporciona serem realizadas a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que lhe confere elevada potência térmica. Justificando assim as altíssimas taxas de troca térmica, responsáveis pela congelação quase que instantânea. Outra das vantagens da congelação criogénica, é que esta trabalha com atmosferas livres de oxigénio, evitando qualquer oxidação no alimento. [11]

Este tipo de congelação é mais utilizado para produtos congelados individualmente. Este método de congelação é denominado por *Individually Quick Frozen* (IQF), e permite que os produtos sejam congelados no mesmo espaço, mas de forma individual.

A ideia de se obter uma congelação rápida e individual de alimentos começou com os primeiros desenvolvimentos tecnológicos destinados ao congelamento rápido. A necessidade

de um meio efetivo para congelar rapidamente pequenos alimentos com potencial de se aglomerarem ou ficarem agarrados durante o processo, resultando num produto 100% individualmente congelado, é o objetivo do congelamento IQF. Produtos como, asas de galinha, postas de peixe pequenos legumes, camarões, batatas, carne picada, e outros casos em que seja importante conservar itens de forma individual são alguns dos produtos agora congelados com esta tecnologia. [21]

O gráfico da figura 12 mostra o perfil clássico associado à descida térmica progressiva de um alimento ao longo do tempo. O comportamento genérico da evolução de temperatura, mostra sempre uma primeira descida térmica seguida de uma estabilização a temperaturas ligeiramente inferiores aos 0 °C (consoante o ponto de congelação do alimento), para depois continuar a descer uma vez produzida a mudança de fase. Essa fase intermédia está relacionada com a cristalização da água contida no alimento, e será mais longa quanto menor for a potência térmica administrada. Portanto, o tipo de congelação determinará não só o tempo necessário para alcançar a temperatura de armazenamento, mas também o tamanho dos cristais formados. [21]

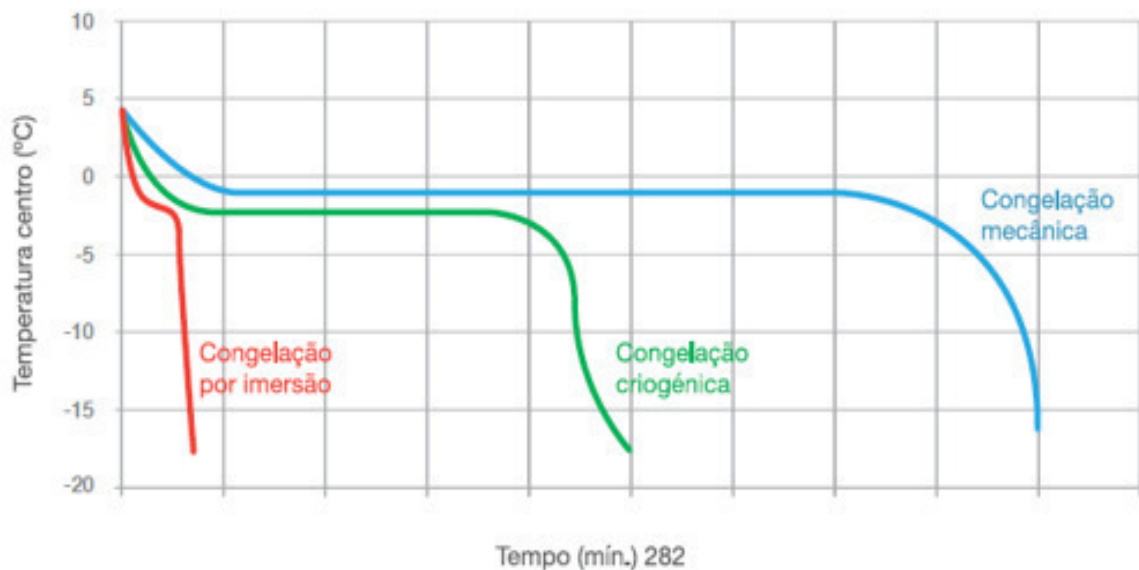


Figura 12 - Evolução da temperatura do centro de um hambúrguer durante a congelação, em função do processo usado

[Fonte: Praxair, sem data]

Comparando a congelação mecânica com a criogénica, pode-se destacar a vantagem da última, uma vez que a congelação é feita num curtíssimo espaço de tempo, quando comparada com a solução clássica, resultando na formação de pequenos cristais distribuídos

uniformemente por todo o material, evitando-se assim a degradação bacteriológica, enzimática e oxidativa, reações estas que se refletem numa clara melhoria de sabor, cheiro, nutrição e aparência. [13]

Tabela 11 - Comparação entre a congelação criogénica e mecânica

[Fonte: Praxair, 2017]

Congelação Criogénica	Congelação Mecânica
Baixo investimento/Aluguer de equipamentos	Grande investimento inicial
Baixo custo de manutenção	Maior custo de manutenção
Instalação Rápida	Instalação complexa
Taxa de Produção variável	Taxa de Produção Fixa
Aspersão direta	Frio Indireto
Equipamentos compactos	Equipamentos de grandes dimensões
Tempos de congelação muito baixos	Tempos de congelação altos
Maior Qualidade e melhor aspeto	Perdas de cor e sabor
Mínimas Perdas por desidratação	Perdas de peso

Existem dois tipos principais de sistemas de congelação criogénica utilizados como alternativa aos sistemas mecânicos convencionais de ar forçado, sendo estes: por imersão ou por pulverização.

4.1.1 Congelação criogénica por imersão

Este tipo de congelação tem uma enorme capacidade de permuta de calor, uma das mais elevadas, uma vez que os produtos são imersos separadamente num banho contendo o fluido criogénico, sendo por isso ideal para produtos que necessitam do mínimo tempo possível para a sua congelação, adaptando-se muito bem a produtos difíceis de congelar separadamente.

O tempo em que o produto está em contacto com o fluido pode ser ajustado através da velocidade do tapete, enquanto que o fluido criogénico vaporizado será libertado como desperdício para a atmosfera. Fazendo com que o consumo de fluido criogénico neste processo seja bastante elevado. [13]

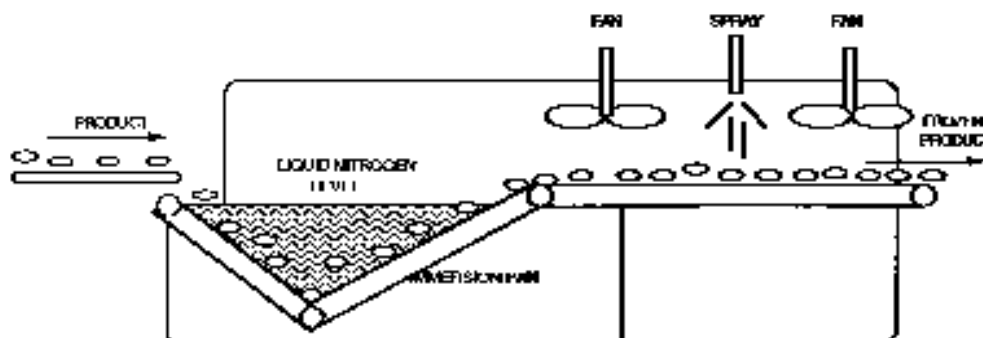


Figura 13 - Representação de túnel criogénico de imersão

[Fonte: Khadatkar, et al., 2004]

Este processo ajuda a preservar o sabor, humidade e evita perdas de peso, no entanto a qualidade da textura do produto pode ser afetada devido ao choque térmico, sendo necessário que exista um bom controlo dos parâmetros de velocidade do tapete do equipamento, para não provocar queimaduras por frio ao produto. [13]

4.1.2 Congelação criogénica por pulverização

A técnica de congelação criogénica por pulverização é muito menos severa para o produto, sendo por isso usada mais frequentemente, quer seja na versão de congelação em túnel para processos contínuos ou para congelação em armário criogénico para processos descontínuos.

Neste método o azoto líquido é pulverizado sobre os produtos que são colocados num tapete que atravessa o equipamento, resultando numa rápida congelação, e uma desidratação muito baixa do produto. Neste processo em determinados produtos, existe um risco de formação de pedaços aglomerados e que estes se agarram ao tapete rolante, tornando-o complicado de limpar.

Quando o azoto líquido é pulverizado sobre um alimento, este á saídados injetores começa logo aevaporar, fazendo com que apenas 48 % da capacidade frigorífica seja utilizada na forma de calor latente de vaporização para que o azoto líquido, em contacto com o produto,

evapora. Os restantes 52% da capacidade frigorífica ficam logo disponíveis como gás muito frio, sendo este gás recirculado pelos ventiladores para a zona de estabilização ou de pré-arrefecimento do túnel para otimizar o rendimento do equipamento e da capacidade de congelação. [11]

O consumo de azoto líquido deste processo de congelação varia muito, dependendo da quantidade de fluido criogénico a usar, uma vez que é função da taxa de evaporação de cada gota individual que sai do difusor da máquina, do grau de contacto entre as gotas de fluido, da superfície do produto e do diâmetro inicial de cada gota. [13]

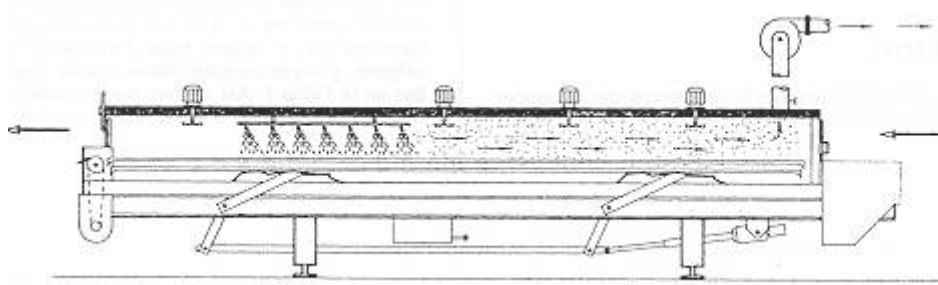


Figura 14 - Representação de túnel criogénico linear de pulverização

[Fonte: Air Liquide, sem data]

Pode haver dois tipos de equipamentos distintos a funcionar com este processo, o túnel linear projetado para funcionar em processos contínuos (Figura 14) e o armário criogénico que é concebido expressamente para a congelação controlada de produções intermitentes. (Figura 15).



Figura 15 - Armário criogénico

4.1.3 Congelação Criomecânica

A congelação criomecânica é uma técnica de congelação, que tem como objetivo o aproveitamento das vantagens oferecidas pela congelação clássica mecânica e pela criogénica. O seu princípio de funcionamento é a junção destes dois túneis, num único processo de congelação, de forma a que o produto passe pela parte clássica do túnel e em seguida pela parte criogénica, ou vice-versa. Assim consegue-se obter uma enorme qualidade no produto sem ter um grande custo de utilização associado ao consumo de fluido criogénico. [32]

Caso se introduza a criogenia antes do frio mecânico obtém-se um endurecimento superficial ao mesmo tempo que se passa a zona da congelação de forma rápida, evitando assim a formação de grandes cristais de gelo. Reduzindo significativamente as perdas de humidade do produto e obtendo os seguintes efeitos benéficos:

Relativamente ao processo:

- Fazer face a aumentos ou picos de produção sem ter de realizar investimentos elevados.
- Descongelação no túnel mecânico menos frequente. O golpe de frio criogénico sela a superfície do produto, diminuindo as perdas por gotejamento.

Relativamente ao produto:

- Ao diminuir o tempo utilizado na congelação, aumenta notavelmente a vida e a qualidade do produto.
- Melhor comportamento microbiológico pela utilização de um gás inerte.
- Redução da desidratação e perdas de peso.
- Congelação de produto finamente cortado, com molho, ou facilmente deformável no processo.

Se a criogenia vier a seguir ao frio mecânico, consegue-se um expressivo aumento da capacidade de produção, que pode mesmo duplicar, mantendo um baixo consumo de azoto. Este aumento de produção pode ser especialmente relevante para incrementos sazonais de produto a congelar. [32]

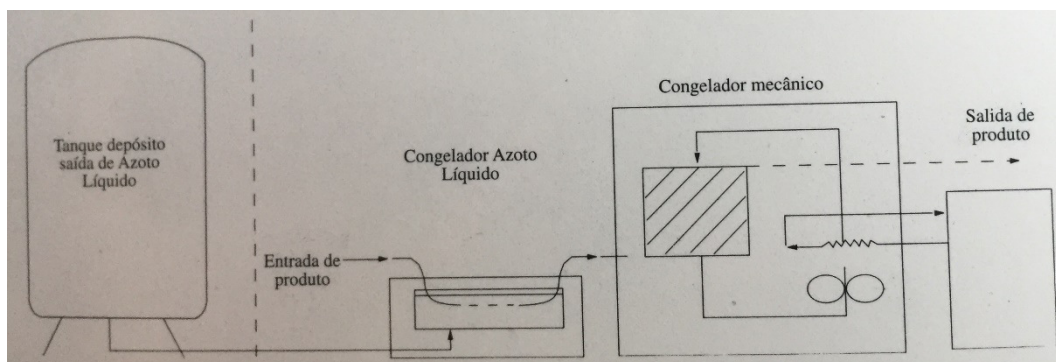


Figura 16 - Representação esquemática do processo de congelamento criomecânico

[Fonte: Praxair,2004]

Assim, a congelamento criomecânica permite, com um investimento menor, complementar as instalações existentes, cujas necessidades atuais são muito superiores às suas capacidades. Tudo isto se consegue sem ter de ampliar a instalação, devido ao menor espaço ocupado pelos equipamentos criogénicos.

