



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Qualidade comparada da congelação de géneros alimentícios por processo criogénico, por meio de azoto líquido e por anídrico carbónico**

**Sérgio Luís David Pereira**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

Prof. Eng.º Francisco Manuel Gonçalves dos Santos  
Prof. Eng.º António Manuel Matos Guerra

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado  
Vogais:

Eng.ª Paula Maria Gamado  
Prof. Eng.º Francisco Manuel Fernandes Severo  
Prof. Eng.º Francisco Manuel Gonçalves dos Santos  
Prof. Eng.º António Manuel Matos Guerra

**Setembro de 2010**



**ISEL**

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

# **Qualidade comparada da congelação de géneros alimentícios por processo criogénico, por meio de azoto líquido e por anídrico carbónico**

**Sérgio Luís David Pereira**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

Prof. Eng.º Francisco Manuel Gonçalves dos Santos  
Prof. Eng.º António Manuel Matos Guerra

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado  
Vogais:

Eng.ª Paula Maria Gamado  
Prof. Eng.º Francisco Manuel Fernandes Severo  
Prof. Eng.º Francisco Manuel Gonçalves dos Santos  
Prof. Eng.º António Manuel Matos Guerra

**Setembro de 2010**

# RESUMO

A congelação alimentar é um dos mais importantes processos de conservação de géneros alimentícios a nível mundial.

Este estudo analisa de forma comparada os processos de congelação clássica e criogénica de produtos alimentares em geral, e em particular do camarão. Focaliza as mudanças ocorridas durante o processo de congelação bem como a importância e consequência dos cristais de gelo formados durante o processo. É feita uma abordagem à velocidade da frente de frio e ao efeito que o ciclo congelação-descongelação trás à qualidade final do produto.

Os dados colectados permitem evidenciar uma clara vantagem no uso da congelação criogénica no que respeita à qualidade final do produto uma vez que este apresenta uma clara melhoria das suas propriedades globais em especial na oleosidade e sabor.

Por outro lado, demonstra-se que a congelação clássica permite uma maior contenção de custos associados à congelação uma vez que possibilitou uma poupança de dois milhões de Euros após um funcionamento ao longo de 11 anos, segundo os pressupostos estabelecidos.

Constatou-se que a crio-congelação deverá ser aplicada no processamento de produtos de elevado valor comercial, ou em locais onde as tarifas eléctricas tenham um valor elevado, ou ainda em produtos que, devido à sua constituição, assim o exija.

Considerando estas conclusões principais, o estudo inviabiliza, neste momento, o uso de azoto líquido na congelação total de camarão dentro do território de Moçambique para comércio em Portugal.

**Palavras-chave:** Criogénicos, Refrigeração, Congelação, Ciclo congelação-descongelação, Velocidade da frente de frio, Azoto, Dióxido de carbono, Cristais de gelo, Métodos de congelação, Géneros alimentícios, Congelação clássica, Congelação criogénica.

## ABSTRACT

The food freezing is one of the most important processes of conservation of foodstuffs at world-wide level.

This study analyses the air blast and cryogenic freezing of food in general, and in individual of the shrimp. It focuses the changes occurred during the process of freezing as well as the importance and consequence from the ice crystals formed during the process. An approach is done about the speed of the cold front freezing and the effect of the freeze-thaw cycle on the final quality of the product.

The data collected in this work allows showing a clear advantage of the use of cryogenic freezer in the final quality of the product, once this one presents an improvement of his global properties, especially in the oiliness and taste.

It was demonstrated, besides, that the air blast freezer allows less costs associated to the freezing process, once it made possible a thrift of two million Euros after a functioning along 11 years, according to the established presuppositions.

It was noted that the cryogenic freezing will have still to be applied in the processing of products of elevated commercial value, or in places where the electric tariffs have an elevated value, or in products that, due to his constitution, demand it.

Considering these principal conclusions, this study does not approve, in this moment, the use of liquid azote in the total freezing of shrimp inside the territory of Mozambique for commerce in Portugal.

**Key-words:** Cryogenics, Refrigeration, Freezing, Freeze-thaw cycle, Cold front freezing, Azote, Carbon dioxide, Ice crystals, Freezing methods, Foodstuff, Air blast freezing, Cryogenic freezing

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço aos Professores Francisco Manuel Gonçalves dos Santos, Orientador, e António Manuel Matos Guerra, Co-orientador, pela forma como me guiaram no meu estudo. As notas dominantes da sua orientação foram a crítica sempre atempada e construtiva e a grande disponibilidade para o esclarecimento de dúvidas. A co-orientação prestada foi de enorme proveito sobretudo devido à utilidade das suas recomendações e a cordialidade e disponibilidade com que sempre me recebeu. Estou muito grato por ambas e também pela liberdade de acção, decisiva para que este trabalho contribuísse também para o meu desenvolvimento pessoal.

Agradeço também à Praxair e AirLiquide que, apesar de serem grandes grupos multinacionais, não deixaram de querer colaborar neste trabalho. Um especial reconhecimento à Eng.<sup>a</sup> Paula Maria Gamado e ao Sr. Paulo Santos, que mostraram total disponibilidade no esclarecimento das questões relativas à crio-congelação de alimentos.

Ao meu amigo e companheiro de curso Agostinho Rocha pelo seu grande apoio e amizade ao longo destes cinco anos de formação no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Onde estou agora é devido aos meus pais, e esta dissertação é um reflexo do amor e suporte que sempre me deram ao longo de toda a minha vida. Tiverem de fazer grandes sacrifícios de forma a garantirem que todas as minhas necessidades fossem satisfeitas, ao mesmo tempo que me inspiraram a lutar e a trabalhar dignamente de forma a atingir sempre os meus objectivos. Da mesma forma agradeço ao meu querido irmão, Tiago Pereira, sempre fonte de força e alento nos momentos mais difíceis.

Não posso deixar de agradecer ao meu tio Albertino e à minha madrinha Olinda, pela grande ajuda prestada, ao disponibilizarem alojamento durante a minha estadia em Lisboa, e também por garantirem estabilidade e sossego nos momentos de maior concentração e estudo. Uma palavra de grande consideração e estima ao Sr. Ilídio pela total disponibilidade de ajuda e esclarecimento de dúvidas ao longo de toda a minha vida de estudante.

Por fim, e não menos importante, agradeço à Tina Narciso pelo seu amor, apoio e encorajamento ao longo de todo o meu percurso académico.

## LISTA DE SIMBOLOS

P – Probabilidade de erro

$Q_1$  – Carga térmica através das superfícies do túnel (W)

$Q_2$  – Carga térmica devido ao produto a congelar (W)

U – Coeficiente de transmissão de calor da superfície considerada ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

R – Resistência térmica ( $^\circ C/W$ )

S – Área da superfície considerada ( $m^2$ )

$\Delta T$  – Diferença de temperatura entre as duas faces da superfície considerada (K ou  $^\circ C$ )

$h_i$  – Coeficiente de convecção interior ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$h_e$  – Coeficiente de convecção exterior ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

e – Espessura (m)

$\lambda$  – Coeficiente de condutividade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$\dot{m}$  - Caudal mássico (kg/s)

h – Entalpia (kJ/kg)

$C_1$  – Calor específico acima da temperatura de congelação ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )

$C_2$  – Calor específico abaixo da temperatura de congelação ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )

L – Calor latente de congelação ( $J/kg$ )

$T_1$  – Temperatura inicial do produto a congelar ( $^\circ C$ )

$T_2$  – Temperatura de congelação do produto ( $^\circ C$ )

$T_3$  – Temperatura final do produto a congelar ( $^\circ C$ )

$\dot{Q}_{int}$  - Potência necessária ao túnel de congelação (W)

$P_{previsional}$  – Potência que o evaporador terá de retirar do túnel de congelação (W)

$\dot{V}$  - Caudal volumétrico ( $m^3/s$ )

$\dot{v}$  - Volume específico ( $m^3/kg$ )

V – Velocidade (m/s)

$\dot{W}$  - Potência (W)

Ton – Tonelada (1000Kg)

# NOMENCLATURA

R125 – Pentafluoroetano ( $\text{CF}_3\text{CHF}_2$ )

R134a – Tetrafluoroetano ( $\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$ )

R143a – Trifluoroetano ( $\text{CF}_3\text{CH}_3$ )

R404a – Fluido frigorígeno (constituído por R143a, R125 e R134a)

R717 – Fluido frigorígeno (amoníaco)

R729 – Ar (76% Azoto, 23% Oxigénio, 1% Árgon)

$\text{NH}_3$  – Amoníaco

$\text{N}_2$  – Azoto ou nitrogénio

$\text{LN}_2$  – Azoto líquido

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono ou anídrico carbónico

$\text{LCO}_2$  – Dióxido de carbono líquido

$\text{H}_g$  – Mercúrio

ppm – Parte por milhão

PTN – Pressão e temperatura normal (76mm de Hg; 25°C)

# ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	ASPECTOS GERAIS DA PRESERVAÇÃO DE PRODUTOS ALIMENTARES .....	3
2.1.	Breve historial .....	3
2.2.	Formas e processos de preservação.....	4
2.3.	Abordagem ao produto.....	6
2.4.	Entrepósitos frigoríficos .....	7
2.5.	Economia.....	9
3.	CICLO FRIGORÍFICO CLÁSSICO.....	10
4.	OS CRIOGÉNICOS .....	13
4.1.	Produção.....	14
4.1.1.	Ciclo de Linde – Hampson.....	14
4.1.2.	Destilação fraccionada .....	16
4.2.	Utilização.....	18
4.3.	Análise termodinâmica ao processo de congelação .....	19
4.4.	Características .....	20
4.4.1.	Azoto .....	20
4.4.2.	Dióxido de carbono .....	21
4.5.	Azoto vs. Dióxido de carbono.....	22
5.	ESTUDO DOS MEIOS DE CONGELAÇÃO.....	24
5.1.	Congelação por meio de sistemas frigoríficos .....	25
5.1.1.	Túneis de ar clássicos .....	25
5.1.2.	Armários de placas .....	27
5.2.	Salmouras .....	28
5.3.	Congelação criogénica .....	29
5.3.1.	Congeladores de contacto directo.....	29
5.3.2.	Congeladores de contacto indirecto .....	32
5.4.	Congelação mista .....	33

6.	A CONGELAÇÃO.....	35
6.1.	Mudanças ocorridas durante a congelação.....	35
6.2.	Consequência dos cristais de gelo.....	37
6.3.	Velocidade da frente de frio e outras características.....	38
6.4.	Influência do ciclo congelação/descongelação.....	40
6.5.	Qualidade obtida por Congelação clássica e Congelação criogénica.....	43
7.	DIMENSIONAMENTO DO TÚNEL CLÁSSICO E CRIOGÉNICO.....	47
7.1.	Características do Local.....	48
7.2.	Túnel de Congelação Clássico.....	48
7.2.1.	Sistema de Refrigeração a usar.....	49
7.2.2.	Isolamento térmico do túnel.....	50
7.2.3.	Balanço Térmico Manual.....	53
7.2.4.	Balanço Térmico Informático do túnel de congelação.....	55
7.2.5.	Fundamentos termodinâmicos da instalação.....	56
7.2.6.	Dimensionamento de equipamentos.....	62
7.2.7.	Circuito frigorífico da instalação.....	74
7.3.	Túnel de Congelação Criogénico.....	75
8.	ANÁLISE DE CUSTOS.....	78
8.1.	Túnel clássico.....	79
8.2.	Túnel criogénico.....	81
9.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	84
10.	CONCLUSÃO.....	89
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
12.	ANEXOS.....	94

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo frigorífico clássico sem perdas .....	12
Figura 2 – Ciclo simples de Linde – Hampson .....	15
Figura 3 – Diagrama P-h do ganho térmico do azoto.....	20
Figura 4 – Classificação dos equipamentos criogénicos .....	29
Figura 5 – Diagrama de congelação de água e de uma solução aquosa.....	35
Figura 6 – Comparação entre os cristais de gelo.....	37
Figura 7 – Perdas de produto por tipo de descongelação .....	41
Figura 8 – Força de corte necessária ao produto .....	41
Figura 9 - Balanço térmico informático .....	55
Figura 10 – Esquema do circuito frigorífico a amoníaco com injeção total.....	57
Figura 11 – Diagrama de Mollier da instalação frigorífica clássica.....	57
Figura 12 – Separador de líquido de baixa pressão.....	60
Figura 13 – Depósito intermédio.....	61
Figura 14 – Estação de válvulas de um evaporador .....	65
Figura 15 – Túnel Zip Freeze .....	75
Figura 16 – Diagrama de Mollier da instalação criogénica.....	76
Figura 17 – Custos acumulados do túnel de congelação clássico e criogénico .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas do azoto .....	21
Tabela 2 – Factores de conversão para o azoto .....	21
Tabela 3 – Características físico-químicas do dióxido de carbono .....	22
Tabela 4 - Factores de conversão para o dióxido de carbono .....	22
Tabela 5 – Comparação entre azoto e dióxido de carbono líquido .....	22
Tabela 6 – Tempo de congelação, taxa de congelação, perda de produto e força de corte de camarões congelados tradicionalmente e criogénicamente.....	39
Tabela 7 – Pontuações médias das características da batata frita congelada por diferentes métodos, imediatamente após a sua congelação e após um armazenamento de 12 semanas a -18°C.....	43
Tabela 8 – Rendimentos e concentrações de água em batatas fritas congeladas criogénicamente (rápido) e mecanicamente (lento) imediatamente após a congelação e após a armazenagem.....	45
Tabela 9 - Rendimentos e concentrações de água em pizzas congeladas criogénicamente (rápido) e mecanicamente (lento) imediatamente após a congelação e após a armazenagem.....	46
Tabela 10 – Comparação entre congelação rápida e congelação lenta .....	46
Tabela 11 – Propriedades do amoníaco.....	50
Tabela 12 – Comparação entre os valores teóricos e reais do caudal volumétrico e da potência absorvida .....	63

## 1. Introdução

Desde sempre o homem sentiu a necessidade de conservar alimentos perecíveis, isto é, alimentos que possuem uma grande tendência para a degradação como é, por exemplo, o caso da carne e do peixe, durante períodos prolongados, especialmente nos locais onde se faziam sentir maiores carências alimentares, ou em zonas sujeitas a grande sazonalidade, necessitando de preservar os produtos excedentes.