4.2 Vidragem

A vidragem é um processo bastante utilizado na indústria de peixe, uma vez que tem como objetivo a formação de uma camada isolante protetora, entre o produto e o meio ambiente, impedindo a desidratação (perda de água da massa corporal do pescado) e a oxidação (reação química do pescado com o oxigénio da atmosfera da câmara), durante o processo de armazenamento em frio. [33]

Esta camada isolante protetora é formada, quando produto sai do túnel de congelamento a uma temperatura na sua superfície que chega aos $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou -40°C , através de pulverização, passagem ou mergulhado em água de vidragem que se encontra a temperaturas entre $0,5^{\circ}\text{C}$ e 1°C . Esta água de vidragem após o contacto com o produto ultracongelado, irá formar uma camada de gelo, gerando essa camada protetora. [33]

No entanto, este processo faz com que o peso do produto seja superior uma vez que este absorve esta quantidade de água, e o consumidor final não pode estar a pagar água de vidragem ao preço do produto. Para que tal não suceda, a legislação (Decreto-Lei nº 37/2004) estabelece para os produtos vidrados um “peso líquido” (peso do produto onde está incluído a água de vidragem) e um “peso líquido escorrido” (peso do produto com dedução da água de vidragem), sendo este último o que deve ser faturado ao consumidor. [33]

Para se determinar o valor de cada um destes itens, pesa-se o produto vidrado à saída do congelador (P1). Elimina-se a vidragem do produto passando-o por uma pulverização de água sem o descongelar, eliminando apenas a camada de gelo da vidragem, deixa-se escorrer e determina-se novamente o peso (P2). [33]

$$\% \text{ Vidragem} = \frac{(P1 - P2)}{P1} \times 100 \quad (30)$$

A percentagem de vidragem é calculada por:

A vidragem pode variar entre os 2% e 20%, pois a quantidade de gelo acumulado pelo processo de vidragem depende de vários seguintes fatores, tais como tempo da vidragem, número de vidragens, temperatura do peixe, temperatura da água, tamanho e forma do produto.

E a água a utilizar deve ser potável e incluir por vezes alguns componentes proteicos e químicos, bem identificados e recomendados pelos normativos europeus e internacionais. [43]

4.3 Golpe de Frio

A congelação criogénica, para produzir um golpe de frio, tem como objetivo o endurecimento superficial do alimento, o que facilita a manipulação mecânica durante o processo de embalamento, uma vez que a sua rigidez melhora os tempos de produção. A principal vantagem deste processo ocorre nos produtos alimentares pré-cozinhados, ou na indústria de produtos cárnicos. [21]

Na indústria cárnica, utiliza-se o processo de golpe de frio com azoto ou dióxido de carbono em peças de carne para obter o endurecimento (*crusting*) ou congelação superficial das mesmas. Este processo permite, evitar perdas de água, especialmente quando a carne foi injetada previamente com salmouras. A congelação superficial das peças forma uma camada protetora que controla o crescimento microbiano e trava as perdas de água por gotejamento. Por conseguinte, depois de termo-formadas, estas peças não apresentam água dentro da embalagem.

Facilita também no processo de corte das peças de carne, melhorando a filetagem e diminuindo assim as perdas resultantes de cortes defeituosos. [21]

Tem ainda como outras vantagens:

- Não modifica a carne a nível organolético (o sistema tradicional congela as peças de carne no centro).
- Agiliza a preparação das peças, não sendo necessário guardá-las várias horas em câmaras antes de as cortar.
- Maior flexibilidade e produtividade.
- Os cortes são mais limpos.
- Aumenta a vida útil das lâminas.

Nos alimentos cozidos ou pré-cozinhados, as reduções térmicas que iniciam a altos valores de temperatura (80/70 °C) passam por uma fase temporária em que o crescimento microbiano é superior, até chegar à temperatura de congelação.

Os alimentos têm um meio de desenvolvimento ideal para certos microrganismos. De um modo geral, a temperaturas inferiores a 3 ou 4°C, os microrganismos encontram-se numa fase de letargia e ficam de certa forma inibidos do seu crescimento. No entanto, a temperaturas entre 5 e 80 ° C, existem várias famílias de microrganismos que atingem condições favoráveis ao seu crescimento.

Esse facto, faz com que o abatimento de temperatura de um alimento pré-cozinhado seja um fator chave para garantir a qualidade microbiana e organolética do produto. Quanto mais rápida for atingida a temperatura de armazenamento, menor será a carga microbiana a que produto fica exposto e, portanto, melhor a sua qualidade final. [21]

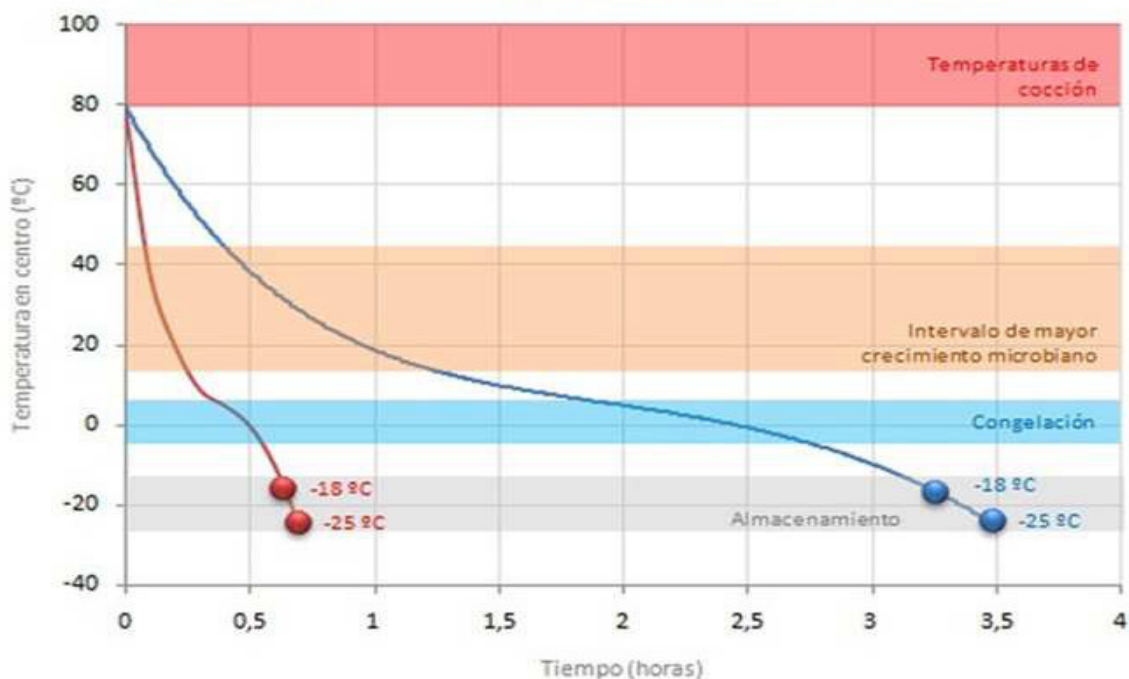


Figura 17 - Gráfico da evolução da temperatura no centro de pré-cozinhados por método de congelação convencional e por método criogénico

[Fonte: Praxair, 2017]

Conforme é possível verificar pelo gráfico da figura 17, os processos criogénicos representados a vermelho, permitem reduzir substancialmente os tempos necessários para abater termicamente um alimento, comparativamente com os processos de congelação convencionais representados a azul.

4.4 Pressurização dos recipientes de bebidas

O desenvolvimento da tecnologia de distribuição e doseamento de azoto líquido (LIN) e dióxido de carbono líquido (LCO₂), permitiu que a indústria de bebidas passasse a utilizar um sistema criogénico no seu processo de engarrafamento.

A transição das garrafas de vidro para garrafas em PET para produtos não carbonatados tais como bebidas energéticas, sumos e água engarrafada foi dramático na última década. Isto porque, o uso de garrafas PET foi parcialmente potenciado pela utilização da tecnologia de azoto líquido que transmite para o recipiente benefícios tanto a nível funcional, como sensorial e ajudando a indústria engarrafadora a baixar os seus custos em material e distribuição.

Mas uma das principais falhas do PET é que este pode ser um pouco frágil e suscetível a ficar amolgado. Para combater isso, o azoto líquido é usado para aumentar a pressão interna na garrafa PET fechada, adicionando rigidez ao recipiente. Uma vez que a garrafa é imediatamente tapada, a pequena quantidade de LIN rapidamente se infiltra e passa a gás. Isto cria uma pressão interna positiva dentro do recipiente fechado. Com o equipamento de enchimento da bebida devidamente calibrado, a quantidade de doseamento de LIN pode ser dimensionada para o respectivo recipiente, em função da velocidade da linha e as horas de operação. [34]

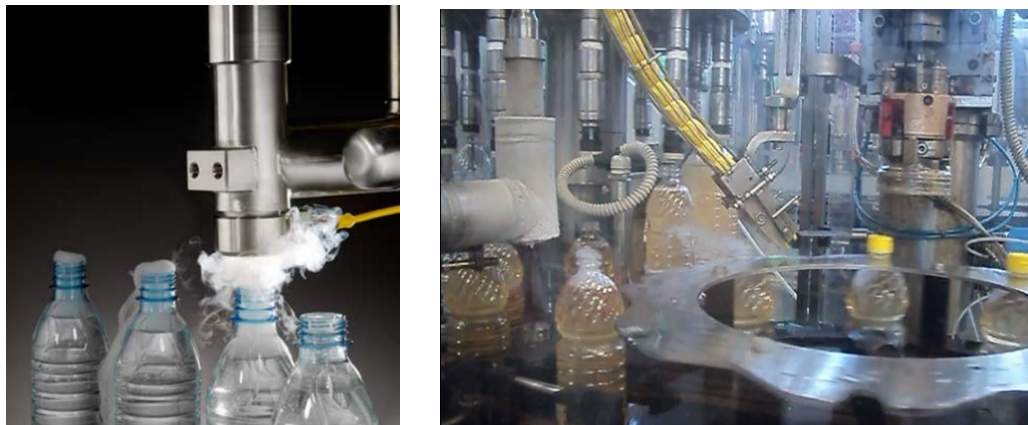


Figura 18 - Pressurização de garrafas PET com gotículas de azoto líquido

[Fonte: Praxair, sem data]

A rigidez da garrafa fornecida pelas gotículas de LIN pode ajudar a reduzir os custos ao permitir que se utilize um calibre mais leve, e seja menor o recurso a materiais poliméricos caros. Além disso, a rigidez da garrafa permite que estas possam ser empilhadas em cima umas das outras sem ocorrer o risco de estas ficarem danificadas. Contribuindo assim para uma diminuição do espaço de armazenamento, custos de transporte e exposição.

Para além de oferecerem uma maior rigidez às garrafas ou latas, as gotículas de LIN geram uma atmosfera inerte no topo do recipiente, que ajuda a preservar a qualidade e evita degradação do produto. O som "pfft" do ar a ser libertado, após a abertura do recipiente transmite uma sensação de qualidade e frescura para o consumidor. [34]

4.5 Arrefecimento de Massas

Na indústria panificadora é necessário frequentemente uma produção rápida de uma grande quantidade de certos produtos. Isso pode ser alcançado através do armazenamento de massas

completamente amassadas, sendo estas armazenadas em frio para evitar o início da fermentação antes do tempo e para que não ocorram outras modificações indesejáveis.

Para se garantir esse efeito de arrefecimento imediato, logo no processo de amassadura é adicionado gelo de água na quantidade correspondente, para que cumpra com a quantidade estipulada da própria massa. Isto faz com que o amassado comece com menos quantidade de água líquida que a necessária, para efetuar um amassado correto, com a consequente perda de qualidade, que se acentua conforme cresce a quantidade de gelo de água adicionado.