Existem inúmeros processos que são passíveis de serem usados nesta preservação, no entanto a refrigeração e a congelação são os mais usados em todo o mundo, não só pela qualidade global com que o produto é armazenado como também pelo seu superior tempo de preservação.

Actualmente são usadas duas técnicas fundamentais no processo de congelação de produtos alimentares, o processo clássico de compressão mecânica e o processo criogénico, cada um com as suas vantagens e desvantagens, sendo que as mais relevantes prendem-se fundamentalmente com a qualidade final do produto e com o custo da congelação.

É assim de capital importância o conhecimento dos verdadeiros benefícios e limitações de cada processo no sentido de fornecer aos projectistas e empresários da indústria alimentar, todas as informações e conhecimentos necessários para que estes façam a escolha mais acertada na hora da selecção do sistema a usar.

Este estudo surge assim para atenuar esta lacuna existente no mercado. Tem como temática: “Qualidade comparada da congelação de géneros alimentícios por processo criogénico, por meio de azoto líquido e por anídrico carbónico.”, sendo o principal objectivo e linha de orientação a comparação entre a congelação clássica e a congelação criogénica de produtos alimentares. Para o efeito, utilizar-se-á um túnel de congelação clássico a amoníaco e um túnel de congelação criogénico a azoto líquido para a congelação de uma tonelada de camarão por hora.

Assim, pretende-se com este estudo:

- Analisar o comportamento termodinâmico da congelação de géneros alimentícios por processo criogénico, por meio de azoto ou nitrogénio líquido e por dióxido de carbono, também conhecido por anídrico carbónico;
- Estudar as vantagens e desvantagens dos processos de congelação sobre os géneros alimentícios, tendo em conta as velocidades da frente de frio;
- Conceber e dimensionar os equipamentos adequados para a congelação de 1 tonelada de camarão por hora, num túnel clássico e num túnel criogénico;
- Apresentar as soluções técnicas de engenharia de processo de congelação adequadas para garantir a eficácia dos sistemas;
- Comparar qualitativamente e economicamente as duas soluções.

Pensa-se que este trabalho terá um grande interesse, quer a nível nacional quer a nível internacional, uma vez que não foi encontrado nenhum estudo aprofundado sobre a dicotomia qualidade/preço da congelação de grandes quantidades de um produto específico e de grande valor comercial como é o caso do camarão.

Irá ser uma mais-valia pois disponibilizará à comunidade científica e em especial aos retalhistas da área da indústria alimentar, um estudo comparativo da qualidade final de géneros alimentícios quando sujeitos a uma congelação clássica e a uma congelação criogénica. Pretende exemplificar também, num caso concreto como é o congelamento de uma tonelada de camarão por hora, qual o melhor método de congelação a escolher, uma vez que se estimar o investimento inicial, o custo a médio-longo prazo de cada um dos túneis bem como o nível de qualidade atingido em cada um deles.

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

## **2. Aspectos gerais da preservação de produtos alimentares**

### **2.1. Breve historial**

Há registos anteriores a 2.000 anos antes de Cristo sobre a utilização dos efeitos exercidos pelas baixas temperaturas na conservação de produtos alimentares, proporcionados pelo gelo e pela neve, como também o uso de outras técnicas como sejam o fogo, o fumo e a secagem. Estas técnicas permaneceram praticamente inalteradas até à era industrial, quando Nicolas Appert desenvolveu o processo de engarrafamento em vácuo. Já no século XX, com a mudança dos hábitos alimentares e com a crescente exigência dos consumidores, foram desenvolvidas outras técnicas tais como secagem ao frio, conservantes, etc. (Koelet, 1992).

No entanto apesar de todas estas formas conhecidas para aumentar o tempo de conservação dos alimentos, a refrigeração artificial foi a que se destacou. Ela baseia-se no fenómeno da evaporação de um líquido refrigerante, onde este ao passar ao estado de vapor, provoca um arrefecimento do meio envolvente. Este é, aliás, o princípio de funcionamento dos sistemas clássicos de produção de frio.

Hoje em dia são usados dois métodos principais na obtenção de baixas temperaturas, sendo eles, os sistemas frigoríficos (sistemas tradicionais de compressão mecânica) e a criogenia. Em certos tipos de produtos é usada a salmoura, no entanto tem uma utilização bem mais restrita.

O sistema clássico de compressão utiliza, no seu modelo mais simples, quatro componentes para fazer funcionar um ciclo frigorífico: o compressor, o condensador a válvula de laminagem e o evaporador.

Por sua vez, a criogenia tem por base a simples transferência de calor entre o produto a congelar (temperatura superior) e o fluido criogénico (temperatura inferior) transversalmente à segunda lei da termodinâmica, segundo a qual o calor é sempre transferido do corpo mais quente para o corpo mais frio.

## 2.2. **Formas e processos de preservação**

Todos os géneros alimentícios têm tendência para a degradação ao longo do tempo. Esta degradação não é mais do que uma decomposição dos alimentos, sendo que pode ocorrer segundo os seguintes princípios (Sethi, 2007):

- Decomposição microbiana;
- Auto-decomposição dos géneros alimentícios;
- Reacções químicas;
- Danos provocados por agentes exteriores.

Assim, a preservação dos géneros alimentícios pode ser conseguida evitando ou retardando as causas da sua degradação e para isso são actualmente usados inúmeros processos, tais como a assepsia e filtração, o tratamento térmico, a secagem e/ou desidratação, e as baixas temperaturas.

A assepsia e filtração definem-se como o conjunto de medidas que permitem manter algo isento de micróbios bem como da sua entrada, de onde resulta o prolongamento da qualidade dos produtos. A filtração utiliza-se sobretudo em produtos líquidos através do uso de filtros com um tamanho não superior a 0,45 micrómetros que ajudam a remover e a evitar a multiplicação de microrganismos (Sethi, 2007).

O tratamento térmico é um tipo de processo que envolve o uso de temperaturas elevadas para aumentar a taxa de redução da população microbiana presente no produto. Normalmente este processo é classificado de diferentes maneiras (Sethi, 2007):

- Branqueamento - É usado para reduzir a actividade enzimática que ocorre nos produtos, prevenindo desagradáveis mudanças nas suas propriedades, como sejam mudanças das características sensoriais e propriedades nutricionais. Este tratamento não é usado sozinho, pelo contrário é aplicado como um pré-tratamento.
- Esterilização - Neste processo o produto é aquecido a uma temperatura bastante elevada durante alguns momentos, por exemplo a 121°C durante 10 a 15 minutos de modo a destruir a actividade enzimática e microbiana, resultando num aumento

do período de armazenamento que pode ir além dos seis meses. Podem ser utilizadas temperaturas superiores durante um menor espaço de tempo (140°C por 3-4 segundos) caso o produto seja posteriormente colocado numa câmara com uma atmosfera estéril.

- Pasteurização - É um processo muito parecido com a esterilização mas menos agressivo uma vez que opera a temperaturas mais reduzidas sendo usado para inactivar as enzimas e destruir microrganismos patogénicos sensíveis ao calor que causam estragos com mínimas mudanças nas propriedades do produto. Sendo um processo pouco severo, utiliza temperaturas sempre abaixo dos 100°C.

O processo de secagem/desidratação é talvez o método mais antigo de preservação que se conhece. A secagem é uma acção termo-física em que os seus princípios dinâmicos se baseiam na transferência de massa e de calor no produto. Como consequência o seu peso é reduzido em 40 a 90% do seu peso inicial. Tanto a secagem como a desidratação podem ser conseguidos através de um investimento inicial reduzido ao mesmo tempo que se consegue manter uma elevada qualidade no produto, nomeadamente em frutos e vegetais. Existem várias maneiras de se conseguir este processo (Sethi, 2007):

- Secagem solar - É o processo menos dispendioso e pode ser usado em climas quentes, no entanto tem algumas desvantagens como: ser um processo lento, requerer uma área enorme, as condições higiénicas não são garantidas, depender do estado do tempo, a cor final do produto pode não ser uniforme, etc.
- Desidratação mecânica - É feita em equipamentos mecânicos normalmente em câmaras de secagem onde existe um controlo apertado dos vários parâmetros associados a este fenómeno como sejam temperatura, humidade e fluxo de ar.
- Desidratação por osmose - Osmose é o nome dado ao processo durante o qual a água se movimenta entre meios com concentrações diferentes, passando sempre do meio menos concentrado para o mais concentrado de modo a atingir-se o equilíbrio de concentrações. Este processo ajuda a remover a água de produtos frescos através da sua imersão em soluções aquosas de sal ou açúcar a altas pressões para reduzir a actividade de crescimento de microrganismos na água. Normalmente este processo não é usado para obter mais de 50% de redução do peso inicial devido à crescente diminuição da taxa de osmose. A perda de água

ocorre normalmente em duas horas, sendo os primeiros 30 minutos responsáveis pelo pela maior parte da sua remoção.

- Desidratação por congelação - Utiliza o princípio baseado numa grande depressão (vácuo com pressões entre 27-133Pa). O produto congelado é introduzido na câmara de vácuo, onde a água, é removida através da sublimação, evitando danos devido ao calor. Consegue-se evitar, quase na totalidade, a perda de qualidades sensoriais, ou seja, as propriedades que são reconhecidas pelos sentidos. No entanto este processo requer uma grande quantidade de energia uma vez que necessita que a unidade compressora e o sistema de refrigeração operem durante um largo período de tempo, o que o torna demasiado caro para o uso comercial.

O processo que envolve baixas temperaturas é um dos mais importantes devido à sua larga escala de utilização a nível mundial. A utilização do frio como forma de preservação pode ser dividida em dois tipos:

- Refrigeração - É o processo no qual se mantém a temperatura acima do ponto de congelação da água, mas abaixo da temperatura crítica, a que surgem fenómenos de decomposição;
- Congelação - Tem por objectivo conservar o produto abaixo da temperatura de congelação, a fim de preservar a sua integridade e qualidade, evitando alterações físico-químicas indesejáveis.

### 2.3. **Abordagem ao produto**

Uma vez que se irá tratar da congelação de pescado, mais concretamente do camarão, importa tecer algumas considerações relativamente às suas principais características, bem como questões a ter em conta na sua correcta conservação.

Após a morte do pescado, este encontra-se no mais alto grau de frescura e qualidade para o consumo, porém ao fim de três horas, a sua decomposição incrementa-se significativamente, o que é reforçado com a exposição solar elevando-se a sua temperatura, o que favorece o desenvolvimento de microrganismos, bem como das reacções químicas de decomposição, tal como a oxidação (Instituto Nacional de Frio, sem data).

No caso específico do camarão, a sua carne, após a morte, continua activa e biologicamente viva. A decomposição orgânica ou a mudança da sua composição pode ser provocada por múltiplos factores tais como actividades enzimáticas e microbiológicas (Pedraja, 1970 citado por Boonsumrej et al., 2007).

Assim, depois de capturado, deve ser arrefecido o mais rapidamente possível, sendo o gelo o método mais eficaz e por isso o mais utilizado para baixar a sua temperatura. Normalmente o pescado conservado em gelo resiste entre dois a sete dias, dependendo do nível de conservação bem como do número de quebras da cadeia de frio (Instituto Nacional de Frio, sem data).

Consegue-se assim obter uma superior qualidade dos camarões, e dos produtos piscatórios em geral, se estes forem imediatamente congelados após a sua captura. A qualidade final do produto depende de vários factores incluindo as velocidades de congelação e descongelação, temperatura de armazenagem, variações na sua temperatura, mau manuseamento, etc. (Boonsumrej, et al., 2007).

Segundo Londahl (1997), durante o armazenamento de camarão congelado e outros produtos piscatórios, a qualidade do produto é afectada por causas devidas à oxidação, desnaturação das proteínas, sublimação e recristalização do gelo. Estes fenómenos podem causar perda de qualidade do produto, nomeadamente perda de sabor, oxidação de gorduras, desidratação e consequente perda de peso e endurecimento (Londahl, 1997).

Caso o camarão seja armazenado numa câmara de congelação a  $-18^{\circ}\text{C}$ , não deve permanecer mais de 6 meses. Este período pode ser aumentado até o máximo de um ano caso se diminua a temperatura para valores entre os  $-25^{\circ}\text{C}$  e os  $-30^{\circ}\text{C}$  (Santos, 2008).

Uma rápida congelação seguida de um armazenamento a baixa temperatura é essencial, tanto para o camarão como para outros produtos piscatórios, para que a alteração de qualidade seja minimizada (Londahl, 1997).

#### 2.4. **Entrepósitos frigoríficos**

Para a preservação dos produtos alimentares, durante o máximo de tempo possível e a escalas industriais, recorre-se muitas vezes a entrepostos frigoríficos, que são concebidos de forma a

preservar-lhes correctamente as suas qualidades, mantendo-os a temperaturas apropriadas e controladas, reduzindo-se ao mínimo a sua decomposição.

Um entreposto frigorífico é constituído por um conjunto de câmaras de congelação e de refrigeração que, através do frio, permitem a conservação dos mais variados alimentos durante períodos de tempo fixados que, consoante o produto, pode chegar aos dois anos. Em alguns casos, possuem também um túnel de congelação, onde se processa o congelamento dos produtos.

Na sua constituição, um entreposto frigorífico inclui ainda uma casa das máquinas, onde estão instaladas as unidades compressoras e outros equipamentos, um gerador de emergência para actuar em caso de falha de energia eléctrica, etc. Dispõem, também geralmente, de plataformas de recepção e expedição, salas de preparação e embalagem de produto a conservar e, por vezes, máquina de fabrico e respectivo silo de gelo (Costa, 1982).

Os entrepostos podem ser classificados de acordo com o número de produtos a conservar (Costa, 1982):

- Polivalentes - destinados à conservação de diversos tipos de alimentos;
- Especializados – quando nele se conservam apenas um determinado tipo de produtos, por exemplo, instalações fruteiras, leiteiras, matadouros, etc.

Os entrepostos podem também ser classificados de acordo com a zona de implantação (Costa, 1982):

- Entrepostos de produção – geralmente especializados e localizados junto à unidade produtiva;
- Entrepostos de trânsito – têm como exemplo as gares frigoríficas, frigoríficos portuários e aeroportuários e visam fundamentalmente expedir produtos para médios/longos cursos;
- Entrepostos de consumo – normalmente situados numa zona central da área de influência de uma dada empresa de abastecimento de produtos alimentares ou de uma grande cadeia de supermercados.

## 2.5. ***Economia***

De forma geral, na indústria alimentar, o processo de congelação clássica é o que possui a maior fatia em termos de consumos energéticos, enquanto que a congelação criogénica acarreta maiores custos devido sobretudo ao fluido criogénico. Torna-se então importante entender os custos reais das soluções existentes de modo a conseguir-se planear de forma eficiente toda a instalação frigorífica.

No entanto é muito difícil prever o custo real do funcionamento da instalação a médio-longo prazo uma vez que há inúmeros componentes a analisar nomeadamente o consumo eléctrico real dos vários equipamentos (compressores, ventiladores, etc.), perdas de água do produto e consequente peso, manutenção da instalação, consumos de fluidos, etc. Para analisar todas estas vertentes seria necessário uma enorme quantidade de sensores a monitorizar instantaneamente a instalação o que infelizmente é quase impraticável (Chourot, et al., 2002).

Apesar disto, é possível estimar de forma aproximada, os custos de uma instalação de congelação de géneros alimentícios, neste caso do camarão.

### 3. Ciclo frigorífico clássico

O ciclo frigorífico utilizado no funcionamento de todas as máquinas clássicas de produção de frio ou de calor, baseia-se no ciclo teórico denominado de máquina frigorífica de Carnot. Este ciclo teórico é realizado inteiramente na zona de saturação do fluido frigorigéneo, sendo que este é comprimido adiabaticamente, rejeita calor isotérmicamente para a fonte quente, expande-se adiabaticamente e absorve calor isotérmicamente da fonte fria, repetindo-se novamente o ciclo (Çengel, et al., 2001).

No entanto não é possível obter este ciclo na prática devido sobretudo às irreversibilidades, que estão relacionadas quer com o atrito no fluido que provoca a perda de carga quer com a transferência de calor para as vizinhanças através dos permutadores de calor (Çengel, et al., 2001).

Assim, o ciclo frigorífico real não ocorre apenas na zona de saturação do fluido, mas sim em toda a região, envolvendo todos os estados do fluido frigorigéneo. O seu princípio de funcionamento não é muito complexo, podendo começar-se pelo compressor. Este promove a circulação do fluido, aspirando-o a partir do evaporador e enviando-o no estado de vapor sobreaquecido para o condensador, que é basicamente um permutador de calor (Çengel, et al., 2001).

O fluido que ganha calor quer na evaporação quer na compressão vai rejeitá-lo ao longo da sua passagem pelo condensador que, por sua vez, transfere esse calor para um fluido externo, por convecção e que pode ser a água ou o próprio ar, fazendo com que o fluido frigorigéneo condense e passe ao estado líquido. É de referir que o calor libertado no condensador corresponde, de forma global, ao somatório do calor retirado no evaporador com o calor introduzido no processo de compressão (Çengel, et al., 2001).

O líquido comprimido é então expandido através da utilização de uma válvula de expansão, que é basicamente um estrangulamento na tubulação, que, ao oferecer uma resistência ao escoamento, cria um diferencial de pressão entre a sua entrada e saída. Esta súbita queda de pressão faz com que parte do fluido na fase líquida entre em ebulição gerando-se assim uma mistura de líquido e vapor provocando um grande efeito de refrigeração (efeito de Joule-Thomson) (Çengel, et al., 2001).

A mistura de líquido e vapor entra então no evaporador onde irá passar ao estado gasoso através de ebulição. A energia necessária para promover esta ebulição é retirada do meio que se deseja arrefecer, e que, por conseguinte, está a uma temperatura mais alta do que do evaporador fornecendo-lhe o necessário calor latente de evaporação. No final do evaporador, todo o fluido encontra-se na fase de vapor (uma parte na zona de saturação e a parte final na de vapor sobreaquecido), o qual é aspirado pelo compressor, reiniciando-se assim um novo ciclo (Çengel, et al., 2001).

O processo atrás descrito representa um dos ciclos termodinâmicos de refrigeração (Anexo I) mais importantes, isto é, o que utiliza a compressão no processo de transferência de calor entre a fonte fria e a fonte quente.

Os ciclos termodinâmicos de fluidos refrigerantes em equipamentos frigoríficos são normalmente representados em diagramas **P x h** (pressão-entalpia – ou diagrama de Mollier) podendo-se também utilizar o diagrama **T x s** (temperatura-entropia), tendo este a particularidade de fornecer, de uma forma quase directa, através da área abaixo da curva, o calor trocado nos permutadores de calor.

Através do diagrama de Mollier presente na figura 1 verifica-se por um lado que a expansão se realiza isentalpicamente, uma vez que não há troca de calor nem de trabalho na válvula de expansão e por outro, que a compressão se realiza isentropicamente, ou seja, de forma adiabática reversível (sem atrito e sem trocas de calor com o exterior) e que as trocas de calor em ambos os permutadores se fazem de modo isobárico e isotérmico. Este ciclo tem como grandes óbices o facto de se correr o risco de no início da expansão nem todo o fluido estar no estado líquido, o que provoca ineficiências, e também a possibilidade do compressor aspirar algumas gotas de líquido que pode levar a avarias (Çengel, et al., 2001).

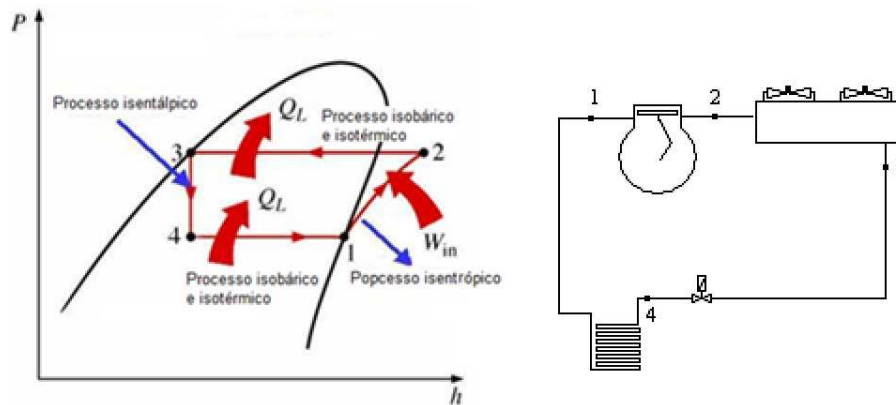


Figura 1 – Ciclo frigorífico clássico sem perdas

Fazendo um breve resumo dos vários processos constantes do ciclo frigorífico tem-se:

- **Estado 1-2:** o fluido frigorigéneo entra no compressor como vapor saturado, sendo comprimido isentropicamente até à pressão do condensador (a temperatura do fluido eleva-se bastante acima do valor do meio ambiente).
- **Estado 2-3:** o fluido entra no condensador na fase de vapor sobreaquecido e sai como líquido saturado, resultante da rejeição de calor para a vizinhança.
- **Estado 3-4:** devido à passagem por uma válvula de expansão ou tubo capilar o fluido é estrangulado até à pressão do evaporador. A temperatura do fluido diminui para um valor inferior ao da temperatura do meio arrefecido.
- **Estado 4-1:** o fluido, ao passar no evaporador a uma temperatura inferior à temperatura do meio a arrefecer, vai absorver energia na forma de calor, mudando de fase e aumentando a sua entalpia. Durante este processo e tal como acontecia no condensador, a temperatura mantém-se constante, o que é próprio dos fluidos em mudança de fase.

## 4. Os criogénicos

Actualmente entende-se por criogenia toda a técnica passível de ser usada na obtenção e na aplicação de temperaturas extremamente reduzidas, entre  $-150^{\circ}\text{C}$  e  $-196^{\circ}\text{C}$ , que não se encontram de forma natural nem no planeta Terra, nem no espaço envolvente (Arjárov, et al., 1990).

Os criogénicos são produtos obtidos e utilizados pela criogenia, sendo os seus principais compostos: o azoto, o dióxido de carbono, acetileno, árgon, oxigénio, hélio e hidrogénio.

A sua primeira utilização 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 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 (Praxair, sem data).

Carl von Linde criou o primeiro sistema contínuo de liquefacção 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 começo da indústria dos criogénicos.

Actualmente para possibilitar a separação do ar nos seus principais constituintes (azoto, oxigénio e árgon) é usado o processo de rectificação, ou destilação fraccionada, onde os seus constituintes são separados através dos seus diferentes pontos de ebulição. 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:  $132,5\text{K}$  ( $-140,7^{\circ}\text{C}$ ) e  $37,7$  bar.

As curvas de vapor críticas (Anexo II) relativas ao ar e seus principais constituintes, reflectem a temperatura e pressão à qual o gás condensa e o líquido evapora. A título de exemplo, para o início da condensação do ar à pressão atmosfera normal de 1bar, é

necessário arrefece-lo até uma temperatura de 81,5K (-192°C), no entanto caso se aumente a pressão para os 6 bar a temperatura necessário para o início da condensação reduz-se para 101K (-172,5C) (Linde, 2009). Estes valores podem ser confirmados através do anexo III.

Uma vez que o ar é constituído por inúmeros componentes, a sua curva de condensação não é colinear com a curva de ebulição. Assim, o ponto de condensação do ar nunca é igual ao seu ponto de ebulição (Linde, 2009).

#### 4.1. **Produção**

A produção de fluidos criogénicos passa fundamentalmente por dois processos distintos. Numa primeira fase há que proceder à condensação do ar através de ciclos específicos para o efeito, como é o caso do ciclo de Linde - Hampson. De seguida há que separar os constituintes presentes nessa mistura homogénea no estado líquido, onde se usa, por exemplo, a destilação fraccionada.

##### 4.1.1. Ciclo de Linde – Hampson

O sistema de Linde-Hampson é um sistema de liquefacção 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: compressor, permutador de calor, válvula de expansão e depósito.

O gás de reposição é introduzido no sistema imediatamente antes da unidade compressora onde é misturada com o fluido gasoso proveniente do depósito de líquido. 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 o rácio de pressão apresenta um valor muito alto, é necessário a utilização de vários andares de compressão (ETSIA-UPM, 2005; Dash, 2009).

Após a compressão, a mistura é limpa através de um conjunto de filtros onde as partículas sólidas, vestígios de fluido lubrificante e água são removidos (Twente, 2009). Caso estas partículas não fossem removidas poderiam colmatar ou mesmo bloquear quer o permutador de calor quer a válvula de expansão. De seguida o gás passa então pelo permutador de calor,

geralmente de fluxos cruzados, onde perde calor a uma pressão constante (2-3), aproximando-se da curva de saturação (ETSIA-UPM, 2005; Dash, 2009).

O fluido a alta pressão é expandido isentálpicamente (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 de fluxos cruzados onde absorve calor, reduzindo a temperatura do gás proveniente do compressor (ETSIA-UPM, 2005; Dash, 2009).

O vapor sobreaquecido é misturado com o ar exterior de reposição, recomeçando novamente o ciclo (ETSIA-UPM, 2005; Dash, 2009). O esquema do sistema e o ciclo termodinâmico, representado num diagrama T-s, encontram-se exemplificados na figura 2. No anexo 3 pode visualizar-se as curvas reais do diagrama T-s correspondentes ao ar. Através da sua consulta, verifica-se facilmente que a pressão atingida pelos andares de compressão pode ultrapassar os 40 bar.