A adição à amassadora da quantidade adequada de LCO₂ na forma de neve carbónica, permite obter um controlo exato da temperatura final da massa, independentemente das condições ambientais. [21]



Figura 19 - Arrefecimento de massas em amassadora com injeção de CO₂ líquido

[Fonte: Praxair, sem data]

A injeção de LCO₂ permite eliminar a adição de gelo de água à amassadora. O gelo tem que se fundir para contribuir com a capacidade frigorífica da sua mudança de estado e só posteriormente a água resultante participa no amassado.

A neve carbónica ao sublimar, não deixa nenhum resíduo e mistura-se de forma muito eficiente com a massa, absorvendo o seu calor de forma imediata, melhorando o tempo e a qualidade do amassado. [21]

4.6 Transportes Refrigerados

O transporte de produtos alimentares, quer congelados quer refrigerados, até chegar ao destinatário final ou consumidor, requer o máximo de controlo relativamente às temperaturas, quer de armazenamento no produtor, durante o transporte até um entreposto de distribuição de produtos alimentares, e até chegar ao consumidor. A cadeia de frio tem que funcionar de forma segura de maneira a conseguir conservar os produtos alimentares de acordo com as suas características iniciais, sendo muito importante que a cadeia de frio não seja quebrada, que não existam diferenças significativas de temperatura entre transporte, armazenamento e até mesmo na conservação feita pelo consumidor final em sua casa. [35]

Para isso em alternativa aos sistemas convencionais de furgões com sistema de refrigeração, existe um método que se baseia no transporte dos produtos em tanques isolados com placas eutéticas do qual se faz o enchimento *on site* de neve carbónica (gelo seco) conseguindo manter durante transporte as condições de temperatura necessária para os produtos.

Estes tanques móveis e isolados, ou *thermocontainers for transport* (TKT) estão equipados no topo com as placas de arrefecimento cheias com CO₂ líquido que após enchimento solidifica e forma a neve carbónica com uma densidade muito alta. Até 22 kg de gelo seco garantem uma corrente de frio ininterrupta para produtos refrigerados (0°C a 4 °C) e congelados (-18° C a -20 °C).

O gelo seco tem uma temperatura de -78 ° C, e o frio é libertado por sublimação (passagem do estado sólido para o estado gasoso). O arrefecimento é muito rápido e entregue imediatamente ao tanque isolado.

As placas eutéticas estão disponíveis para alimentos refrigerados, e alimentos congelados. As placas eutéticas são feitas de um plástico polietileno que é fabricado numa única peça, sendo altamente resistente ao frio e à sujidade dos alimentos e resistente ao impacto.

Para o enchimento, as placas eutéticas são inseridas numa estação de enchimento, instalada no cliente do qual este de forma simples e segura procede ao enchimento da placa segundo os parâmetros inseridos. A quantidade de enchimento pode ser doseada com precisão usando um controle baseado em parâmetros específicos do produto e da duração de transporte. [36]



Figura 20 -Depósito de transporte isolado arrefecido por placas eutéticas com neve carbónica
[Fonte: TKT, sem data]

5 Produtos alimentares propícios a processos criogénicos

A congelação de produtos alimentares é um processo complexo, uma vez que todos os materiais alimentares contêm solutos como carboidratos, sais, corantes e outros compostos que afetam seu comportamento durante a congelação. A maioria dos produtos alimentícios contêm células animais e / ou vegetais formando tecidos biológicos. O teor de água destes tecidos está dentro das células (fluido intracelular) ou ao redor destas (fluido extracelular). Como a menor concentração de solutos são encontrados nos fluidos extracelulares, é nestes onde ocorre a formação dos primeiros cristais de gelo. Durante um congelamento lento, haverá tempo para a célula ir perdendo água por difusão e essa água irá congelar na superfície dos cristais formados. [38]

Atualmente, há vários tipos de alimentos que são congelados por métodos criogénicos, mas por diferentes razões:

- Em primeiro lugar, se o produto for de valor acrescentado, o aumento relativo ao custo de processamento do produto, vai ter pouco impacto no preço final, e a sua qualidade é garantida;
- Em segundo lugar, se o produto tiver um teor de água extremamente elevado, a qualidade dos produtos congelados por criogenia, geralmente será superior ao método convencional de ar forçado, porque as perdas de desidratação serão minimizadas. Por exemplo, fatias de melão, frutos silvestres e frutas cítricas têm um teor de água tão elevado que o congelamento convencional danifica significativamente a sua estrutura celular.
- E finalmente, se o alimento é altamente perecível, este deve ser congelado o mais rápido possível para manter a sua frescura. Os sistemas de congelação criogénica geralmente são o único meio para alcançar essas taxas de congelamento rápido. De seguida, exemplifica-se com alguns produtos dos vários subsectores da indústria alimentar, as vantagens na utilização dos criogénicos no processamento e acondicionamento dos produtos.

Grande parte da indústria de processamento de camarão utiliza métodos de congelação criogénica, pois o camarão é visto como um alimento caro. Neste processo, o camarão é primeiro pré-arrefecido com os vapores de azoto muito frio e depois imerso ou pulverizado

com azoto líquido. Resultando num produto de maior qualidade, a um alimento altamente perecível. Além disso, a redução da perda de peso por desidratação favorece a aplicação dos processos de congelação criogénica.

As fatias de tomate têm um teor de água extremamente elevado e às vezes são vendidos e exportados como um produto *premium*. A congelação criogénica é utilizada neste caso, porque fornece boa textura, sabor, e cor vermelha no produto quando descongelado. Para obter esses bons resultados, é necessário escolher uma variedade de tomate que não seja muito macio para congelar quando maduro, e um que congela para uma cor vermelha clara, obtendo depois a cor vermelha original após a descongelação.

Na indústria de panificação, o azoto líquido é o meio perfeito para congelar produtos delicados, como *muffins*, biscoitos e bolos. Os vapores muito frios de azoto também são usados para refrigerar alimentos cozidos. Os cookies que levam cerca de 15 minutos para arrefecer de 55°C até 25 °C com métodos convencionais, estes podem ser arrefecidos num minuto no interior de um túnel de azoto líquido. Os requisitos de espaço também são reduzidos, uma vez que o produto não tem de percorrer maiores distâncias nas esteiras rolantes para que tenha tempo de arrefecer antes de ser embalado.

Os sistemas criogénicos, refrigeram ou congelam uma grande variedade de produtos relacionados com padaria e *snacks*, desde bolos e biscoitos até massa de pão e *bagels*. Através da utilização destes sistemas, o tempo de produção é reduzido até - 50% ou mais. Esta é uma vantagem para os produtos que exigem várias etapas de processamento, incluindo produtos de várias camadas, revestidos e congelados, que devem ser preparados rapidamente para facilitar a próxima etapa de processamento.

No mercado de frutas congeladas, a aceitação do consumidor é influenciada negativamente em função da má textura, a descoloração e perda de gotejamento. Todas estas três medidas de qualidade foram melhoradas significativamente pelas técnicas criogénicas devido à menor formação de microcristais de gelo.

As empadas de carne são particularmente difíceis de congelar através de métodos convencionais devido à sua fragilidade. O uso de técnicas de pulverização criogénica tem sido usado para superar esse problema. Além disso, reduz significativamente a descoloração do produto e a perda de peso. [37]

6 Instalação e Funcionamento de Equipamentos Criogénicos

Criogénicos

6.1 Descrição de uma Instalação criogénica

Os principais componentes dos sistemas de fornecimento criogénicos são projetados e selecionados com base no seu volume, pressão pretendida, nível de pureza, taxa de caudal e padrão de funcionamento. A figura 21, ilustra os principais componentes duma instalação criogénica, sendo estes:

- Depósito de armazenamento criogénico
- Tubagem de ligação entre o depósito e o equipamento criogénico
- Equipamento criogénico
- Central de deteção dos níveis de oxigénio no interior da sala do equipamento.

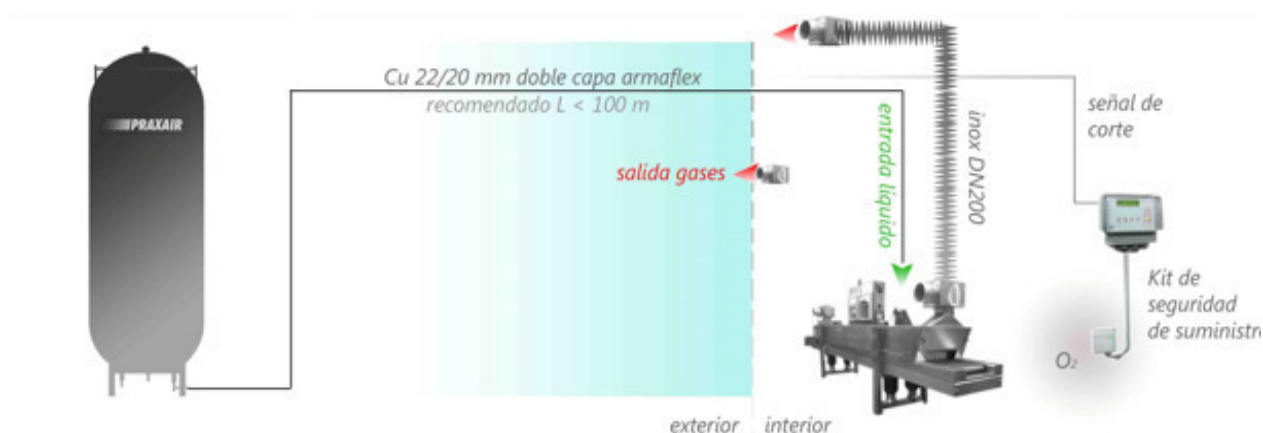


Figura 21 - Representação dos principais componentes de uma instalação de congelação criogénica

[Fonte: Praxair, 2010]

O depósito criogénico está destinado ao armazenamento de gases liquefeitos ultrafrios, apresentam a vantagem de armazenar grandes quantidades de liquido num volume compacto e uma pressão estável. São em geral do tipo vertical e forma cilíndrico.

O depósito é composto por dois recipientes, o exterior fabricado de aço carbono e o interior num material temperado, devido as temperaturas de trabalho. O espaço entre estes dois recipientes é preenchido com perlite, material de isolamento granulado e isolado a vácuo. [39]

Para a instalação do depósito criogénico e os seus equipamentos auxiliares, bem como o resto dos componentes da instalação, deve-se considerar fundamentalmente os seguintes pontos:

- Escolha da localização mais adequada no exterior, dentro das instalações do proprietário.
- Necessidade de colocar uma laje de cimentação segundo os critérios do fornecedor e dimensões do tanque.
- Instalação mais próximo possível do local de uso.
- Fornecer a proteção da instalação por meio de uma vedação ao local adequada.
- Ter em consideração as rotas de evacuação dentro das instalações da propriedade.
- Considerar a acessibilidade dos veículos de abastecimento.
- A área a partir da qual a descarga de produto será feita deve estar isenta de produtos betuminosos.
- Que as distâncias de segurança sejam respeitadas.

Para aplicações criogénicas, como a congelação de alimentos, que requerem o fornecimento de líquido a baixa temperatura, o líquido é fornecido desde o depósito de armazenamento para o seu processo através de uma linha de tubagem em cobre e isolada normalmente por coquilhas de revestimento *Armaflex*. [39]

6.2 Equipamentos Criogénicos

Os equipamentos criogénicos são controlados por duas variáveis básicas que nos permitem adaptar muito facilmente o nosso processo aos picos ou quebras de produção. Estes criogénicos distinguem-se sobretudo para aplicações em processos contínuos, onde o produto atravessa um túnel de congelação sobre uma esteira a uma determinada velocidade, ou por processos descontínuos onde o processo criogénico ocorre de forma estática dentro de um armário criogénico.

Através da manipulação da temperatura de referência do equipamento e o tempo de contacto do produto com o líquido criogénico (tempo de permanência ou, por extensão, velocidade da esteira no caso de túneis criogénicos) podemos obter um intervalo produtivo amplo que dota o processo de uma grande versatilidade e capacidade de resposta. Esta característica choca com a limitação física de espaço das câmaras frigoríficas convencionais.

No anexo VI, apresenta-se um catálogo com os dados técnicos e características dos equipamentos criogénicos estudados neste capítulo.

6.2.1 Túnel de Congelação: Descrição, Funcionamento e Aproveitamento ideal

Os túneis criogénicos lineares são desenhados para trabalhar em contínuo com o objetivo principal de conseguir o consumo mínimo de líquido criogénico por unidade de produto refrigerado e/ou congelado.

Descrição do equipamento

O desenho do túnel em duas secções permite ao mecanismo de abertura baixar a parte inferior para a realização dos trabalhos de limpeza da cinta e do interior do túnel. Na zona de carga, no bastidor, está instalado um coletor de limpeza com uma válvula de três vias onde se liga uma toma de água de limpeza e outra de ar de secagem. Esta água de limpeza drenar-se-á pelas drenagens situadas na bandeja inferior.