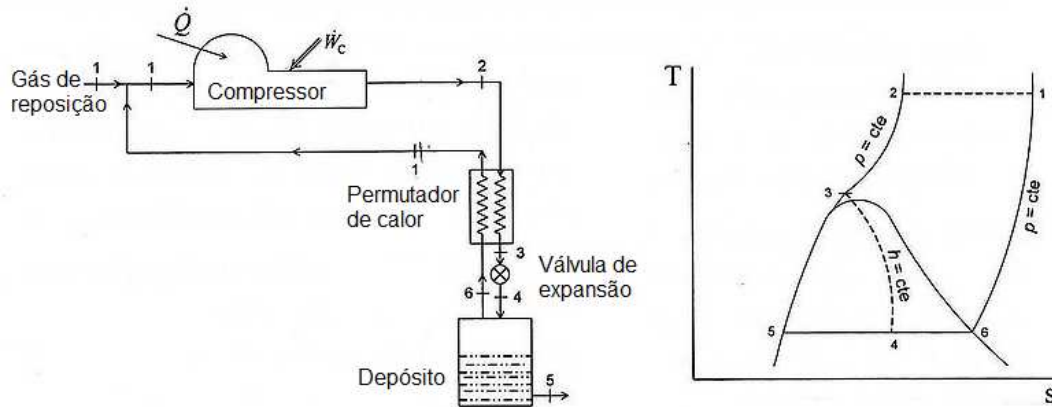


Figura 2 – Ciclo simples de Linde – Hampson (ETSIA-UPM, 2005)

A capacidade total diz respeito ao fluido no estado líquido extraído no ponto 5, ou seja:

$$Q_T = -\dot{m}_5 \times h_5$$

Aplicando a teoria do volume de controlo tem-se (considerando um permutador de calor ideal):

$$\dot{m}_2 \times h_2 = \dot{m}_1 \times h_1 + \dot{m}_5 \times h_5$$

Caso se introduza o conceito de fracção  $\lambda$ , fracção esta equivalente à caudal mássico de fluido que se extrai do ponto 5:

$$h_2 = \lambda \times h_5 + (1 - \lambda)h_1 \qquad \lambda = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_5}$$

Esta equação representa a equação do escoamento estacionário aplicada ao aparelho (Guerra, sem data).

A capacidade total do ciclo  $Q_T$  é dada por (Twente, 2009):

$$Q_T = \dot{m}_1 \cdot h_1 - \dot{m}_2 \cdot h_2$$

Caso o permutador de calor não seja ideal será (Twente, 2009):

$$Q_T = \dot{m}_1 \cdot h_6 - \dot{m}_2 \cdot h_4$$

#### 4.1.2. Destilação fraccionada

A destilação fraccionada é o método usado na separação de líquidos presentes numa mistura homogénea ou heterogénea. Assim, após se proceder à total condensação do ar através do processo atrás descrito, eleva-se a temperatura até que se alcance o ponto de ebulição do líquido que apresente o seu valor mais baixo, ou seja, até que o primeiro constituinte passe ao estado gasoso, para que se proceda a sua destilação e separação. Posteriormente, permite-se que a temperatura se eleve até o ponto de ebulição do segundo líquido, separando-o de seguida. Quanto mais próximos forem os pontos de ebulição dos líquidos, menor o grau de pureza das fracções destiladas uma vez que é mais difícil proceder à evaporação de um constituinte isolado (Kister, 1992).

O processo atrás descrito é na verdade o princípio básico da separação dos constituintes do ar. Na realidade o processo é um pouco mais complexo, sendo realizado na denominada coluna de destilação. A mistura de fluidos que provêm do processo de liquefacção, maioritariamente constituída por oxigénio e azoto, é admitida no equipamento de destilação fraccionada 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, subindo a coluna, enquanto que o oxigénio no estado líquido desce até à sua parte inferior (Kister, 1992).

A coluna está repleta de obstáculos que forçam o contacto entre o vapor de azoto que está a ascender e o oxigénio líquido que está em fase descendente, aumentando assim o rendimento

da separação e a consequente purificação dos dois componentes. 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 (Kister, 1992). Este sistema apenas permite a extracção de oxigénio puro uma vez que o azoto ainda possui cerca de 7% de oxigénio.

A destilação industrial, é tipicamente realizada em grandes colunas cilíndricas verticais denominadas torres/colunas de destilação/fraccionamento cujo diâmetro pode variar entre 65 cm a até 6m e altura entre 6 a 60m (Kister, 1992).

Na maioria dos casos, o processo faz-se em modo contínuo, onde o ar está a ser constantemente alimentado na coluna de destilação enquanto que os produtos estão a ser constantemente removidos.

Para aumentar o rendimento do processo e possibilitar uma dupla separação de oxigénio e azoto puros, as instalações industriais usam o denominado refluxo. Este refluxo é conseguido através de duplas colunas separadas por um permutador de calor, sendo que a superior é de baixa pressão e a inferior de alta pressão. O condensador promove um arrefecimento na base da coluna de baixa pressão enquanto que o calor transferido promove um aquecimento no topo da coluna de alta pressão, sendo o azoto, proveniente da coluna de alta pressão, o fluido usado para promover estas trocas (Kister, 1992).

A primeira parte do processo é semelhante à coluna simples, no entanto ao invés do azoto misturado com 7% de oxigénio ser extraído, é condensado novamente e reenviado para o topo da coluna superior onde o azoto vai passar ao estado gasoso, separando-se quase totalmente do oxigénio. Este acaba por sair da torre pela parte inferior no estado líquido, conseguindo-se assim um grande aumento da eficiência de separação (Linde, 2009).

A destilação fraccionada do ar apenas permite obter azoto, oxigénio e árgon, uma vez que o ar é maioritariamente constituído por estes elementos. O árgon é obtido a meio da coluna uma vez que tem o ponto de ebulição inferior ao oxigénio e superior ao azoto. O dióxido de carbono é obtido através de fontes naturais com hidrocarbonetos ou é formado como subproduto, sobretudo derivado de indústrias químicas e petroquímicas (Air\_liquide, 2010).

O dióxido de carbono sólido, ou neve carbónica, pode também produzido através do efeito de Joule-Thomson, onde após expandido através de uma válvula para a pressão atmosférica, se obtém uma mistura de duas fases, sólida na forma de neve carbónica e vapor saturado. Esta situação ocorre uma vez que a pressão atmosférica é mais baixa do que o ponto triplo desta substancia, ponto abaixo do qual, não pode existir líquido em fase estável (Guerra, sem data).

#### 4.2. **Utilização**

Os produtos criogénicos têm uma vasta utilização nas diversas áreas da indústria: agricultura, pecuária e pesca; alimentícia; construção civil; energia, gás e água; laboratorial; transportes; metalomecânica; metalúrgica; mineração; papel e celulose; química; reciclagem; têxtil e couro; tratamento sanitário e vidreira. A sua aplicação é muito ampla, sendo usados para acelerar ou interromper processos, aquecer, arrefecer, alterar e preservar produtos (Linde, 2005).

Relativamente à indústria alimentar, é muito frequente o uso de criogénicos, principalmente do dióxido de carbono e do azoto. O dióxido de carbono é aplicado sobretudo no arrefecimento de câmaras e contentores de transporte, através da neve carbónica ao mesmo tempo que cria um ambiente inerte. É também usado no processamento de alimentos em túneis de congelação para assegurar baixas temperaturas e uma atmosfera inerte que, inibe o crescimento microbiológico, conservando a qualidade final do produto. Com a utilização do azoto na congelação de géneros alimentícios, consegue-se uma rápida congelação, conseguindo-se manter as características do produto ao mesmo tempo que se evita a perda de peso (Linde, 2005).

As bebidas são muitas vezes protegidas da oxidação através do uso de azoto ou mistura entre azoto e dióxido de carbono, evitando-se 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 (Linde, 2005).

O hidrogénio é usado em produtos como margarinas, para converter óleos líquidos em gorduras, conferindo uma maior estabilidade à oxidação melhorando o sabor, odor e aumentando o período de armazenagem (Linde, 2005).

O oxigénio é muito usado na criação de peixes em viveiros, uma vez que trás benefícios na saúde, e apetite dos peixes resultando num aumento da sua produtividade. Nos viveiros de plantas é usado o dióxido de carbono para aumentar a sua concentração, no sentido de acelerar o processo de florescimento e conseqüente produtividade (Linde, 2005).

No caso específico do azoto, este é amplamente usado no processo de produção de amoníaco que por sua vez é usado na produção de fertilizantes, em produtos de limpeza e em processos específicos que requerem amoníaco, como sucede no ciclo frigorífico que tem esta substancia como fluido de trabalho. Uma outra aplicação do azoto que tem vindo a crescer de forma muito significativa, é o seu uso na congelação de corpos e de células humanas, como é o caso das células estaminais (Linde, 2005).

#### 4.3. **Análise termodinâmica ao processo de congelação**

Ao contrário do que sucede com o processo de congelação clássico, onde existem vários processos termodinâmicos ao longo do ciclo (processo isobárico, isotérmico, isentrópico e isentálpico), a transferência térmica entre o produto a congelar e o fluido criogénico é bastante simples tal como se pode verificar na figura 3.

De facto, e tendo como exemplo a utilização de azoto líquido, este ao entrar em contacto com o produto tende imediatamente a vaporizar devido ao grande diferencial térmico existente entre os dois intervenientes, uma vez que o azoto se encontra a  $-196^{\circ}\text{C}$  enquanto que o produto se encontra entre os  $10^{\circ}\text{C}$  e os  $15^{\circ}\text{C}$ .

O azoto, inicialmente no estado de líquido saturado (ponto 1), recebe calor durante o seu contacto com o produto. Como consequência, a temperatura do produto tende a baixar enquanto que o azoto passa progressivamente até ao estado de vapor saturado. A partir deste ponto, a temperatura do azoto começa a subir, entrando na zona de vapor sobreaquecido.

Esta transferência térmica iria ocorrer até se atingir o equilíbrio térmico entre o azoto e o produto, no entanto, na prática não é isto que ocorre, pois deixa-se de estabelecer contacto entre os dois intervenientes quando o azoto se encontra a cerca de  $-60^{\circ}\text{C}$  (ponto 2).

Este procedimento tem como objectivo diminuir o tempo de congelação do produto, ao proporcionar uma elevada taxa de transferência térmica, uma vez que esta taxa depende em

grande parte do diferencial térmico entre os intervenientes, de tal forma que, quanto maior é esta diferença, maior é a taxa de transferência de calor. O principal inconveniente está relacionado com o não aproveitamento de toda a capacidade de congelação do fluido criogénico, resultando num aumento do seu consumo e conseqüente custo de congelação.

O calor necessário para que o azoto vaporize (calor latente) é retirado ao produto, sendo que esta transferência térmica se faz à pressão atmosférica. Assim, segundo uma análise termodinâmica, esta permuta é feita totalmente segundo um processo isobárico e parcialmente de forma isotérmica.

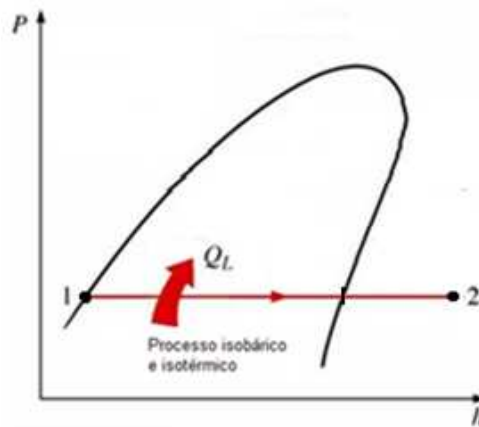


Figura 3 – Diagrama P-h do ganho térmico do azoto

#### 4.4. **Características**

Apenas se irão descrever as características físicas e químicas do azoto e do dióxido de carbono uma vez que apenas estes criogénicos fazem parte deste estudo.

##### 4.4.1. Azoto

Começando pelo azoto, este é um gás incolor e inodoro que representa 78,09% do volume total do ar. O azoto não é combustível nem é tóxico e comporta-se como um gás inerte perante a grande maioria das substâncias (Linde, 2005). A tabela 1 mostra as principais características físico-químicas do azoto, enquanto que na tabela 2 se disponibilizam os factores de conversão entre as principais propriedades deste elemento.

Tabela 1 – Características físico-químicas do azoto

<b>Azoto (Nitrogénio)</b>		
<b>Símbolo químico</b>		N <sub>2</sub>
<b>Massa molar</b>		28,01 g/mol
<b>Ponto Triplo</b>	<i>Temperatura</i>	62,3 K (-210,0°C)
	<i>Pressão</i>	125,3 mbar
	<i>Calor latente de fusão</i>	25,8 kJ/kg
<b>Ponto de ebulição a 1013mbar</b>	<i>Temperatura</i>	77,4 K (-195,8°C)
	<i>Calor latente de ebulição</i>	198,7 kJ/kg
<b>Ponto crítico</b>	<i>Temperatura</i>	77,4 K (-147,0°C)
	<i>Pressão</i>	34,0 bar
	<i>Densidade</i>	0,314 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Estado gasoso a 1bar e 15°C</b>	Densidade relativa ao ar	0,967

Fonte: (Linde, 2009; Praxair, sem data)

Tabela 2 – Factores de conversão para o azoto

<b>Azoto (Nitrogénio)</b>		
<b>m<sup>3</sup> gás (1 bar e 15°C)</b>	<b>Litros de gás em estado líquido (em equilíbrio a 1,013bar)</b>	<b>kg</b>
1	1,447	1,170
0,691	1	0,809
0,855	1,237	1

Fonte: (Linde, 2005)

#### 4.4.2. Dióxido de carbono

O dióxido de carbono é um gás incolor, inodoro e incombustível que representa 0,03% do volume total do ar. Apesar de não ser tóxico, deve-se evitar o contacto contínuo em concentrações superiores a 5000 ppm. A sua molécula é considerada como dinâmica uma vez que é reactiva a trocas de pH, é bacteriostática e fungistática (Linde, 2005). A tabela 3 mostra as principais características físico-químicas do dióxido de carbono, enquanto que na tabela 4 se disponibiliza os factores de conversão entre as principais propriedades deste elemento.

É porém de salientar que o fenómeno físico que está por detrás do arrefecimento causado pelo dióxido de carbono em estado sólido, vulgarmente reconhecido por neve carbónica, é a sublimação. Nesta mudança físico-química o CO<sub>2</sub> passa directamente do estado sólido para o estado gasoso, necessitando de um calor latente muito superior em relação ao azoto. À pressão atmosférica, não existe CO<sub>2</sub> em estado líquido.

Tabela 3 – Características físico-químicas do dióxido de carbono

<b>Dióxido de carbono (Anídrico carbónico)</b>		
<b>Símbolo químico</b>		CO <sub>2</sub>
<b>Massa molar</b>		44,01 g/mol
<b>Ponto Triplo</b>	<i>Temperatura</i>	216,58 K (-56,57°C)
	<i>Pressão</i>	5,19 bar
	<i>Calor latente de fusão</i>	196,7 kJ/kg
<b>Ponto de ebulição a 1013mbar</b>	<i>Temperatura</i>	194,67 K (-78,48°C)
	<i>Calor latente de sublimação</i>	573 kJ/kg
<b>Ponto crítico</b>	<i>Temperatura</i>	304,21 K (31,06°C)
	<i>Pressão</i>	73,83 bar
	<i>Densidade</i>	0,466 kg/dm <sup>3</sup>
<b>Pressão de condensação</b>		50,0 bar (a 15°C)
		58,8 bar (a 20°C)
<b>Estado gasoso a 1bar e 15°C</b>	Densidade relativa ao ar	1,528

Fonte: (Linde, 2005; Praxair, sem data)

Tabela 4 - Factores de conversão para o dióxido de carbono

<b>Dióxido de carbono (Anídrico carbónico)</b>		
<b>m<sup>3</sup> gás (1 bar e 15°C)</b>	<b>Litros de gás em estado líquido (em equilíbrio a 1,013bar)</b>	<b>kg</b>
1	1,569	1,848
0,637	1	1,178
0,541	0,849	1

Fonte: (Linde, 2005)

#### 4.5. **Azoto vs. Dióxido de carbono**

Como já se disse, na congelação de géneros alimentícios através da criogenia podem ser usados como fluidos congelantes o azoto e o dióxido de carbono. No entanto devido fundamentalmente às diferenças relativas aos calores sensíveis e latentes de cada elemento, o processo de congelação difere significativamente, resultando numa clara vantagem para a congelação que tem como base o azoto líquido, tal como se pode constatar na tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre azoto e dióxido de carbono líquido

	<b>Azoto líquido</b>	<b>Dióxido de carbono líquido</b>
<b>Segurança e ambiente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Um aumento de 2% na concentração não é perigoso para os humanos</li> <li>O azoto é mais fácil de conduzir ao exterior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limite de concentração de apenas 0,5%</li> </ul>
<b>Qualidade proporcionada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualidade superior devido ao menor tempo de congelação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Qualidade inferior devido ao maior tempo de congelação</li> </ul>
<b>Investimento inicial</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturas de congelação inferiores. Tamanho e custo do equipamento é menor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperaturas superiores. Tamanho do equipamento proporcionalmente superior</li> </ul>
<b>Custo de operação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aproximadamente 18% inferior,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mesmo sendo mais barato do que</li> </ul>

	devido à capacidade calorífica ser 18% superior	o N <sub>2</sub> , o custo de congelação pode ser superior uma vez que requer mais quantidade de fluido
<b>Custo de manutenção</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipamentos simples, requerem uma manutenção simples</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipamentos mais complexos exigem uma manutenção mais exigente</li> </ul>
<b>Dimensões do equipamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temperatura de trabalho mais reduzida resulta num tamanho mais reduzido, que pode chegar aos 50%,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tamanho superior, por ex. um túnel de 10m a N<sub>2</sub> consegue congelar a mesma quantidade que um túnel de 15m de CO<sub>2</sub></li> </ul>
<b>Flexibilidade operacional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mais simples de operar</li> <li>Pode operar de modo eficiente mesmo quando sai fora das especificações de projecto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ocupa mais espaço</li> <li>Menos “user-friendly”</li> <li>Tem de ser dimensionado para um produto e quantidade específicos.</li> </ul>

Fonte: (Matheson Tri Gas, sem data)

Tal como se pode verificar, a utilização do dióxido de carbono em túnel de congelação não apresenta uma imediata vantagem face ao azoto. De facto, não é muito corrente recorrer-se ao dióxido de carbono para proceder à congelação de géneros alimentícios.

No entanto pode haver excepções. Um exemplo típico é o uso de CO<sub>2</sub> num túnel de congelação com o intuito de promover uma atmosfera inerte que envolva todo o produto de forma a protegê-lo de bactérias tal como se disse atrás. As próprias moléculas de CO<sub>2</sub> que permanecem no interior do produto fornecem uma protecção adicional, após a sua congelação.

O CO<sub>2</sub> é particularmente indicado nas situações que exigem frio de forma rápida simples e eficaz e como tal é alternativa aos equipamentos tradicionais. É por isso usado em variadas situações tais como: em contentores de transporte, onde se consegue criar uma atmosfera inerte como também uma reduzida temperatura que possibilita o transporte de géneros alimentícios, no transporte e conservação de sêmen e nos tratamentos veterinários, na marcação animal, etc.

## 5. Estudo dos meios de congelação

Neste momento existe uma ampla variedade de técnicas que permitem congelar produtos. No entanto na hora de seleccionar qual a tecnologia a implementar, há que ter uma clara ideia das vantagens e desvantagens de cada uma, bem como do tipo de produto que se quer congelar, o que irá influenciar logo à partida a base da tecnologia de congelação a usar.

Podem dividir-se os meios de congelação em três grandes grupos: congelação por meio de sistemas frigoríficos, congelação por meio de salmoura e congelação por meio de criogenia. Há porém autores que dividem o processo de congelação rápida em outras categorias: em imersão, contacto directo e por jacto de ar.

Segundo Sethi (2007) a velocidade do processo de congelação influencia directamente a qualidade do produto uma vez está intimamente relacionado com o tamanho dos cristais de gelo. No processo lento os produtos alimentares são colocados em câmaras de congelação com temperatura entre  $-4^{\circ}\text{C}$  e  $-29^{\circ}\text{C}$ . Com estas condições a congelação pode demorar entre três a 72 horas sendo os tradicionais congeladores domésticos um bom exemplo deste tipo de método.

No caso do processo rápido, a temperatura do túnel de congelação é mantida entre  $-32^{\circ}\text{C}$  e  $-40^{\circ}\text{C}$ . Usa-se por exemplo para congelar frutas e vegetais em menos de 30 minutos. Os cristais de gelo formados, são consideravelmente inferiores quando comparados com o processo lento. 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 congelação.

O processo ultra-rápido é conseguido através de criogenia onde é usado azoto ou dióxido de carbono. Estes fluidos têm o ponto de condensação extremamente baixos que, no caso do azoto é de 77K ( $-196,15^{\circ}\text{C}$ ), enquanto que no dióxido de carbono é de 194,7K ( $-78,5^{\circ}\text{C}$ ). Os cristais de gelo formados têm um tamanho inferior aos obtidos na congelação rápida o que se traduz numa melhoria significativa na qualidade do produto, uma vez que este preserva a sua frescura de forma mais eficaz.

## 5.1. ***Congelação por meio de sistemas frigoríficos***

Nesta categoria, incluem-se todos os sistemas que utilizam a compressão clássica de fluido frigorígeno, inerente ao ciclo frigorífico atrás apresentado, para a produção de frio.

### 5.1.1. Túneis de ar clássicos

O túnel de congelação clássico é o mais utilizado a nível mundial devido principalmente à sua grande versatilidade uma vez que estes túneis podem congelar uma grande variedade de produtos com diversas formas e tamanhos.

Este tipo de túnel usa o ar como meio de transferência de calor entre o produto e o sistema de refrigeração que por sua vez funciona pelo método de compressão mecânica já descrito. A circulação de uma corrente contínua de ar frio sobre o produto é responsável pela sua congelação.

Para se obter um incremento na velocidade de congelação recorre-se ao fluxo turbulento de ar através do uso de ventiladores. No entanto a velocidade do escoamento de ar tem limites. Se por um lado grandes velocidades podem levar a uma excessiva evaporação de água presente na camada exterior do produto, por outro podem levar a um acréscimo de consumo energético por parte dos ventiladores que pode chegar aos 15%. Há ainda que garantir uma velocidade constante ao longo de todo o túnel de forma a possibilitar uma congelação uniforme em todo o produto (Johnston, et al., 1994).

Há dois tipos de túneis de ar clássicos: os contínuos e os descontínuos.

#### 5.1.1.1. *Túneis contínuos*

Neste tipo de túnel o produto é introduzido através de pequenos carros de transporte de paletes ou através de cintas transportadoras, sendo que normalmente o produto entra por uma ponta do túnel e sai pela extremidade contrária, num movimento que normalmente não é interrompido.

#### *5.1.1.1.1. Em carros de transporte*

O produto é carregado no túnel por meio pequenos carros de transporte, sendo que estes são progressivamente movidos ao longo do túnel à medida que carros adicionais são introduzidos (Anexo IV – figura 1).

É necessário ter uma atenção especial na fase de projecto pois é imperativo que o fluxo de ar gelado vindo do evaporador tenha o primeiro contacto com o produto já congelado, caso contrário este produto irá ser sujeito a um fluxo de ar mais quente, possibilitando a sua descongelação com todos os inconvenientes que isso acarreta.

Por outro lado de forma a promover a máxima eficácia na transmissão de calor entre o produto e o ar, deve-se usar o fluxo do escoamento em contra-corrente, isto é, o fluxo de ar deve ter um sentido contrário ao movimento do produto. Estes carros de transporte estão normalmente assentes em carris.

#### *5.1.1.1.2. Em cintas transportadoras*

Este túnel de congelação é o mais usual e tem normalmente um tamanho inferior à configuração anterior, no entanto o seu comprimento pode ser superior. Apenas deve ser usado quando o produto poder ser congelado rapidamente (menos de 30 minutos), caso contrário a cinta torna-se demasiado extensa.

Caso seja necessário, pode também ser usada uma cinta dupla ou tripla, no sentido ida-volta-ida, de forma a possibilitar uma redução no comprimento do túnel (Anexo IV – figura 2).

#### *5.1.1.1.3. Em espiral*

Existem algumas variedades de desenho deste tipo de congelador clássico, sendo que uma delas é apresentada no anexo IV (figura 3). É tradicionalmente usado em produtos onde é necessária a sua congelação individual como é o caso de bolos, alguns tipos de camarão, panificação, etc.

#### *5.1.1.2. Túneis descontínuos*

Estes túneis são normalmente usados quando existe a necessidade de congelar grandes quantidades de produtos de uma só vez, sendo que a sua configuração é muito semelhante ao

túnel de congelação com carros de transporte, apenas com a diferença que, normalmente, apenas existe uma porta de acesso onde o produto entra e sai.

Podem ser usadas paletes, para carregar totalmente o túnel, sendo posteriormente descarregado quando todo o produto estiver congelado. No anexo IV (figura 4) mostra-se outra configuração possível além da mostrada nos túneis contínuos em carros de transporte.

### 5.1.2. Armários de placas

No congelamento de pescado, os armários de placas e os congeladores clássicos são os tipos mais usados na indústria alimentar. Estes armários não têm a versatilidade dos túneis clássicos mas permitem congelar o produto em formas homologadas que normalmente são blocos regulares de forma paralelepípedica. É também denominada por congelação por contacto directo, sendo que o contacto pode ser único ou duplo, dependendo do número de placas em contacto com o produto.

Existem duas versões possíveis, a horizontal e a vertical sendo determinada pela disposição das placas. O produto é introduzido entre as placas, as quais são ajustadas individualmente através de um sistema hidráulico (Johnston, et al., 1994).

#### 5.1.2.1. *Placas Horizontais*

As placas horizontais (Anexo IV – figura 5) são usadas para dois fins principais: congelamento de produtos pré-embalados em caixas e congelamento de blocos homogéneos de filetes de peixe para a posterior preparação das suas porções para venda.

A espessura do produto final está normalmente compreendida entre 32 e 100 mm, sendo que não há contacto directo entre o peixe e as placas caso este seja sempre pré-embalado antes do processo de congelação (Johnston, et al., 1994).

#### 5.1.2.2. *Placas Verticais*

A vantagem das placas verticais prende-se com a possibilidade do produto poder ser congelado directamente sem a necessidade da sua pré-embalagem. O espaço existente entre

as diversas placas verticais e a parte inferior forma uma espécie de caixas de congelação, onde o produto é inserido e congelado (Anexo IV – figura 6).

É muito usado em navios de pesca, onde o produto é imediatamente congelado após a sua captura, sendo que a espessura existente entre as placas pode variar entre 25 e 130 mm, enquanto que o comprimento e largura podem atingir valores entre 0,5 e 1 m respectivamente (Johnston, et al., 1994).

## 5.2. **Salmouras**

A salmoura é tradicionalmente a mistura de água com sal e é normalmente usada para congelar pescado como por exemplo sardinhas. Neste banho, ao mesmo tempo que se congela, salga-se o produto, uma vez que há contacto directo com o fluido rico em sal.