No interior encontram-se os ventiladores de recirculação que mantêm uma corrente de azoto gás aumentando a velocidade de transferência de frio.

O caudal de azoto é controlado por uma válvula proporcional automática comandada por um controlador de temperatura do tipo PID. [40]

Princípio de funcionamento

Os produtos a congelar / refrigerar distribuem-se na zona de carga, sobre uma cinta em aço inoxidável com uma velocidade de avanço regulável que os introduz na zona de pré-arrefecimento do túnel onde o produto arrefece em contacto com o azoto gasoso em contra corrente.

Seguidamente, o produto entra na zona de injeção, onde o azoto líquido é injetado em forma de duche na quantidade requerida para manter constante a temperatura de trabalho selecionada no túnel.

Em contacto com o produto, o azoto líquido gaseifica-se, extraindo do produto o seu calor sensível. A evaporação do líquido produz um gás frio e denso que circula na direção da

entrada do produto, produzindo uma troca de calor em contra corrente. A eficácia da zona de pré-arrefecimento é forçada pela recirculação do gás frio através de ventiladores.

Depois de passar pelo duche de azoto líquido, a superfície do produto está mais fria do que o centro. Para conseguir que o produto adquira uma temperatura uniforme, existe uma zona de equilíbrio onde se estabiliza a temperatura antes de que saia do túnel pela zona de descarga.

O azoto gás depois de ter pré arrefecido o produto, extrai-se pela zona de carga através de um extrator exterior e é ventilado para o fora do edifício. [40]

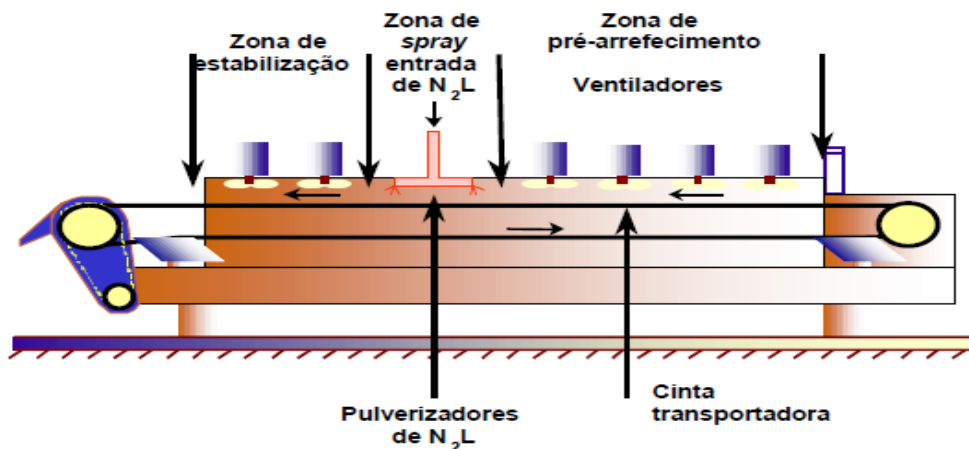


Figura 22 - Representação esquemática de um túnel linear de congelação

[Fonte: Praxair, 2010]

Recomendações para um aproveitamento ideal

De seguida, expõem-se uma série de conselhos úteis no que diz respeito aos parâmetros de trabalho e ao modo de operação, para otimizar o rendimento dos túneis criogénicos e, como consequência, reduzir o consumo de azoto. [40]

- A temperatura de trabalho, assim como a velocidade de avanço da cinta do túnel (tempo de residência do produto no mesmo) devem estar perfeitamente ajustados às necessidades de produção.
- O sistema de extração dos gases no túnel deve regular-se adequadamente de tal forma que se evite a entrada de ar da sala no interior do mesmo, assim como a saída excessiva de azoto gás pelos seus extremos. Desta forma, o azoto gás permanece o maior tempo possível dentro do túnel aproveitando-se ao máximo a sua capacidade frigorífica.

- É recomendável que durante o funcionamento do túnel a cinta vá sempre completamente carregada com produto com a finalidade de aproveitar ao máximo a sua capacidade produtiva. O funcionamento do túnel com a cinta desocupada penaliza os consumos específicos de azoto (kg de LIN / kg de produto congelado / refrigerado).
- Uma vez que o túnel está a funcionar, a produção diária deve ser de forma contínua e sem interrupções. A paragem do mesmo provoca perdas de frigorias que obriga a compensar - se com uma maior injeção de azoto ao reiniciar a produção.

6.2.2 Armário de congelação: Descrição, Funcionamento e Aproveitamento ideal

Estes equipamentos são concebidos para a refrigeração ou congelação controlada de produções descontinuas. Caracterizam-se por apresentar um processo de trabalho muito simples, proporcionando um elevado rendimento.

O produto é colocado em carros com prateleiras e introduzido no armário, onde entra em contacto com o N₂ ou o CO₂. Os Ventiladores fazem a recirculação dos gases frios para obter uma refrigeração/congelação homogénea do produto.

Todo o equipamento é construído em aço inoxidável, com soldaduras em atmosfera inerte. As paredes estão isoladas com poliuretano injetado à pressão proporcionando ao equipamento um alto grau de isolamento que minimiza as perdas de frio.

No interior situam-se os equipamentos de injeção e circulação do agente criogénico. O equipamento de circulação é formado por ventiladores acionados por motores eléctricos situados no exterior da câmara fria proporcionando uma maior fiabilidade. A porta, como medida de segurança, dispõe de um sensor fim de curso que impede o funcionamento do armário quando a porta está aberta. [41]

Princípio de funcionamento

Os produtos a congelar são distribuídos pelas bandejas do carro e este é introduzido no armário. Uma vez seleccionada a temperatura de trabalho e o tempo de residência do produto pressiona-se o botão de Marcha com o produto já dentro do armário. A electroválvula de injeção do azoto abrirá conforme a cadência marcada pelo controlador impulso / pausa evitando a acumulação de azoto líquido no fundo do armário.

Esta cadência permanecerá enquanto a temperatura do interior da cabina medida por uma sonda do tipo PT - 100 detete que o gás no interior do armário se encontra a uma temperatura inferior à seleccionada como temperatura de trabalho. Nesse momento detém-se a cadência impulso/pausa, a qual se ativará enquanto a PT-100 detete uma temperatura mais alta à programada no *setpoint* do controlador.

A injeção do azoto líquido é atomizada sobre os ventiladores, situados numa lateral do armário, transferindo-se dessa forma o frio para o produto.

Em contacto com o produto, o líquido pulverizado evapora, extraíndo do produto o calor necessário. O produto é então refrigerado ou congelado num curto espaço de tempo. A evaporação do líquido produz um gás frio e denso que circula pelo movimento criado pelos ventiladores aumentando a capacidade de arrefecimento.

O azoto gás é extraído depois de ter arrefecido o produto através de uma conduta ventando-se no exterior do edifício.

Finalmente, é conveniente esperar cerca de 30 segundos desde que acaba o ciclo até abrir o armário para que se vaporize o azoto líquido que possa ficar dentro do armário. [41]

Recomendações para um aproveitamento ideal

Em seguida, expõem-se uma série de conselhos úteis para otimizar o rendimento dos armários criogénicos e, como consequência, reduzir o consumo de agente criogénico. [41]

- Os parâmetros de Temperatura e Tempo de Acondicionamento do Programa devem estar perfeitamente ajustados para cada produto com o objetivo de que se forneça unicamente o frio necessário em cada caso (refrigeração ou congelação) e durante o tempo imprescindível para tal.
- Aproveitamento ótimo da capacidade de cada cabina. É recomendável que em cada ciclo os carros estejam com todas as bandejas ocupadas com o produto com a finalidade de aproveitar ao máximo a sua capacidade produtiva.
- Uma vez que os armários estão a funcionar deve-se evitar qualquer interrupção dos ciclos de trabalho. A paragem dos ciclos e abertura das portas provoca perdas de frio que há que compensar com um maior consumo de azoto ou dióxido de carbono.

- Durante a produção, os tempos mortos entre ciclos devem ser mínimos, e a carga dos armários deve realizar-se no menor tempo possível. Desta forma evitam-se perdas de frio no interior dos armários e, portanto, o consumo de azoto necessário para arrefecê-los de novo.

7 Exemplo de um Estudo Criogénico

Neste capítulo pretende-se apresentar a adaptação de um estudo criogénico aplicado à congelação de frutos vermelhos, mais concretamente de framboesas e morangos. Com base nas características do produto a congelar e na capacidade produtiva pretendida, apresentam-se 2 possíveis cenários para uma instalação criogénica que irá complementar o processo de congelação clássico já existente, com o objetivo de aumentar a produção e qualidade da congelação dos produtos.

Considerou-se uma produção diária de 4000 kg por dia de produto, apenas num único turno de 8 horas. A temperatura do produto à entrada deste processo é de 4°C, e deve sair na forma de produto ultracongelado, ou seja, a temperaturas abaixo dos -18°C.

7.1 Cenário 1

No primeiro cenário, coloca-se o túnel criogénico linear à entrada do processo de congelação, e depois o produto segue para o túnel espiral mecânico.

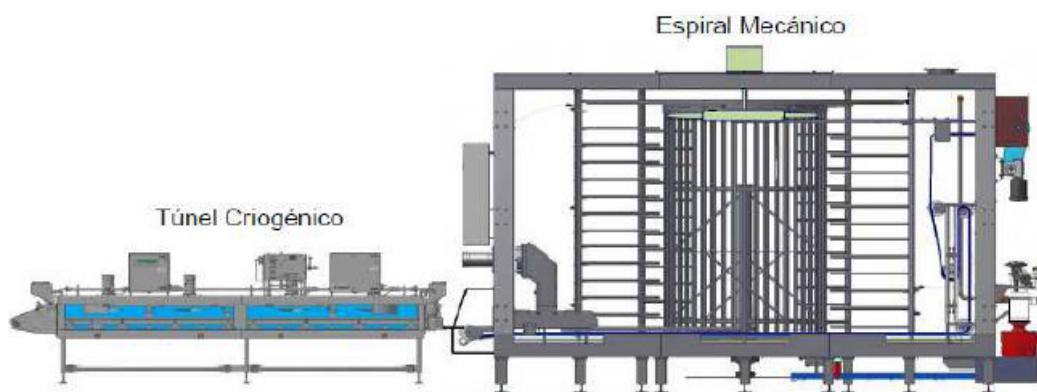


Figura 23 - Cenário 1 - Túnel criogénico à entrada e depois túnel espiral mecânico

[Fonte: Praxair, 2017]

Neste cenário, pretende-se que o produto aproveite as frigorias produzidas no túnel criogénico para que este passe rapidamente o seu ponto de congelação, isto é, a mudança de fase do teor de água do produto. Pois, é neste ponto que o produto necessita de absorver o máximo da capacidade frigorífica fornecida pelo azoto líquido, para a formação homogénea dos cristais de gelo. Assim obtém-se à saída do túnel criogénico o produto congelado com temperaturas médias de -12°C, do qual seguirá para a estabilização linear da temperatura no túnel mecânico

até ao estado de ultracongelamento a -20°C . Com esta opção obtém-se um incremento adicional de qualidade ao produto, minimizando a sua desidratação e melhorando o rendimento do processo.

Tabela 12 - Especificações do Produto e do Processo de congelamento do cenário 1

ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO CENÁRIO 1 (Framboesas e Morangos)		
C1	Calor Específico antes da congelação	4,0 kJ /kg
C2	Calor Específico após congelação	1,88 kJ /kg
L	Calor latente de congelação	306 kJ/ kg
m	Taxa de produção	500 kg / h
T1	Temperatura à entrada do túnel criogénico	4°C
T2	Temperatura do ponto de congelação	-1°C
T3	Temperatura à saída do túnel de congelação criogénico	-12°C

Com base nas temperaturas de entrada e saída do produto no túnel criogénico, podemos determinar a resistência térmica do produto que o túnel necessita de garantir, à taxa de produção fixada nos 500kg/h:

$$\dot{Q} = m \times C_1 (T_1 - T_2) + m \times L + m \times C_2 (T_2 - T_3) \quad (31)$$

$$\dot{Q} = \frac{500}{3600} \times 4,0 (4 - (-1)) + \frac{500}{3600} \times 306 + \frac{500}{3600} \times 1,88((-1) - (-12)) = 48,15 \text{ kW} \quad (32)$$

7.2 Cenário 2

No segundo caso, colocando o túnel criogénico à saída do túnel mecânico, a única vantagem em relação ao caso anterior é o menor consumo de azoto líquido, uma vez que o produto à entrada do túnel criogénico já passou o ponto de congelamento no interior do túnel mecânico, no entanto como a congelação é mais lenta os cristais de gelo formados vão ser maiores existindo a possibilidade de se quebrarem durante a cristalização, e fazendo com que o produto sofra maior desidratação e a qualidade final obtida sejam ligeiramente inferior.