Estes banhos podem no entanto ser usados noutros produtos como é o caso do leite e de outros líquidos, arrefecimento de determinados produtos químicos, tratamento de vinhos, etc. Para isso podem ser usados outros solutos tais como álcool e cloreto de cálcio. É importante referir que este último nunca entra em contacto com o produto alimentar uma vez que tem um cariz tóxico (Sethi, 2007). No anexo V mostra-se uma tabela com as várias propriedades da salmoura, das quais se destacam o ponto de congelação e a concentração (Creus, 1978).

O princípio de funcionamento dos tanques de salmoura é muito simples, sendo muitas vezes denominados de sistemas indirectos uma vez que contêm no seu interior uma serpentina, que por sua vez é o evaporador do sistema de compressão clássico. É esta serpentina que mantém a salmoura na sua temperatura de trabalho.

Uma vez que o fluido se encontra no estado líquido, consegue proporcionar um bom contacto térmico com o produto ao mesmo tempo que favorece uma rápida permuta de calor, resultando numa congelação rápida e eficiente. A principal desvantagem prende-se com a perda de alguns sucos através de osmose, o que pode ser extremamente desaconselhável em alguns produtos (Dossat, 1980).

Tipicamente estes tanques de salmoura (Anexo VI) não são produzidos industrialmente, sendo necessária a sua construção no próprio local. A sua estrutura é normalmente de alvenaria mas pode também ser de chapa de ferro devidamente isolada. Caso sejam

construídos em alvenaria, deve ser utilizado betão armado e bem compactado para que se evite a formação de porosidades que podem levar a perdas de fluido e infiltrações devido ao fluido a reduzida temperatura que contém no seu interior (Creus, 1978).

### 5.3. Congelação criogénica

A congelação criogénica utiliza fluidos no estado líquido que são excelentes condutores de calor quando comparados com gases, resultando num aumento da velocidade de congelação quando comparada com a congelação mecânica. A criogenia possibilita ainda transferências térmicas muito grandes com investimentos razoáveis.

Existe uma enorme quantidade de equipamentos com a finalidade de promover uma congelação eficaz através da utilização de fluidos criogénicos.

Na figura 4 é mostrada detalhadamente a classificação destes equipamentos, sendo que podem ser divididos em duas partes: por contacto directo e indirecto.



Figura 4 – Classificação dos equipamentos criogénicos (Khadatkar, et al., 2004)

#### 5.3.1. Congeladores de contacto directo

Uma vez que os fluidos no estado líquido são excelentes condutores de calor quando comparados com os gases, o contacto directo e envolvente entre o fluido refrigerante e o produto disponibiliza uma congelação mais rápida. Pode no entanto ser obtido um ganho na transferência de calor através do uso de técnicas de fluxo turbulento (Khadatkar, et al., 2004).

### *5.3.1.1. Congelador de imersão*

Este tipo de equipamento tem uma enorme capacidade de permuta de calor, uma das mais elevadas, 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. Esta congelação pode ser feita por meio de cintas transportadoras ou por espiral (Khadatkar, et al., 2004).

#### *5.3.1.1.1. Congelador de imersão por cintas transportadoras*

Por sua vez os congeladores deste tipo são divididos pela sua disposição longitudinal, podendo ser verticais ou horizontais (Anexo VII – figura 1 e 2).

Este tipo de equipamento consiste fundamentalmente num sistema de transporte dos géneros alimentícios, bem como num sistema de controlo de velocidade da cinta e do fluxo de reposição do fluido criogénico. Em ambos os casos o tapete transportador com o produto a congelar passa pelo banho de LN<sub>2</sub>.

O tempo em que o produto está em contacto com o fluido pode ser ajustado através da velocidade do tapete, enquanto que o azoto gasoso é libertado como desperdício para a atmosfera. O desenho deste tipo de equipamento bem como o seu controlo são relativamente simples e não tem o problema de transporte manual do material ao longo do processo. Facilmente se consegue uma enorme quantidade de produto congelado num espaço relativamente reduzido, o que beneficia pequenas indústrias.

Este processo ajuda a preservar o sabor, humidade e evita perdas de peso, no entanto a qualidade da textura do produto é afectada devido ao choque térmico. Embora os princípios de funcionamento dos dois equipamentos sejam semelhantes, o vertical tem a grande vantagem de ocupar uma menor área e de necessitar de uma menor potência quando comparada com o congelador horizontal de igual capacidade. (Khadatkar, et al., 2004)

#### *5.3.1.1.2. Congelador de imersão em espiral*

Este equipamento é constituído por um cinto de transporte em espiral em volta de um tambor central que por sua vez se encontra dentro de uma caixa, de forma cúbica ou cilíndrica, bem

isolada. Esta caixa contém no seu interior fluido criogénico no estado líquido por onde passa o cinto de transporte do produto.

Normalmente o produto entra pelo topo da espiral e sai, já congelado, pelo fundo da caixa. O uso do congelador por imersão tem duas desvantagens, nem a taxa de congelamento do produto nem os danos provocados nas células podem ser controlados (Khadatkar, et al., 2004).

### *5.3.1.2. Congelador por pulverização*

A imersão directa no fluido causa uma rápida queda na temperatura do produto muitas vezes excessiva o que pode levar ao aparecimento de defeitos tais como danos na textura do produto (Khadatkar, et al., 2004). Apesar disto, alguns congeladores modernos por imersão continuam a ser usados em determinadas aplicações.

A técnica de congelação criogénica por pulverização é muito menos severa para o produto, sendo por isso usada mais frequentemente, quer na versão em túnel quer na versão em espiral. De facto, ambas são muito populares neste segmento de indústria (Khadatkar, et al., 2004).

O custo de congelação neste tipo de congelador 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 (Khadatkar, et al., 2004).

#### *5.3.1.2.1. Congelador por pulverização em túnel*

O túnel por pulverização (Anexo VII – figura 3) divide-se em três partes, uma secção de pré-arrefecimento, uma de congelação e outra de equilíbrio térmico.

Na primeira, o produto transportado pela cinta entra em contacto com o fluxo em contra corrente de nitrogénio na fase gasosa a uma temperatura próxima dos 223K, ou seja, -50°C. À medida que o produto avança no túnel, o nitrogénio gasoso congela-o parcialmente retirando-lhe até 50% do seu calor. O produto passa então para a secção de congelação onde é borrifado com gotículas de nitrogénio líquido, perdendo o restante calor através da mudança

de estado do fluido refrigerante. A última secção do túnel disponibiliza alguns segundos para que a temperatura do produto estabilize atingindo o equilíbrio (Khadatkar, et al., 2004).

Pode haver duas configurações neste túnel, a horizontal e a vertical. Enquanto que a horizontal necessita de ventiladores na secção de pré arrefecimento para promover um escoamento turbulento, aumentando as trocas de calor, o vertical não necessita de tais componentes uma vez que o próprio gradiente vertical de temperatura se encarrega de tal função. (Khadatkar, et al., 2004)

#### *5.3.1.2.2. Congelador por pulverização em espiral*

Este congelador tem uma forma muito semelhante ao congelador de imersão em espiral. É constituído por um grande tambor circular ou quadrado que é envolvido pela cinta transportadora desde o topo até fundo. O produto é pulverizado directamente com gotículas de fluido criogénico a fim de lhe retirar o seu calor, principalmente pela via do seu calor latente.

Este congelador por pulverização em espiral (Anexo VII – figura 4) é mais económico do que a pulverização em túnel da mesma capacidade, uma vez que tem um menor consumo de fluido criogénico e um menor custo de operação. No entanto a taxa de remoção de calor é inferior a outras soluções criogénicas. A sua cinta transportadora pode ter um comprimento superior a 100 metros, o que possibilita altas taxas de produção (Khadatkar, et al., 2004).

#### 5.3.2. Congeladores de contacto indirecto

Neste tipo de equipamento, o fluido criogénico não entra em contacto com o produto, uma vez que há uma separação física de metal entre eles, sendo que a transferência de calor ocorre principalmente por condução. Estes congeladores têm inúmeras vantagens das quais se destacam (Khadatkar, et al., 2004):

- Há menor possibilidade de ocorrer queimaduras frias e desidratação no produto uma vez que não existe contacto directo entre este e o fluido refrigerante;
- A temperatura dentro do congelador pode ser controlada através da regulação da válvula solenóide, resultando numa melhoria significativa na poupança do fluido refrigerante e consequentemente do seu custo;

- As câmaras frigoríficas são compactas e por isso fáceis de instalar;
- Como o desenho do sistema é muito simples e robusto, quando aliados a uma cuidada selecção de componentes, assegura-se muitos anos de fácil operação sem grandes problemas de manutenção;
- Ocupa uma área de espaço reduzida.

No entanto tem uma grande desvantagem uma vez que a sua produção encontra-se limitada a algumas centenas de quilos de produto por hora. Dependendo do tipo de aplicação, pode ser usado LN<sub>2</sub> como também LCO<sub>2</sub>. Existem duas configurações possíveis, a vertical e a horizontal.

#### *5.3.2.1. Congelador vertical*

Este tipo de sistema (Anexo VII – figura 5) tem um volume que normalmente não excede os 500 litros. Este equipamento requer mais espaço para a abertura de portas do que o congelador horizontal, no entanto oferece uma maior facilidade na introdução e remoção dos géneros alimentícios (Khadatkar, et al., 2004).

#### *5.3.2.2. Congelador horizontal*

Este equipamento (Anexo VII – figura 6) tem geralmente um volume compreendido entre os 100 e os 700 litros armazenando cerca de 20% mais produto do que o congelador vertical (Pruthi, 1999). Tem como desvantagem o difícil acesso ao material que foi depositado em primeiro lugar, dificuldade semelhante às existentes nas arcas congeladoras domésticas (Khadatkar, et al., 2004).

### **5.4. Congelação mista**

A criogenia e a congelação clássica são técnicas distintas que possuem o seu próprio campo de actuação na congelação de géneros alimentícios onde cada uma delas possui as suas vantagens e os seus inconvenientes.

A congelação mista (Anexo VIII) é uma técnica de congelação, que tem como objectivo o aproveitamento das vantagens oferecidas pela congelação clássica e pela criogénica. O seu principio de funcionamento é a junção destes dois túneis, num só, de forma a que o produto

passa 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 (Miakawa, 2001).

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, obtendo-se uma qualidade semelhante a um túnel criogénico. Por outro lado, evita-se a vaporização de água da camada exterior do produto, resultando numa diminuição de perdas bem como uma diminuição do congelamento nos evaporadores devido à redução da humidade (Miakawa, 2001).

Se a criogenia vier a seguir ao frio mecânico, consegue-se um expressivo aumento da capacidade de produção, que pode mesmo a duplicar, mantendo um baixo consumo de azoto. Este aumento de produção pode ser especialmente relevante para incrementos sazonais de produto a congelar (Miakawa, 2001).

## 6. A congelação

A congelação é considerada como o processo mais inofensivo de preservação sendo uma excelente forma de aumentar a imunidade a todos os géneros alimentícios, desde frutas, vegetais, carne ou peixe, quer seja a nível doméstico como a nível comercial e industrial. No entanto este processo não esteriliza o produto, ou seja, não elimina os seus microrganismos.

As reduzidas temperaturas retardam o crescimento dos microrganismos, abrandando as mudanças que causam perda de qualidade nos produtos. A grande maioria dos géneros alimentícios preservam as suas principais características (cor, textura, oleosidade e sabor) de forma mais eficiente e prolongada do que todos os outros métodos existentes (Sethi, 2007; Kondratowicz et al., 2002).

A velocidade de congelação depende da diferença de temperatura entre o produto e o meio refrigerante, velocidade do ar, tamanho, forma e propriedades da embalagem ou espessura do produto, tipo e composição do produto e do meio refrigerante (Sethi, 2007).

### 6.1. *Mudanças ocorridas durante a congelação*

O processo de congelação consiste fundamentalmente no congelamento da água contida nos produtos. Na figura 5 mostra-se a evolução da temperatura da água ao longo do tempo e de uma solução aquosa que simula o congelamento de um produto alimentar.

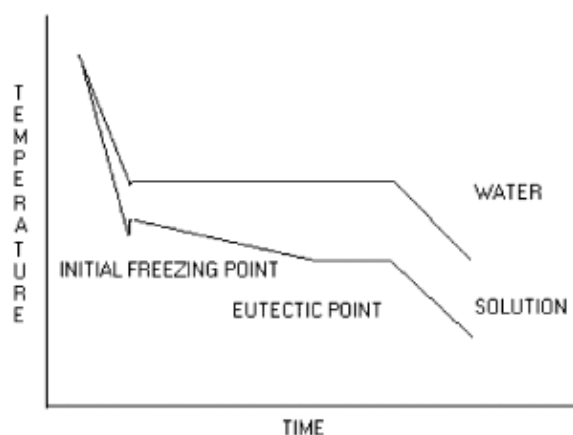


Figura 5 – Diagrama de congelação de água e de uma solução aquosa (Khadatkar, et al., 2004)

Pode dividir-se a análise da congelação 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 congelação. O ponto de congelação destes produtos depende da concentração de substâncias dissolvidas e não do teor de água (Dinçer, 2003). 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 (Khadatkar, et al., 2004).

Durante a mudança de fase do produto ocorre a denominada cristalização que mais não é do que a formação de 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 directa 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. No entanto, se a taxa de remoção de calor for rápida, forma-se uma grande quantidade de núcleos impossibilitando o seu crescimento, resultando num tamanho final muito reduzido (Kondratowicz et al., 2002; Khadatkar et al., 2004).

Segundo Dossat (1980) a faixa de temperaturas entre os 0°C e os -4°C é crítica porque é nela que 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.

Além da formação de cristais, há também mudanças químicas, que afectam a qualidade dos produtos, sendo a oxidação a mais relevante. Se for deixado ar em contacto com os produtos congelados, irá ocorrer oxidação, especialmente na parte do produto que contém mais gordura. Por outro lado pode também haver deterioração devido à actividade enzimática, embora esta seja limitada pelas baixas temperaturas. Esta actividade enzimática causa alteração da cor durante o processo de congelação, no entanto podem ser usados métodos para reduzir tal actividade, como por exemplo a adição de ácido ascórbico nas frutas (Sethi, 2007).

## 6.2. **Consequência dos cristais de gelo**

Os cristais de gelo influenciam directamente a qualidade do produto, pelo que se deve dar grande atenção ao seu número e ao seu tamanho. A formação de cristais é a principal razão pela qual se deve evitar sucessivas congelações de produtos alimentares (Khadatkar, et al., 2004).

Se a congelação for demorada, são formados grandes cristais de gelo, que provocam a ruptura das paredes e tecidos celulares o que impossibilita a retoma da sua forma original além de perder matérias orgânicas e proteicas perdendo qualidade e valor alimentar. Por outro lado, se o produto é congelado de forma rápida, os cristais de gelo não tomam uma dimensão muito grande, possibilitando a reabsorção da água por parte das células quando se procede à descongelação, evitando-se assim a perda de qualidade e de peso do produto, factor extremamente importante para todos os comerciantes (Kondratowicz et al., 2002; Khadatkar et al., 2004; Kock et al., 1995; Pereda et al., 2005).

De facto, de acordo com diversos autores, os produtos celulares podem perder entre 3% a 5% de peso quando congelados pelo método clássico, dependendo do tipo de produto, enquanto que através da criogenia podem perder apenas 0,5% (Kock, et al., 1995; Khadatkar, et al., 2004). Esta diferença deve-se tanto à diferença de tamanho dos cristais de gelo como à acção de secagem provocada pelas rajadas de ar existentes no método clássico.

A figura 6 é uma ampliação a 27x de carne congelada, que neste caso é um hambúrguer, a  $-18^{\circ}\text{C}$ . A congelação rápida durou sete minutos, enquanto que a lenta durou três horas. Pode observar-se a nítida diferença de tamanho dos cristais de gelo, a branco (Ahmedabad, 2008).

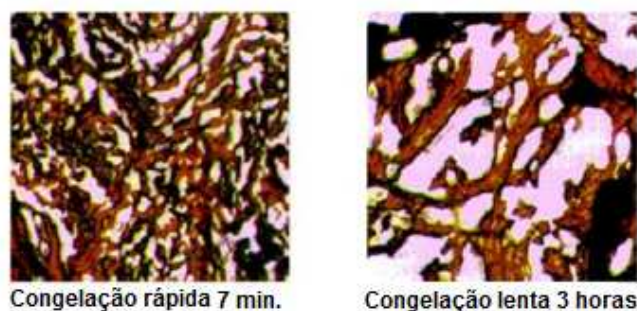


Figura 6 – Comparação entre os cristais de gelo (FMV food tech)

Através de uma análise microscópica mais profunda, (Anexo IX), é possível verificar a diferença de danos nas células quando congeladas de forma lenta e rápida respectivamente.

Os grandes cristais de gelo provocam uma perda de peso do produto tanto ao longo da sua armazenagem como na sua descongelação, enquanto que as rajadas de ar aumentam a taxa de vaporização de água no produto (Khadatkar, et al., 2004).

Assim, no processo de congelação é preferível a formação de pequenos cristais especialmente em produtos que tenham tendência para a perda de água, como é o caso do pescado (Khadatkar, et al., 2004).

Segundo Dossat as plantas, vegetais e frutas, são mais sensíveis aos cristais de gelo uma vez que as suas células não são tão flexíveis como as células da carne e peixe. No entanto isso não justifica que não se use a criogenia neste tipo de alimentos.

A título de exemplo, se o congelamento de aves for feito lentamente, além de provocar uma perda de produto devido ao gotejamento, provoca uma aparência escura na carne. Apesar desta cor escura não afectar o sabor, odor e textura, torna-a muito menos atractiva ao consumidor reduzindo o seu valor comercial. Uma forma de diminuir este escurecimento é realizar um pré-cozimento antes da congelação de aves (Roça, sem data).

### **6.3. *Velocidade da frente de frio e outras características***

Tal como o nome indica, a velocidade da frente de frio, diz respeito à rapidez com que o produto passa ao estado sólido desde a parte externa até à zona interna do produto.

Boonsumrej, e os seus colaboradores (2007) estudaram os efeitos do método e da condição da congelação no processo tradicional e no processo criogénico. Nesse estudo o túnel de congelação mecânica ou clássica encontrava-se a uma temperatura de  $-28^{\circ}\text{C}$ , sendo que os vários ensaios foram feitos com três velocidades de fluxo de ar: 4, 6 e 8 m/s. Por sua vez, a congelação pelo processo criogénico foi feita com o interior do túnel a quatro temperaturas diferentes:  $-70$ ,  $-80$ ,  $-90$  e  $-100^{\circ}\text{C}$  numa câmara de ensaios de crio-congelação existente nos EUA, onde se usou o azoto líquido como fluido criogénico. Este método de congelação foi também usado na análise e influência do tipo de descongelação nos camarões que será objecto de estudo no próximo subcapítulo.

A velocidade da frente de frio ou taxa de congelação foi calculada pela seguinte expressão (Pan, et al., 1993) citado por (Boonsumrej, et al., 2007):

$$\text{Taxa de congelação (cm/h)} = \frac{\text{Mínima distancia entre superficie e o centro camarão (cm)}}{\text{Tempo necessário (h) para atingir } -18^{\circ}\text{C}}$$

Neste estudo foram também determinados outros parâmetros tais como a percentagem de perdas de peso do produto congelado e a força de corte necessária para talhar as amostras de camarão já descongeladas.

Para a determinação da percentagem de perda de peso do produto foi usada a expressão proposta pela Associação de Químicos Oficiais Analíticos (1995) citado por Boonsumrej, et al (2007):

$$\text{Perda de produto (\%)} = \frac{\text{Peso do produto inicial} - \text{peso do produto final}}{\text{peso do produto inicial}} \times 100$$

O peso do produto inicial diz respeito à fase imediatamente antes da entrada no processo de congelação, enquanto que o peso final é aferido imediatamente após o processo de congelação.

O produto foi descongelado numa sala com temperatura controlada até atingir os 20°C. A força de corte foi medida através de um analisador conectado a uma lâmina cortante e a uma célula com uma carga máxima de 25kg. O valor mais elevado necessário para cortar transversalmente o segundo segmento do corpo do camarão foi guardado.

Os camarões que foram congelados tradicionalmente ficaram expostos a uma velocidade de frente de frio entre 6,8 a 7,4 cm/h ao passo que os congelados criogenicamente ficaram expostos a uma velocidade de frente de frio entre 11,8cm/h a 22,0cm/h tal como se demonstra na tabela 6, onde se mostra também a perda de produto e força de corte.

Tabela 6 – Tempo de congelação, taxa de congelação, perda de produto e força de corte de camarões congelados tradicionalmente e criogenicamente.

Método de congelação	Tempo de congelação (s)	Taxa de congelação (cm/h)	Perda de produto (%)	Força de corte (N)
<b>Tradicional com a seguinte velocidade de fluxo de ar:</b>				
4 m/s	371,25±7,50	6,85b±0,10	2,71b±0,30	19,29c±0,36
6 m/s	363,75±7,50	6,90b±0,12	2,14b±0,29	21,36b±0,17

8 m/s	333,75±7,50	7,42a±0,14	3,43a±0,53	22,49a±0,30
<b>Camarões frescos</b>				21,57b±0,88
<b>Criogénica com a seguinte temperatura:</b>				
-70°C	213,75±14,36	11,82c±0,79	1,83a±0,01	22,45bc±0,86
-80°C	191,25±14,36	13,26c±0,93	1,81a±0,00	22,77b±0,61
-90°C	153,75±14,36	16,25b±1,29	1,75a±0,01	23,78a±0,37
-100°C	116,25±14,36	21,98a±2,74	1,75a±0,13	18,56d±0,14
<b>Camarões frescos</b>				21,57c±0,88
<b>Pontuações com letras diferentes na coluna são significativamente diferentes (<math>P \leq 0,05</math>)</b>				

Fonte: (Boonsumrej, et al., 2007)

No caso da congelação clássica, desde logo se percebe que a velocidade de 6m/s é a que oferece melhor compromisso entre a velocidade de congelação e a perda de produto, logo esta é a velocidade ideal para o congelamento de camarão num túnel mecânico.

Já a congelação criogénica apresenta como temperatura ideal os -70°C, uma vez que é a que obtém uma força de corte no camarão mais próxima do ideal. Assim os -70°C é a temperatura considerada, para o interior do túnel de congelação criogénica.

É possível verificar a grande diferença existente entre as taxas médias de congelação tradicional e a criogénica que neste caso se situa na ordem dos 8,7cm/h. Por seu lado, a diferença de perda de produto média é de 0,98%, com vantagem para a crio-congelação uma vez que esta apresenta os valores mais reduzidos devido às razões já descritas.

#### 6.4. ***Influência do ciclo congelação/descongelação***

A descongelação tal como sucede com a congelação, introduz danos resultantes de mudanças físicas, químicas e biológicas, pelo que se torna importante a análise deste fenómeno.

Boonsumrej, e os seus colaboradores (2007) analisaram dois processos de descongelação diferentes, através da utilização de microondas e pelo processo clássico através do repouso do produto numa câmara refrigerada. Para isso, congelaram o produto conforme descrito no ponto 6.3. onde ficou armazenado durante três dias a uma temperatura estabilizada de -20°C antes de ser descongelado até à temperatura do centro do camarão atingir 0°C. Foram usados dois métodos de descongelação: através de microondas, modelo R-251 cuja potência de descongelação representou 70% da potência máxima de 800W ou através de uma câmara de descongelação com uma temperatura controlada de 5°C.

Os camarões já descongelados foram divididos em duas partes, a primeira foi imediatamente analisada (ciclo 0) enquanto que a segunda é congelada novamente a uma temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$ , armazenada durante 3 dias e descongelada pelos dois processos de modo a analisar-se o ciclo congelação/descongelação. No total foram efectuados e analisados quatro ciclos de congelação/descongelação. Este ciclo pretende simular a descongelação do produto muitas vezes realizada durante o seu transporte e armazenagem, devido às quebras da cadeia de frio.

Os resultados obtidos constam nas figuras 7 e 8 onde se visualiza a percentagem de perdas de massa e força de corte necessária ao camarão, devido ao tipo de descongelação quando este foi submetido quer à congelação clássica com velocidade de ar de  $6\text{m/s}$ , quer à congelação criogénica com temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$ .

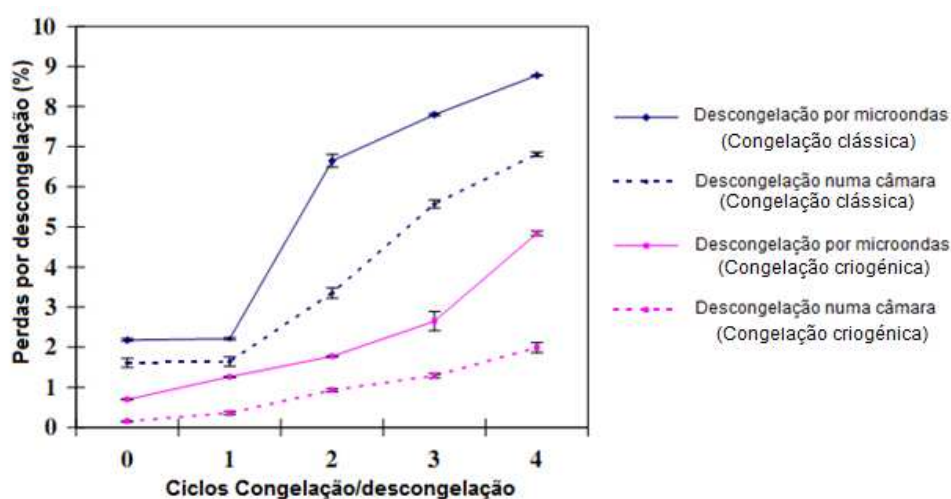


Figura 7 – Perdas de produto por tipo de descongelação (Boonsumrej, et al., 2007)

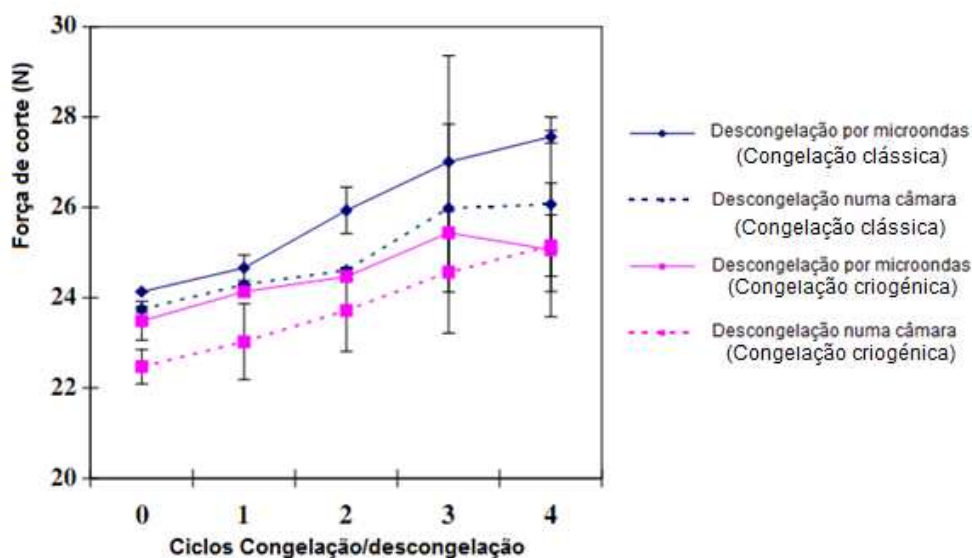


Figura 8 – Força de corte necessária ao produto (Boonsumrej, et al., 2007)

As amostras sujeitas à descongelação por microondas possuem uma maior percentagem de perdas em qualquer um dos ciclos, quando comparadas com a descongelação mais lenta na câmara refrigerada. Uma possível explicação, prende-se com o facto das micro-ondas proporcionarem uma descongelação mais rápida, devido às elevadas temperaturas, o que provoca uma maior vaporização da água contida nas amostras e como consequência a sua perda de massa.