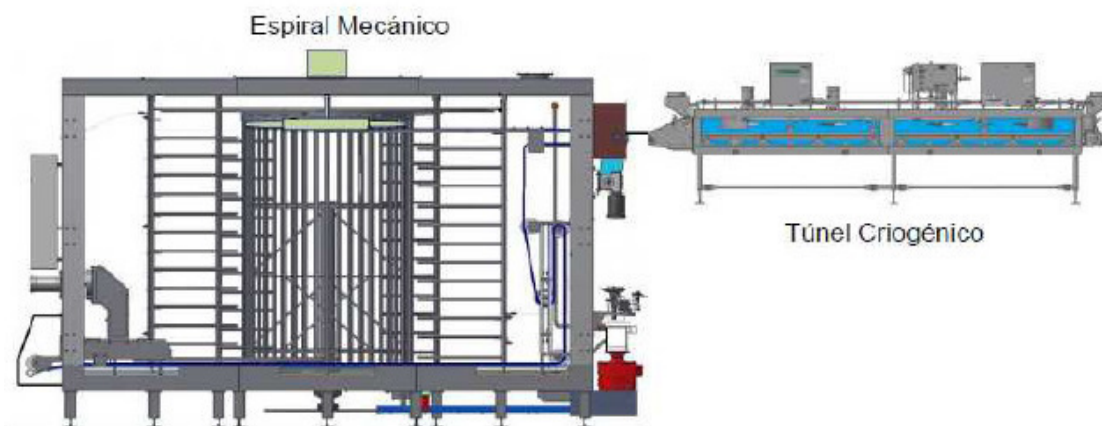


Figura 24 - Cenário 1 - Túnel criogénico à saída do túnel espiral mecânico

[Fonte: Praxair, 2017]

Uma vez que neste caso o produto já vem congelado do túnel mecânico, a uma temperatura média de -4°C à saída deste, a carga térmica introduzida pelo produto no túnel criogénico será inferior ao cenário 1, assim o túnel criogénico só precisa de fornecer a potência frigorífica necessária para que os morangos e framboesas atinjam o estado de ultracongelção, a uma temperatura de -20°C à saída do túnel criogénico.

Tabela 13 - - Especificações do Produto e do Processo de congelção do cenário 2

ESPECIFICAÇÕES DO PRODUTO CENÁRIO 2 (Framboesas e Morangos)		
C2	Calor Específico após congelção	1,88 kJ /kg
L	Calor latente de congelção	306 kJ/ kg
m	Taxa de Produção	500 kg / h
T1	Temperatura à entrada do túnel Criogénico	-4°C
T3	Temperatura à saída do túnel de congelção	-20°C

$$\dot{Q} = m \times L + m \times C_2(T_3 - T_1) \quad (33)$$

$$\dot{Q} = \frac{500}{3600} \times 306 + \frac{500}{3600} \times 1,88((-20) - (-4)) = 38,3 \text{ kW} \quad (34)$$

7.3 Estudo térmico

O estudo térmico tem por finalidade estabelecer uma estimativa teórica do consumo específico de gás liquefeito baseado nas características descritas do produto e processo. Entende-se por consumo específico os quilos de produto criogénico necessários para poder processar (entendendo como processar o abater, congelar, vidrar ou endurecer superficialmente) um quilo de produto alimentar determinado em condições ótimas de trabalho.

Para se poder estimar o consumo de fluido no cenário 1, neste caso de azoto, partir-se-á de uma potência frigorífica do azoto de 50 kW de forma a introduzir um ligeiro coeficiente de segurança ao previamente calculado. Recorrendo à análise termodinâmica do diagrama de Mollier (P-h) do azoto (Anexo V), sabe-se que a mudança de estado do azoto no estado líquido para vapor ocorre dentro do túnel à pressão atmosférica (pressão constante) e considera-se que o vapor deixa de entrar em contacto com o produto a uma temperatura de -70°C, e é efetuada a sua extração.

Com estes dados, e através do diagrama de Mollier, consegue-se retirar as entalpias dos pontos que caracterizam o processo de congelação criogénica:

$$h_1 = h_{\text{liquido}}(-196^\circ\text{C}; 101,3 \text{ kPa}) \cong 80 \text{ kJ/kg} \quad (35)$$

$$h_2 = h_{\text{vapor}}(-70^\circ\text{C})(-70^\circ\text{C}; 101,3 \text{ kPa}) \cong 425 \text{ kJ/kg} \quad (36)$$

$$Q = \dot{m}_{N_2}(h_2 - h_1) \leftrightarrow 50 = \dot{m}_{N_2}(425 - 80) \leftrightarrow \dot{m}_{N_2} = 0,144 \text{ kg/s} = 521,7 \text{ kg/h} \quad (37)$$

Considerando uma eficiência global térmica deste processo de congelação de 95 %:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ real } 1} = \frac{521,7}{0,95} = 549,19 \text{ kg/h} \quad (38)$$

Verifica-se assim, que neste cenário para se congelar 500 kg de framboesas e morangos numa hora, é necessário cerca de 550 kg de azoto líquido.

Procedendo ao mesmo raciocínio para o cenário 2, pretende-se confirmar se o consumo de azoto é inferior, uma vez que o produto ultrapassou o ponto de congelação antes de entrar no túnel criogénico. Considera-se uma carga térmica introduzida de 40 kW, também

introduzindo o ligeiro coeficiente de segurança ao valor calculado em (33), e considera-se também que as condições de temperaturas de trabalho no interior do túnel criogénico se mantêm as mesmas do cenário 1:

$$Q = \dot{m}_{N_2}(h_2 - h_1) \leftrightarrow 40 = \dot{m}_{N_2}(425 - 80) \leftrightarrow \dot{m}_{N_2} = 0,115 \text{ kg/s} = 417,4 \text{ kg/h} \quad (39)$$

Considerando a mesma eficiência de 95% para o processo de congelação temos, temos um consumo de azoto no cenário 2 de:

$$\dot{m}_{N_2 \text{ real } 2} = \frac{417,4}{0,95} = 439,35 \text{ kg/h} \quad (40)$$

Neste cenário 2, confirma-se que o consumo de azoto será inferior, uma vez que para se congelar 500 kg de framboesas e morangos por hora, apenas seria necessário cerca de 440 kg de azoto líquido.

Supondo um ambiente ótimo de trabalho e as especificações de produto anteriormente descritas, e a análise técnica das capacidades caloríficas de cada um dos cenários apresentados, determina-se o consumo específico de referência de azoto:

Cenário 1

$$CE_{\text{cenário } 1} = \frac{549,19}{500} \frac{\text{kg N}_2/\text{h}}{\text{kg produto}/\text{h}} = 1,1 \text{ kg N}_2 / \text{kg produto} \quad (41)$$

Cenário 2

$$CE_{\text{cenário } 2} = \frac{439,35}{500} \frac{\text{kg N}_2/\text{h}}{\text{kg produto}/\text{h}} = 0,87 \text{ kg N}_2 / \text{kg produto} \quad (42)$$

7.4 Seleção do Equipamento

Na tabela 14 tem-se a seleção do equipamento mais adequado para aplicação neste processo contínuo. A seleção deste túnel fez-se através do catálogo do anexo IV, e seguindo os critérios determinados nos estudos produtivo e térmico anteriormente descritos:

Tabela 14 - Características do Túnel Criogénico Cryofood 1,2X9

[Fonte: Praxair, 2010]

Características do Equipamento - Túnel Cryofood 1,2X9	
Modelo do Túnel	Cryofood 1,2X9
Altura	2,2 m
Largura	1,8 m
Comprimento	10,25 m
Peso	6010 kg
Potência Elétrica	12 kW
Comprimento útil	9 m
Largura útil	1,2 m
Capacidade Produtiva média	500 – 750 Kg/h
Nº de ventiladores	12

7.5 Estudo Económico

Neste estudo pretende-se determinar o impacto económico no produto, das duas soluções propostas.

Uma vez que se congela 4 toneladas de produto diariamente, isto no primeiro cenário resulta num consumo de 4393 kg de azoto liquido por dia. Segundo as principais industrias gasistas, o custo do azoto a nível mundial não varia muito significativamente, podendo adoptar-se o valor médio do custo para o consumo de azoto de 0,10 €/kg (100€/ton.). Com base nestes valores, obtém-se assim um custo diário associado ao consumo de azoto de 439,36 €, isto traduz-se num custo anual de 126.535,50 €, considerando 288 dias laborais por ano.

Para esta análise não foram considerados os cargos relativos ao custo do transporte, o aluguer do depósito de armazenamento de azoto liquido, uma vez que estes são parâmetros muito variáveis consoante a localização da instalação e da capacidade do reservatório instalado.

Efetuada os mesmos cálculos para o cenário 2, uma vez que este tem um consumo específico de azoto menor, tem-se um consumo de diário de 3514 kg de azoto líquido. Considerando o mesmo preço do azoto, o custo diário será de 351,48 €, o que equivale a um custo anual de 101.228,40 €, isto representa uma diferença anual de 25.307,09€ que se traduz numa poupança de cerca de 20 % do consumo de azoto em relação ao cenário 1.

Apesar do custo considerável associado ao consumo de azoto, é importante não esquecer o valor das possíveis perdas referentes à diminuição do teor de água presente no produto. De facto, como foi descrito, este tipo de produto quando sujeito a uma congelação mecânica clássica tem tendência a perder mais teor de água do que quando congelado no meio criogénico. Esta perda de água e consequente perda de peso tem um reflexo imediato no que respeita aos lucros do retalhista.

Em geral, a média do peso de um morango ou framboesa é de 20g, no entanto em condições de temperatura ambiente, 85 a 90% do seu peso representa conteúdo de água, e estima-se que através da congelação criogénica este sofra uma desidratação da ordem dos 0,5 a 3 % do peso inicial, na congelação convencional este valor pode chegar aos 50 % do peso inicial.

Tendo em conta que uma grande superfície comercial, vende este tipo de produto ultracongelado a um preço entre os 8 a 10 € / kg. Considerando para este estudo que o preço médio de venda ao consumidor é de 8 € / kg, e que, regra geral, esta superfície comercial tem um lucro médio de 30%, significa que o retalhista vendeu este produto a 6,15 €/kg.

Para o cenário 1, do qual o ponto de congelação ocorre dentro do túnel criogénico considera-se uma desidratação média do produto na congelação ao longo do ano de cerca de 2%, isto representa que diariamente para termos 4000 kg de produto ultracongelado, registou-se uma desidratação de produto com um peso líquido de 80kg, que ao fim de um ano representa uma perda de peso neste processo que equivale a 23.040 kg. Isto traduz-se numa perda de faturação anual de 141.696,00 €.

Para o cenário 2, o ponto de congelação do produto dá-se no interior do túnel mecânico logo a taxa de desidratação do produto será maior comparativamente ao primeiro cenário, assim considera-se que o produto entre o processo mecânico e criogénico perca em média 5 % do peso inicial. Assim é necessário processar cerca de 4200 kg de produto para se conseguir atingir os 4000 kg de produção diária de produto ultracongelado. Tendo um impacto anual de 354.461,50 € na faturação, equivalente aos 57.600 kg/ano de água perdida pelo produto.

Pode-se ainda determinar o incremento no valor económico do produto, para compensar o custo de azoto líquido. Para isso, somou-se à faturação total de produção do ano, o custo anual do azoto.

$$Produção\ anual = 4000 \times 288 = 1152000\ kg \quad (43)$$

$$Faturação\ anual = 1152000 \times 6,15\ € = 7.089.230,77€ \quad (44)$$

$$Faturação\ anual + custo\ azoto = 7.089.230,77€ + 126.535,50 = 7.215.766,24€ \quad (45)$$

$$Preço_{c/custo\ azoto} = \frac{7.215.766,24€}{1152000\ kg} = 6,26€ \quad (46)$$

Representando, em cada um dos cenários um incremento económico estimado no preço do produto de:

Tabela 15 - Impacto económico relativo ao custo e consumo de azoto

IMPACTO ECONÓMICO ESTIMADO PARA O AZOTO	
Cenário 1	+ 0,11 € / kg
Cenário 2	+ 0,087 € / kg

Com base nos resultados do impacto económico verificamos que o incremento no preço do produto pela utilização do azoto líquido, torna-se pouco considerável para o consumidor, isto porque, estamos presente um produto com um valor comercial alto (6,15 € / kg).

Com base na comparação a nível de consumo específico de azoto e do impacto económico, concluímos que o cenário 1 é o mais vantajoso para este caso, pois mesmo tendo um maior consumo de azoto, este permite que o produto sofra muito pouca desidratação, e a capacidade da congelação ultrarrápida no túnel criogénico é muito superior em termos de obtenção de um produto final com maior qualidade.

8 Conclusão

Do estudo efetuado pode concluir-se que as aplicações criogénicas aplicadas aos processos da indústria alimentar, são muito mais versáteis para além do simples poder de congelação, isto é, potenciam uma melhor conservação e qualidade do produto final, desde o momento da congelação em si propriamente dita, bem como fornece um melhor rendimento a processos auxiliares de conservação como é o caso da vidragem e do transporte dos produtos em termo contentores.

Foi possível também verificar, numa abordagem ao produto, todas as vantagens inerentes à utilização de processos criogénicos devido à elevada velocidade de congelação à velocidade de frente de frio do produto, que promove uma formação mais rápida e homogénea de pequenos cristais de gelo nas regiões intercelulares do produto alimentar, e que se reflete numa menor perda de teor de água do produto, garantindo a sua qualidade e mantendo as suas propriedades nutritivas iniciais.

Outro aspeto desta tendência é que à medida que a procura por alimentos de valor acrescentado aumenta, as questões de melhor rendimento, menor perda de água e qualidade final do produto tornam-se ainda mais críticas na exigência de aplicação desta forma alternativa de congelação.

Em termos económicos e financeiros para o operador económico, a congelação criogénica fornece grandes benefícios em termos da taxa de produto congelado (produtividade), e cumulativamente o menor investimento inicial de capital, a flexibilidade e a facilidade de limpeza são também fatores importantes de benefícios para o operador.

Relativamente aos sistemas mecânicos, estes exigem um maior investimento inicial de capital, mas podem fornecer benefícios financeiros a longo prazo, em comparação com as soluções criogénicas, uma vez que a necessidade de reposição do agente refrigerante é constante, e o preço dos criogénicos será atualizado periodicamente consoante as oscilações dos preços de mercado. Os avanços na tecnologia de congelação estão a diminuir a separação entre os sistemas mecânicos e criogénicos em determinada medida, mas os benefícios são limitados a um tipo específico de produto. Portanto, a criogenia deve continuar a ser uma opção viável no processamento e tratamento dos produtos alimentares pelo frio, porque oferece maior qualidade de conservação com menos desidratação.

Este é de facto um dos motivos que pode levar à escolha de um túnel criogénico em detrimento do túnel clássico, ou seja, faz realmente sentido a congelação criogénica em produtos de elevado valor comercial uma vez que as perdas de peso do produto afetam os resultados económicos do produtor. Porque o túnel clássico provoca uma perda de peso do produto superior ao túnel criogénico, no entanto como o volume de produto congelado deste tipo de túneis é de muitas toneladas por ano, traduz-se numa perda económica significativa.

A simplicidade dos equipamentos criogénicos também é vista como uma mais valia na indústria alimentar, isto porque estes permitem trabalhar com taxas de produção variáveis, em casos de picos de produção ou de expansão da empresa. Os fabricantes e fornecedores criogénicos como instalam os equipamentos em regime de aluguer, tem-se a vantagem de poder trocar de equipamento quando necessário sem ter o prejuízo do investimento inicial.

No que diz respeito à evolução e desenvolvimento desta tecnologia no futuro, é esperado que cresça uma tendência para menos e menos preparação dos alimentos quer em termos domésticos quer em termos do setor da restauração, através de um maior uso e consumo de alimentos pré-preparados ou pré-cozinhados. Uma visita, num futuro próximo, à cozinha de uma grande cadeia de restaurantes não encontrará um chefe de cozinha que prepara refeições do zero, mas sim trabalhadores menos qualificados que aquecem as carnes que foram marinadas e até pré-cozidas, saladas pré-embaladas e possivelmente inertizadas com azoto, ou sobremesas preparadas por uma padaria "gourmet" e possivelmente congeladas com azoto líquido ou dióxido de carbono.

9 Referências Bibliográficas

- [1] Schoolworkhelper Editorial Team, *Food Preservation: History, Methods, Types*, Última revisão do artigo, 2016
- [2] - Izildinha Botelho, em *A História da Conservação dos Alimentos*- disponível no site: Sociedade Digital.
- [3] Pereira, S. L. Qualidade comparada da congelação de géneros alimentícios por processo criogénico , por meio de azoto líquido e por anídrico carbónico. ISEL, 2011.
- [4] Altino Rocha, “Conservação dos produtos ao longo do tempo- Respostas da indústria de refrigeração”, publicação na Revista nº4 “Segurança e qualidade alimentar”, Maio de 2008
- [5] Portal da educação - Importância da Conservação de alimentos, página web <https://www.portaleducacao.com.br/conteudo/artigos/nutricao/importancia-da-conservacao-de-alimentos/31183> último acesso a 2 de Outubro de 2017.
- [6] QREN; COMPETE – Projeto Inovenergy Refrigeração/congelação de produtos alimentares por fileira agroindustrial, UBI , Dezembro de 2012
- [7] ORDÓÑEZ, J. A. - Tecnologia de Alimentos - Vol. 1 Componentes dos Alimentos e Processos, Editora Artmed, 2005
- [8] PINTO, J., & NEVES, R. - Análise de riscos no processamento alimentar. porto: Publindústria, Edições técnicas, 2010.
- [9] TOLEDO, R. T. *Fundamentals of Food Process Engineering*. New York: Chapman e Hall, p 398-436, 1991.
- [10] Koelet, P.C. *Industrial Refrigeration - Principles, Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc., 1992
- [11] FELLOWS, P.J. *Tecnologia do Processamento de Alimentos: princípios e práticas*. São Paulo: Artmed; 2006.
- [12] RAHMAN, M. S.; RUIZ, J. F. V. *Food Preservation by Freezing*. In: RAHMAN, M. S. *Handbook of Food Preservation*. Boca Raton: CRC Press, p. 635-657, 2007.

- [13] Khadatkar, R.M., Kumar, S. & Pattanayak, S.C. *Cryofreezing and cryofreezer* - Science Direct, 44, pp. 661-678. India. 2004.
- [14] Dinçer, I. (2003). *Refrigeration Systems and Applications*. England: Wiley.
- [15] POTTER, N. N. *Food Science*. New York: Academic, p.713, 1995
- [16] EFINERG, *Plano Sectorial de melhoria da eficiência energética em PME – Sector Agroalimentar*, Novembro de 2012
- [17] Carbon Trust Networks Project, *Food & Drink Industry Refrigeration Efficiency Initiative – Guidance 5 Site Guidance Topics*
- [18] *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Fruit and Vegetable Processing Industry* – Berkeley National Laboratory, Março 2008.
- [19] Bailey C A *Advanced cryogenics* (ed. London: Plenum Press) chap. 12
- [20] Frank Pobell, *Matter and Methods at Low Temperatures*, Publisher: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, chap. 1, 2007
- [21] Praxair España, *Gases en alimentacion_pt*, brochura disponível em <http://blogs.praxair.es/pt/blog/category/alimentacion/>, último acesso a 2 de Outubro de 2017.
- [22] LINDE AG, Brochura, *History and technological progress. Cryogenic air separation*, sem data.
- [23] ETSIA-UPM (2005). *Termodinamica aplicada*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid.
- [24] Kister, H. Z. *Distillation Design (vol. 1)*. United States of America: McGraw-Hill. 1992
- [25] Universal Industrial Gases, inc (UIG), Carbon Dioxide - CO₂ - Recovery & Liquefaction, acessado por página web <http://www.uigi.com/co2recovery.html>, último acesso a 2 de Outubro de 2017
- [26] Linde-Gas Inc, *Industrial Gases and Applications*, acessado por página web <http://www.fascinating-gases.com/en/nitrogen.html>, último acesso a 2 de Outubro de 2017

- [27] Gas World Magazine, *Introduction to ASU's*, pp. 52 brochura acessível através da página web, www.gasworld.com/specialfeatures, ultimo acesso a 2 de Outubro de 2017
- [28] 2nd Oxyfuel Combustion Conference - *Air Separation Unit: Flexibility & Energy Storage*, sem data.
- [29] EIGA - *Environmental Impacts of Air Separation Units*, IGC Doc 94/11/E. 2011
- [30] Linde. *Congelação e arrefecimento de Alimentos*, Rev.02, 2014
- [31] Praxair, *Recomendações de Segurança para utilização dos gases*, Praxair Technology Inc, 2017, Vila Franca de Xira, 2017
- [32] Praxair, *Congelação Criomecânica - dois sistemas complementares*, Cryofood nº52, Vila Franca de Xira, 1997
- [33] Ana R. M. Piteira - *Melhoria Contínua – Controlo e Sistematização de Processos Implementados numa Indústria de Produtos Congelados* - Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Alimentar com especialização em Qualidade e Segurança Alimentar, UL, 2016
- [34] Air Products, *LIN droplets deliver benefits to beverage bottlers*, United Kingdom 2014
- [35] Cláudio S. C. Fernandes, *A logística na cadeia de frio em Portugal: Transporte de Produtos Perecíveis Congelados*, - Trabalho final para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, ISEL 2015
- [36] TKT Germany, *Insulated Containers*, acesso através de página web <http://www.tkt-germany.de/webseite/pages/en/insulated-containers.php>, ultimo aceso a 2 de Outubro de 2017
- [37] K. Imatani e K.D. Timmerhaus. em *Advances in Cryogenic Engineering: D-2 Current satus of cryogenic and air-blast food freezing systems*, University of Colorado, 2013
- [38] Silvia Estrada-Flores, in *Ph.D. Novel cryogenic technologies for the freezing of food products*, The official journal of Airah, Julho de 2002.
- [39] Praxair, *Serviços Técnicos - Instalaciones de depósitos criogénicos de gases del aire*, acesso através de página web <https://www.ucm.es/data/cont/docs/3-2015-03-16-FichaTecnicaGasesdelAire.pdf>, ultimo acesso a 2 de Outubro de 2017

- [40] Praxair, *Funcionamento de Túneis Lineares*, Vila Franca de Xira, sem data
- [41] Praxair, *Funcionamento de Armários criogénicos*, Vila Franca de Xira, sem data
- [42] A. Biglia, L. Combaa, E. Fabrizio, P. Gaya, Davide R. Aimonino, *Case studies in food freezing at very low temperature*, Energy Procedia 101, pp. 305 – 312, Turim 2016
- [43] Gonçalves dos Santos, FM., *Instalações Frigoríficas*, Sebenta da Unidade Curricular do Mestrado em Engenharia Mecânica, ISEL Ed. Fevereiro 2008.
- [44] Johnston, W.A.; Nicholson, F.J.; Roger, A.; Stroud, G.D. *Freezing and refrigerated storage in fisheries*, FAO Fisheries Technical Paper. No. 340. Rome, 1994
- [45] Devender Kumar, R.S Mishra, *Thermodynamic Analysis of Linde System for Liquefaction of Gases*, International Journal of Advance Research and Innovation - Vol.3 India, 2013

10 Anexos

Anexo I - Balanço Energético Nacional na indústria alimentar e bebidas.

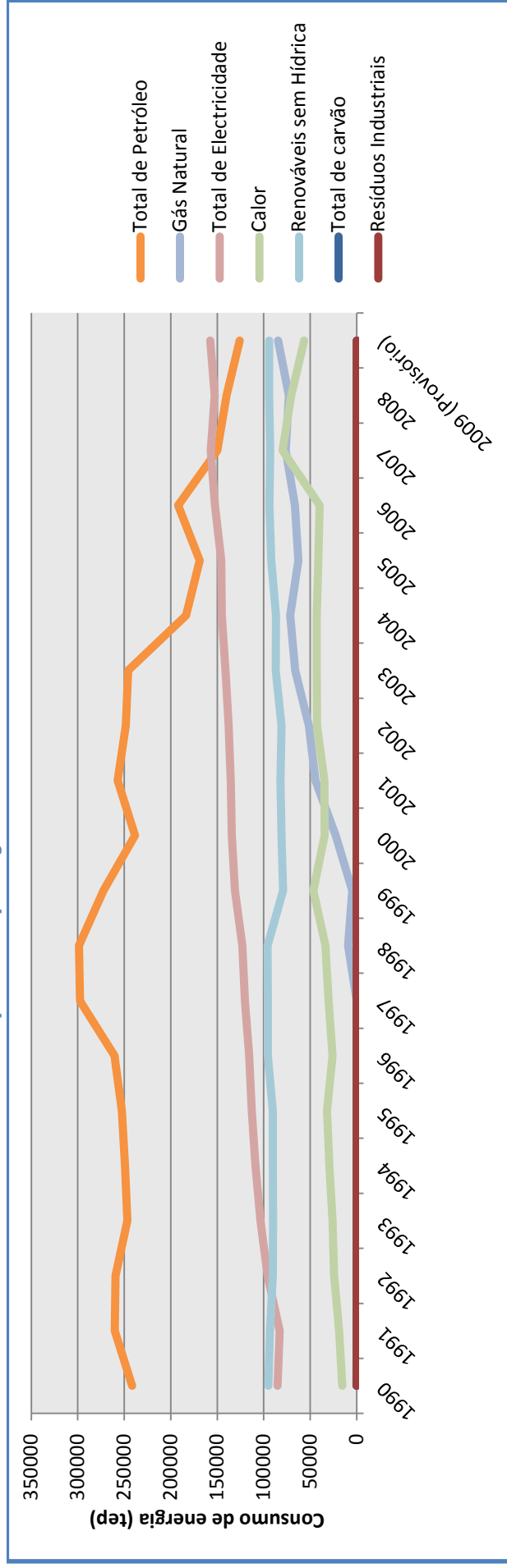
3.5.3. Consumos e custos energéticos

Tabela 48 - Balanço energético na Indústria Alimentar e de Bebidas 1990-2009 (tep)

Tipos de energia	Balanço Energético (tep) Alimentação e Bebidas																				
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009 (Provisório)	
Total de carvão	297	159	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de petróleo energético	240091	259508	258390	245822	248185	250050	258780	296979	298293	271917	238002	254219	247950	245564	183171	168359	191752	149742	139920	125641	
Total de petróleo não energético	1695	891	1142	1012	1200	2609	1856	574	435	457	619	2910	454	336	488	528	426	387	241	225	
Total de Petróleo	241785	260398	259532	246834	249385	252658	260636	297552	298728	272374	238620	257129	248404	245900	183659	168887	192178	150129	140161	125866	
Gás Natural	0	0	0	0	0	0	0	92	9390	4914	22732	44403	51602	66233	71683	62850	66629	76473	73004	84739	
Total de Electricidade	85358	83006	96086	103692	108985	112832	115756	120400	123152	130978	134538	135504	137894	141366	145155	145746	152496	156985	152856	157555	
Calor	15764	19137	24515	26077	29485	31974	26164	30341	33753	46765	34728	34927	42899	43204	43177	41468	39909	79758	70540	56566	
Resíduos Industriais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	
Renováveis sem Hídrica	95157	93492	90442	90158	90243	90243	95760	95760	95963	79405	81016	82100	80940	87315	87052	92143	94037	93175	94405	94405	
Total geral	438360	456192	470587	466762	478098	487707	498316	544145	560985	534437	511635	554063	561740	584019	530725	511095	545249	556562	530966	519131	

Nota: No processo produtivo e nas instalações: Carvão (Hulha e Antracite Estrangeira); Petróleo Energético (GPL, Gasolina, Petróleo, Gasóleo, Fuelóleo); Petróleo Não Energético (Lubrificantes, Asfaltos, Parafinas, Solventes); Gás Natural; Electricidade; Calor; Resíduos Industriais; Renováveis sem hídrica (Lenhas e resíduos vegetais, outros renováveis).

Gráfico 27 - Evolução do balanço energético na Indústria Alimentar e de Bebidas 1990-2009



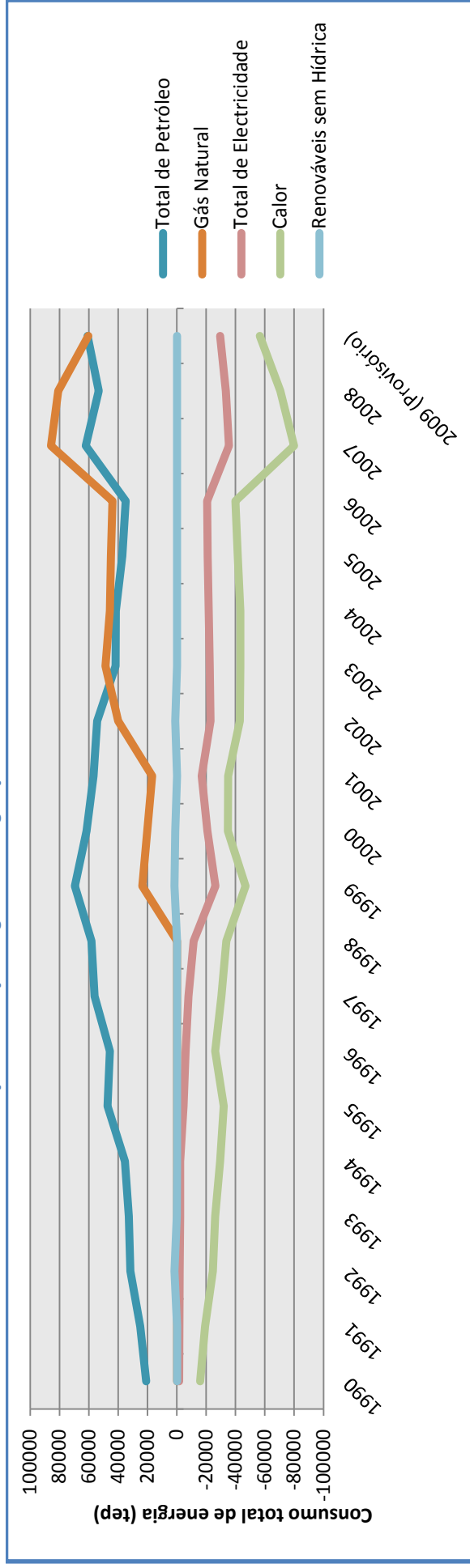
Como se verifica no gráfico 27, o consumo de petróleo na Indústria Alimentar e de Bebidas diminuiu ao longo dos anos ao invés do gás natural que subiu o seu consumo, desde a sua introdução no mercado.

Tabela 49 - Balanço energético nas Cogerações na Indústria Alimentar e de Bebidas 1990-2009 (tep)

Tipos de energia	Balanço Energético (tep) Alimentação e Bebidas - Cogeração																			
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009 (Provisório)
Total de Petróleo Energético	20991	25093	31785	32841	35485	47284	45703	56103	58195	69655	61581	56776	54459	41775	41623	37175	35018	62241	53345	60881
Total de Petróleo não Energético	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de Petróleo	20991	25093	31785	32841	35485	47284	45703	56103	58195	69655	61581	56776	54459	41775	41623	37175	35018	62241	53345	60881
Gás Natural	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23691	20261	16814	40098	48669	45753	45069	44005	85912	80866	60330
Total de Electricidade	-1572	-1589	-1827	-2160	-2246	-4556	-5970	-7934	-11369	-26298	-20809	-16871	-22937	-22295	-21601	-20966	-20542	-35396	-33383	-29390
Calor	-15764	-19137	-24515	-26077	-29485	-31974	-26164	-30341	-33753	-46765	-34728	-34927	-42899	-43204	-43177	-41468	-39909	-79758	-70540	-56566
Renováveis sem Hídrica	0	0	1642	84	0	0	0	0	0	1650	1094	0	1160	0	0	0	0	0	0	2
Total Geral	3655	4367	7084	4688	3753	10754	13569	17828	13073	21933	27399	21792	29882	24944	22598	19810	18572	32999	30288	35257

Nota: Nas Cogerações: Petróleo Energético (GPL, Gasóleo, Fuelóleo); Gás Natural; Electricidade; Calor; Renováveis sem hídrica (Lenhas e resíduos vegetais, Biogás).

Gráfico 28 - Evolução do balanço energético nas Cogerações na Indústria Alimentar e de Bebidas 1990-2009



Nas Cogerações existentes nas instalações do setor Alimentar e de Bebidas também se verifica o mesmo. Aumentou o consumo do gás natural e diminui o consumo do petróleo, estando a partir de 2006 o consumo de petróleo a aumentar.

Anexo II - Diagrama geral de fluxo de uma Unidade de Separação de Ar

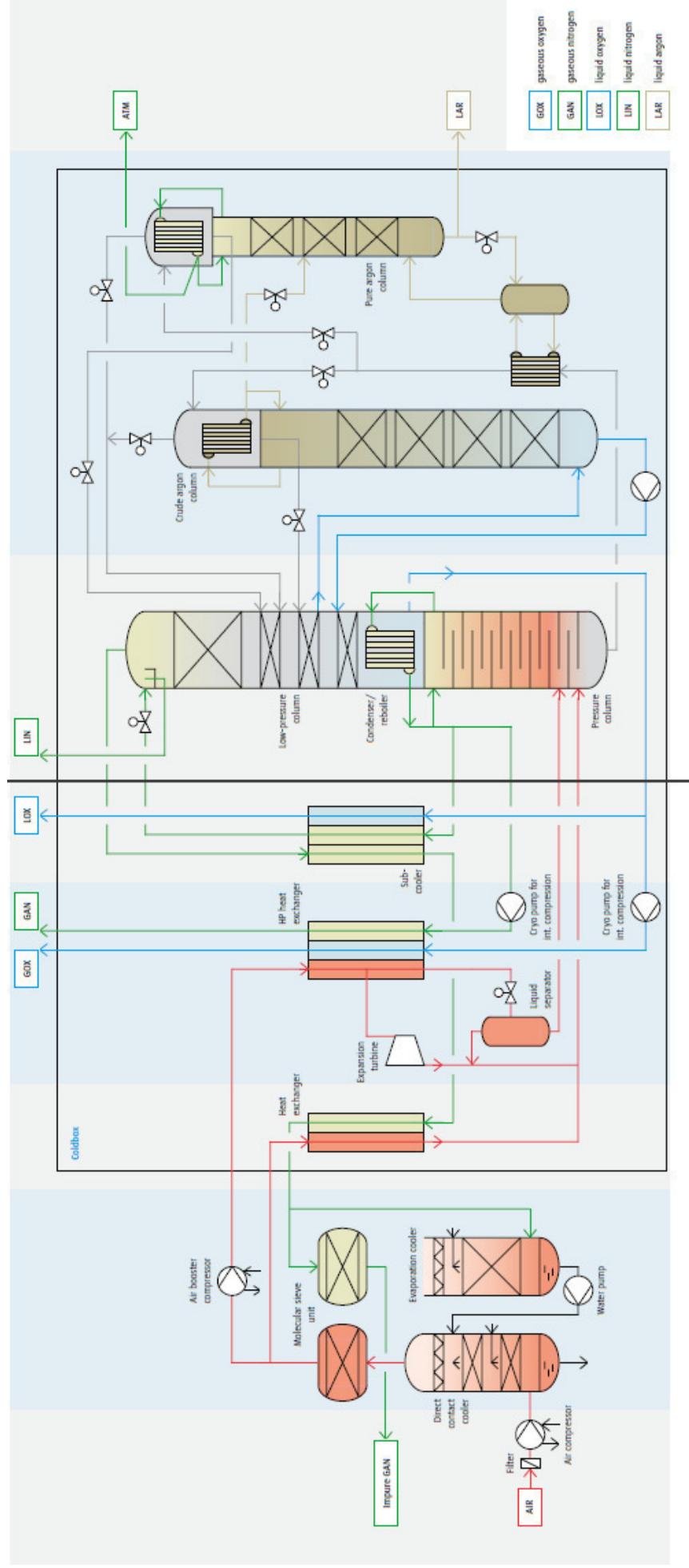


Figura 25 - Diagrama de Fluxo de uma Unidade de Separação de Ar

[Fonte: Linde, sem data]

Anexo III – Representação esquemática Sistema de Separação de ar atmosférico (ASU)

Air Products Air Separation Plants—Unique Technology & Unparalleled Experience

Worldwide customers requiring large amounts of oxygen, nitrogen or argon trust Air Products' 70 years of experience designing and operating cryogenic air separation units (ASU). Whether the need is for 50 tpd or 4,000 tpd, Air Products will deliver the most cost-effective, efficient and dependable cryogenic solution from conceptual design through onstream production. We have produced more than 2,000 ASU plants worldwide, and own and operate over 300.

1 Main Air Compressor (MAC) and Booster Air Compressor (BAC)

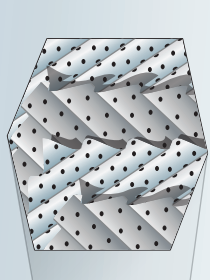
Atmospheric air is compressed and driven through the system by a series of air compressors. While this image shows electrically-driven compressors, many of the larger ASUs have steam-driven compression. Matching the right compressor design for the specific ASU cycle is critical to optimize energy usage and costs. Air Products engineers (machinery & process design) work directly with compressor manufacturers to assure the best fit. Our machinery operations group is recognized as the best in the industry, experienced with a wide variety of compressors, including serial number one compressor designs such as the MAN-Turbo "Airman RIKT 140" double-ended steam turbine drive MAC/BAC that has been operating at our 81,700 Nm³/hr ASU in Trinidad since 2003.

2 Adsorption

The adsorption process removes water, carbon dioxide, nitrous oxide, and hydrocarbons from the feed air stream which is needed for safe operation and high efficiency. Air Products is on the leading edge of creating the most effective adsorbents in the industry, with testing facilities in China, UK, and the US. Because site conditions can vary, Air Products uses three different configurations for TSA: vertical, horizontal and radial flow. We balance reliability, operability and cost to determine which system is optimal. Air Products' experience assures customers that their absorption process will deliver numerous benefits, including low pressure drop minimizing MAC power, minimized regeneration power, reduced size and cost-effective TSA equipment.

3 Main Heat Exchanger

The heat exchanger promotes heat transfer between fluids. Air Products offers unique design capabilities to optimize the heat exchanger's energy efficiency and integration with the process cycle. The ability to customize the equipment for each customer's ASU comes from a highly experienced engineering staff and long-term working relationships with leading heat exchanger manufacturers.



Structured Packing

4 Argon Distillation

Argon removal systems depend on distillation for purification. Air Products' *Integrated Argon Removal* system eliminates the need for a separate column for argon removal. It produces a crude argon stream (90% Ar and 10% O₂) out of the main column that results in 3–4% power savings. If pure argon is required, further purification of the crude argon stream occurs in a separate distillation column, or in a proprietary Air Products Argon PSA, which can be added later. Proprietary packing technology allows for a shorter argon column size versus competitive technologies. The smaller column results in production efficiencies and dramatically lower shipping and installation costs.

5 Main Heat Exchanger

The heat exchanger promotes heat transfer between fluids. Air Products offers unique design capabilities to optimize the heat exchanger's energy efficiency and integration with the process cycle. The ability to customize the equipment for each customer's ASU comes from a highly experienced engineering staff and long-term working relationships with leading heat exchanger manufacturers.

6 Argon Distillation

Argon removal systems depend on distillation for purification. Air Products' *Integrated Argon Removal* system eliminates the need for a separate column for argon removal. It produces a crude argon stream (90% Ar and 10% O₂) out of the main column that results in 3–4% power savings. If pure argon is required, further purification of the crude argon stream occurs in a separate distillation column, or in a proprietary Air Products Argon PSA, which can be added later. Proprietary packing technology allows for a shorter argon column size versus competitive technologies. The smaller column results in production efficiencies and dramatically lower shipping and installation costs.

7 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

8 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

9 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

10 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

11 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

12 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

13 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

14 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

15 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

16 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

17 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

18 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

19 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

20 Turbo Expander

Turbo expanders are used to expand air or nitrogen from a higher pressure to a lower pressure, providing refrigeration to produce liquids in the distillation column system. Proper design is critical. Air Products has nearly 50 years of in-house design and manufacturing expertise producing more than 1,300 turbo expanders. This hands-on knowledge assures customers they will receive the highest thermodynamic performance, improved operability, reduced maintenance, and a better integration with the process design.

21 Air Distillation System

Choosing the optimal configuration of distillation column components is not only important in air separation, but vital to minimize capital and operating costs. Air Products was the pioneer in structured packing in 1984—now the accepted industry standard. Structured packing provides a large surface area per volume, which maximizes mass transfer performance and creates lower pressure drop versus conventional distillation trays. Air Products' proprietary structured packing delivers a higher capacity and lower pressure drop, resulting in lower energy consumption. Combined with our patented liquid and vapor distributors, the Air Products air distillation system offers unequalled distillation performance. Site conditions can vary, so all designs are tested to assure optimal efficiency and reliability before installation.

Column Cold Box

Pure N₂

Liquid Nitrogen

Crude O₂

LP Column

Reboiler

Pure Oxygen

HP Column

Argon Column Feed

LOX PUMP

Crossover Box GOX, GAN, LOX, LIN, Waste

Heat Exchanger Cold Box

GAN to Customer

GOX to Customer

Subcooled LIN / LOX / LAR to Storage

LAR

Plate-Fin Heat Exchanger

Waste Gas

Steam

Condensate

Waste Gas Vent

TSA

Waste Gas Vent

Chilled Cooling Water

Waste Tower

Cooling Water

Utilities to ASU

Electricity/Steam

Cooling Water

2-3mm diameter Adsorbent

Direct Contact Aftercooler (DCAC)

Main Air Compressor (MAC)

Inlet Air Filter

Atmospheric Air

LOX

LIN

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

PRODUCTION

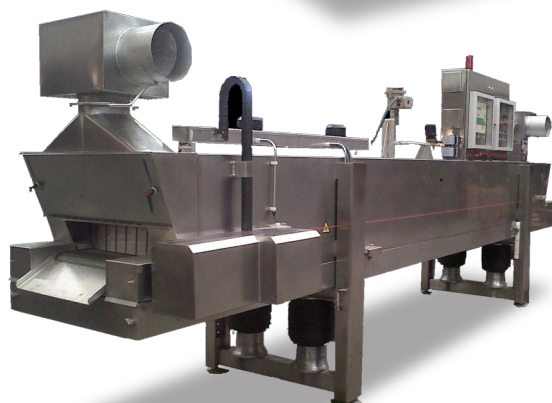
PRODUCTION

Anexo IV – Catálogo de equipamentos – Armário e Túnel Criogénico

Túnel Cryofood

EQT de nitrógeno líquido

- La nueva generación Cryofood EQT convierte a los túneles de nitrógeno líquido de **Praxair** en líderes dentro de la criogenia industrial.
- **Mayor productividad**
Máximo aprovechamiento del gas
Menor consumo específico
Mayores producciones
- **Gran versatilidad**
Medidas especialmente diseñadas para adaptarse a todas las necesidades productivas.



¡La nueva generación de túneles criogénicos!

	0,6X4	0,6X6	0,6X9	1,2X6	1,2X9	1,2X12
Medidas Exteriores						
a Alto (mm)	2.200	2.200	2.200	2.200	2,200	2.200
b Ancho (mm)	1.260	1.260	1.260	1.890	1.890	1.890
c Largo (mm)	5.250	7.250	10.250	7.250	10.250	13.250
Medidas Cinta						
d Ancho (mm)	600	600	600	1,200	1.200	1.200
e Largo (mm)	4.000	6.000	9.000	6.000	9.000	12.000
f Altura carga (mm)	1.080	1.080	1.080	1.080	1.080	1.080
g Altura salida (mm)	930	930	930	930	930	930
h. Máx. entrada						
h Producto	170	170	170	170	170	170
Potencia (Kw) (220 V – 380 V - 50Hz)						
	6	8	10	10	12	15
Peso Túnel (Kg)	2.120	3.050	4.140	4.980	6.010	7.100

www.praxair.es

Orense, 11
Tel.: 91 453 30 00
Fax: 91 555 43 07
28020 MADRID
alimentacion@praxair.com

Equipos disponibles en otros tamaños. Posibilidad de construir equipos especiales y/o a medida, especialmente adaptados a sus líneas. Para más información contacte con nosotros.

Armarios Criogénicos

Nitrógeno líquido - LIN

Dióxido de Carbono líquido - LCO₂

- Recomendable en todos los sectores: cárnico, precocinados, pescado, panadería, pastelería, masas congeladas, frutas, etc.
- Se pueden utilizar los mismos carros y cajas usados en otras partes del proceso.
- Mínimo coste de inversión.
- Minimiza las pérdidas de peso.
- Gran flexibilidad de producción.

Se puede trabajar a distintas temperaturas y con distintos tiempos de residencia en función del tipo de producto.



¡La solución en procesos discontinuos!

	1000	2100	6000	2X2*
Medidas Exteriores				
a Alto (mm)	1.700	2.140	2.210	2.600
b Ancho (mm)	1.330	1.550	1.715	2.830
c Largo (mm)	1.315	1.715	2.545	1.615
Medidas Interiores				
d Alto (mm)	1.340	1.950	2.030	1.840
e Ancho (mm)	680	825	950	725
f Largo (mm)	1.000	1.400	2.240	1.300
Potencia (Kw) (220 V – 380 V - 50Hz)				
	1,5	3	5	5
Peso Armario (Kg)				
	440	700	1.100	1.440

www.praxair.es

Orense, 11
Tel.: 91 453 30 00
Fax: 91 555 43 07
28020 MADRID
alimentacion@praxair.com

* Modelo compuesto por dos cabinas de misma capacidad útil. Medidas interiores referidas a una cabina.

Equipos disponibles en otros tamaños. Posibilidad de construir equipos especiales y/o a medida, especialmente adaptados a sus líneas. Para más información contacte con nosotros.

Anexo V – Diagrama de Mollier de Azoto

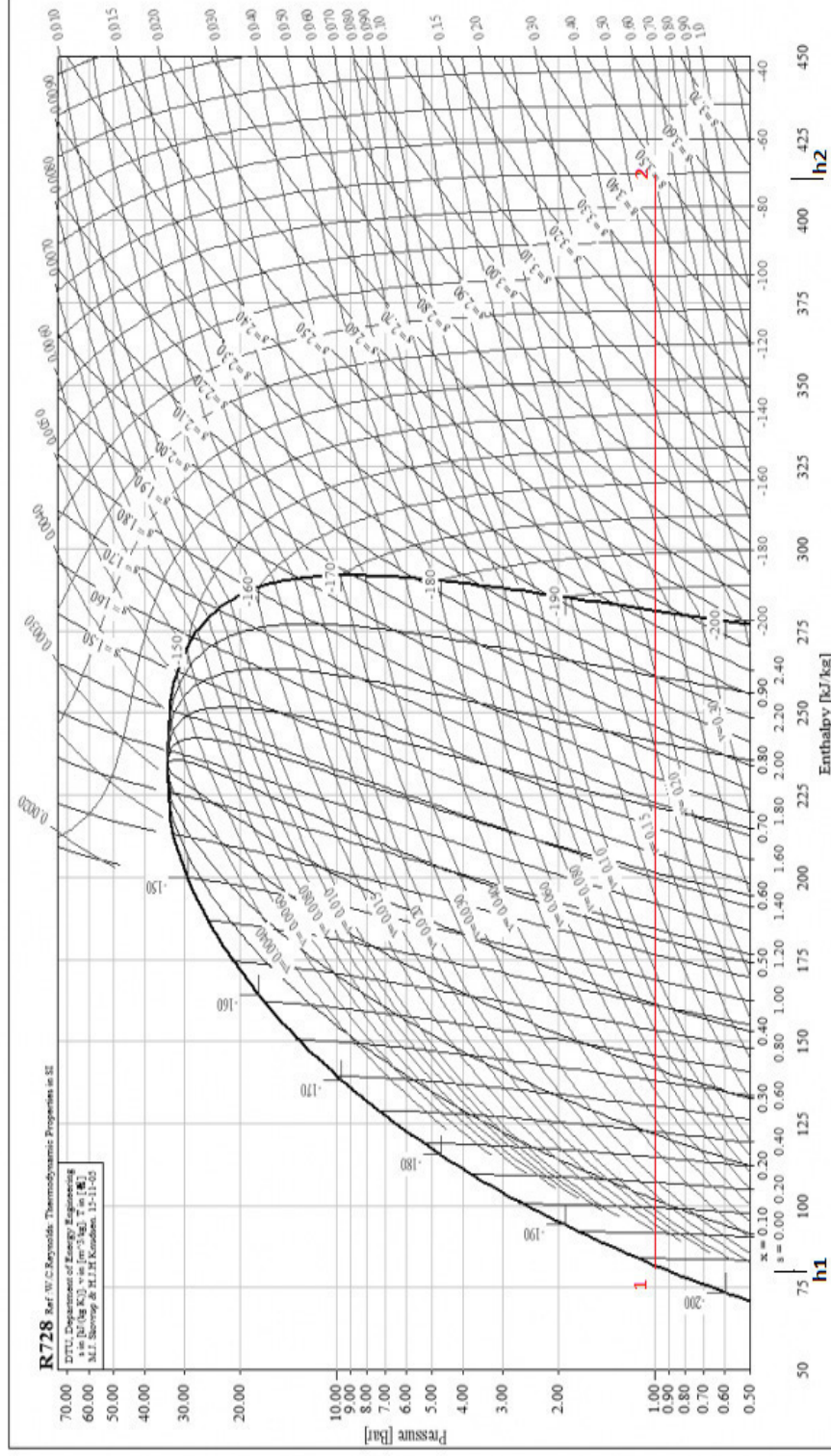


Figura 26 - Diagrama de Mollier N_2 do processo de congelação em túnel criogénico