Por outro lado, os tecidos do produto ao serem sujeitos às microondas, submetem-se a uma não homogeneização dos mesmos, ou seja, há o aparecimento de zonas congeladas e descongeladas, favorecendo a distribuição não uniforme dos lípidos. Estas zonas diferem muito quanto à capacidade de absorver energia via radiofrequência, o que leva ao aparecimento de zonas super aquecidas antes da total descongelação do produto (Fennema et al, 1975 citado por Boonsumrej et al., 2007), resultando assim numa maior tendência a perdas de água.

Este processo de microondas ao proporcionar uma elevada velocidade de descongelação pode também provocar mudanças estruturais nas moléculas e formas assimétricas nas amostras (Srinivasan et al, 1997 citado por Boonsumrej et al., 2007).

Em especial nos produtos frescos, onde a textura tem uma grande importância, o processo de descongelação lenta num ambiente frio é preferível pois dá tempo para que a água descongelada seja reabsorvida pelos tecidos que não estão danificados (Jul, 1984 citado por Boonsumrej et al., 2007).

Na figura 7, observa-se que o produto ao ser submetido a dois ciclos, ou seja, ao ser congelado criogenicamente e descongelado via microondas três vezes seguidas, continua com perdas inferiores a uma só congelação clássica/descongelação. Esta análise é ainda mais expressiva caso o produto seja submetido a quatro congelações criogénicas e 4 descongelações em câmara de refrigeração, onde continua a ter perdas inferiores a uma só congelação clássica/descongelação lenta.

Com o aumento do número de ciclos congelação/descongelação, resulta um aumento das perdas do produto bem como da força de corte necessária uma vez que a repetição dos fenómenos negativos (descongelação e reformação dos cristais de gelo) ao longo da

congelamento e descongelamento leva a uma deterioração do tecido muscular causando danos mecânicos severos nas paredes celulares e na capacidade que as células têm de reter a água. No entanto o método de descongelamento não tem uma influência significativa na força de corte (Boonsumrej, et al., 2007).

Também na análise à força de corte se verifica que a congelamento criogénica obtém melhores resultados do que a congelamento clássica, pois apresenta valores mais próximos do ideal de 21,6 N qualquer que seja o número de ciclos.

### 6.5. **Qualidade obtida por Congelamento clássica e Congelamento criogénica**

Como já se disse, um dos principais objectivos deste estudo é a comparação de qualidade obtida no camarão quando sujeito a um processo de congelamento clássica ou criogénica.

Infelizmente não se conseguiu encontrar um estudo comparativo entre os diferentes processos de congelamento no caso específico do camarão. No entanto há estudos que realizam esta comparação num produto celular, que é o caso do camarão, (batata fria) e num produto não celular (pizza).

Este estudo foi feito por Koch e seus colaboradores (1995) onde se comparou a qualidade das batatas fritas quando submetidas a diferentes processos de congelamento, imediatamente após a congelamento e após o seu armazenamento de 12 semanas a -18°C. Parte do seu estudo está resumido na tabela 7, onde foram seleccionados 60 consumidores para formarem o júri. Cada elemento teria de descrever as diferentes características através de pontuações de 1 a 7.

Tabela 7 – Pontuações médias das características da batata frita congelada por diferentes métodos, imediatamente após a sua congelamento e após um armazenamento de 12 semanas a -18°C.

<b>Característica</b>	<b>Tipo de Congelamento</b>	<b>Pontuação Média imediatamente após congelamento</b>	<b>Pontuação Média Após armazenamento de 12 semanas a -18°C</b>
<b>Cor<sup>b</sup></b>	Criogénica - contacto directo	4,41 a	4,13 a
	Clássica	4,11 a	4,09 a
	Criogénica - contacto indirecto	4,05 a	4,44
<b>Textura<sup>c</sup></b>	Criogénica - contacto directo	3,70 a	3,46
	Clássica	3,76 a	3,78 a
	Criogénica - contacto indirecto	4,08	4,05 a
<b>Sensação gustativa<sup>d</sup></b>	Criogénica - contacto directo	3,99 a	4,01 a
	Clássica	4,13 a	4,05 a
	Criogénica - contacto indirecto	3,48	3,70
<b>Oleosidade<sup>b</sup></b>	Criogénica - contacto directo	4,31 a	4,48 a
	Clássica	3,60	3,53

	Criogénica - contacto indirecto	4,38 a	4,72 a
<b>Sabor<sup>b</sup></b>	Criogénica - contacto directo	4,79 a	4,36 a
	Clássica	4,15	4,22 a
	Criogénica - contacto indirecto	4,66 a	5,14
<b>Qualidade Geral<sup>b</sup></b>	Criogénica - contacto directo	4,37 a	3,97
	Clássica	3,66	3,53
	Criogénica - contacto indirecto	4,30 a	4,83
<b>Pontuação média – Significado das 4 citações</b>			
<sup>a</sup> Pontuação com a mesma letra na célula não difere muito uma da outra ( $P \leq 0,05$ )			
<sup>b</sup> 1=extremamente inaceitável; 4=aceitável; 7=extremamente aceitável			
<sup>c</sup> Pontuação Ideal =4; 1=Demasiado mole; 7= Demasiado Rijo			
<sup>d</sup> Pontuação Ideal =4; 1= Demasiado seco; 7= Demasiado húmido			

Fonte: (Kock, et al., 1995)

A preferência do júri traduz-se numa superioridade de ambas as congelações criogénicas em relação à congelação clássica, quando o teste foi feito imediatamente após a congelação e numa superioridade da congelação de contacto directo face à de contacto indirecto e à clássica, quando o produto ficou armazenado durante doze semanas (Kock, et al., 1995).

Em termos globais verifica-se que não há diferenças significativas entre os dois tipos de congelação criogénica quando o produto é analisado imediatamente após a sua congelação, excepção feita no que concerne à textura e sensação gustativa. Contudo são encontradas diferenças substanciais entre o processo clássico e criogénico em benefício deste último, especialmente na oleosidade e sabor resultando numa superior qualidade geral (Kock, et al., 1995).

Este resultado veio reforçar que, no que respeita à qualidade dos produtos celulares, a congelação criogénica encontra-se num nível bastante superior ao proporcionado pela congelação tradicional, sendo que a congelação criogénica por contacto indirecto proporciona uma qualidade um pouco superior à de contacto directo caso o produto seja armazenado durante bastante tempo.

Relativamente aos produtos não celulares, a diferença de qualidade entre a congelação criogénica e a congelação clássica não é tão acentuada como nos produtos celulares. Uma possível explicação prende-se com o facto dos produtos não celulares serem menos sensíveis ao tempo de congelação uma vez que eles não são constituídos de células que poderiam ser danificadas pelos grandes cristais de gelo formados durante a congelação lenta (Kock, et al., 1995).

Aparentemente o rápido congelamento de produtos não celulares apenas induz num ligeiro aumento de qualidade quando comparados com a congelação lenta. No entanto esta ligeira vantagem imediatamente após a congelação é perdida após o período de armazenagem, provavelmente devido ao fenómeno de recristalização (Kock, et al., 1995).

Aquele autor também determinou a diferença de rendimento (razão entre a massa do produto depois e antes da congelação/armazenagem) entre a congelação rápida e a congelação lenta num produto celular, bem como a humidade específica presente no produto. Os valores encontrados encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 – Rendimentos e concentrações de água em batatas fritas congeladas criogenicamente (rápido) e mecanicamente (lento) imediatamente após a congelação e após a armazenagem.

<b>Tempo</b>	<b>Tipo de congelação</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Humidade específica após descongelação (g/100g)</b>
<b>Imediatamente antes da congelação</b>	-----	-----	70,50
<b>Imediatamente após a congelação</b>	Rápida	99,68	71,72
	Lenta	98,47	71,10
<b>Após armazenamento de 4 semanas a - 18°C</b>	Rápida	99,52	71,58
	Lenta	98,22	66,90
<b>Após armazenamento de 8 semanas a - 18°C</b>	Rápida	99,42	72,04
	Lenta	98,12	67,64
<b>Após armazenamento de 12 semanas a - 18°C</b>	Rápida	99,37	72,53
	Lenta	98,04	66,81

Fonte: (Kock, et al., 1995)

No caso de produtos celulares, como é o caso de batatas fritas, observa-se que a congelação rápida por meio de criogenia, obtém sempre um rendimento superior à congelação lenta pelo método clássico qualquer que seja o tempo de armazenamento.

Relativamente à humidade específica, a rápida congelação, ao não danificar as células, possibilita que estas reabsorvam a água resultando numa maior humidade após a descongelação do que antes da congelação. A diferença de humidades é tanto maior quanto maior for o tempo de armazenagem.

A tabela 9 é semelhante à tabela 8 e foi determinada com o objectivo de se verificar a diferença entre a congelação rápida e lenta em produtos não celulares.

Tabela 9 - Rendimentos e concentrações de água em pizzas congeladas criogenicamente (rápido) e mecanicamente (lento) imediatamente após a congelação e após a armazenagem.

<b>Tempo</b>	<b>Tipo de congelação</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Humidade específica após descongelação (g/100g)</b>
<b>Imediatamente antes da congelação</b>	n.a.	n.a.	43,96
<b>Imediatamente após a congelação</b>	Rápida	98,22	43,15
	Lenta	97,69	42,08
<b>Após armazenamento de 4 semanas a - 18°C</b>	Rápida	98,29	43,29
	Lenta	97,74	41,85
<b>Após armazenamento de 8 semanas a - 18°C</b>	Rápida	98,38	43,98
	Lenta	97,67	42,26
<b>Após armazenamento de 12 semanas a - 18°C</b>	Rápida	98,05	44,98
	Lenta	97,59	42,93

Fonte: (Kock, et al., 1995)

Mais uma vez, o congelamento rápido apresenta um rendimento superior ao congelamento lento, para qualquer período de armazenamento, no entanto esta diferença vai diminuindo consoante o tempo de armazenamento. Já a humidade específica apresenta uma diminuição logo após a congelação, mas durante a armazenagem o produto recupera progressivamente a quantidade de água, sendo mais notória no caso da congelação criogénica.

Comparando a congelação tradicional 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, reacções estas que se reflectem numa clara melhoria de sabor, cheiro, nutrição e aparência (Singh, et al., citado por Khadatkhar, et al., 2004). De facto esta constatação é também fundamentada pelos resultados acima descritos.

Dinçer (2003) resumiu as principais diferenças entre a congelação rápida e lenta que podem ser visualizadas na tabela 10.

Tabela 10 – Comparação entre congelação rápida e congelação lenta

<b><i>Congelação rápida</i></b>	<b><i>Congelação lenta</i></b>
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 protector	Acumulação concentrada de solutos com efeitos benéficos

Não se deve, porém, afirmar que a congelação rápida é benéfica para todos géneros alimentícios. De facto, uma congelação demasiado rápida, acima dos 10cm/h, pode ser prejudicial para certos produtos como é o caso de carcaças de animais e produtos de grande porte uma vez que pode levar à sua própria ruptura (Kondratowicz, et al., 2002).

Por outro lado 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 (Khadatkar, et al., 2004; Roça, sem data).

Por vezes há a necessidade de congelar certos tipos de produtos através da congelação criogénica, não devido à necessidade de obter uma maior qualidade, mas porque a constituição do próprio produto assim o obriga.

Os produtos cuja superfície se encontra revestida por elementos algo sensíveis ao escoamento turbulento de ar, como é o exemplo dos tradicionais douradinhos, exigem uma congelação criogénica, uma vez que, neste caso, a elevada velocidade do escoamento de ar existente nos túneis clássicos iria retirar toda a camada de pão ralado existente na camada superficial deste produto.

## **7. Dimensionamento do túnel clássico e criogénico**

Para que seja possível comparar directamente os custos associados à congelação clássica e congelação mecânica, é necessário dimensionar os equipamentos do túnel clássico e a selecção do túnel criogénico. É portanto, um dos principais objectivos deste estudo uma vez que permite estimar, de forma tão aproximada quanto possível, os consumos de ambos os túneis e respectivos custos de operação.

Ainda no caso do túnel clássico seleccionam-se também todos os principais componentes da instalação de forma a garantir a eficácia do sistema.

### 7.1. **Características do Local**

O entreposto frigorífico (entreposto de trânsito) que alberga este túnel situa-se em Moçambique na cidade de Maputo, local que acolhe um importante porto piscatório de inúmeras espécies incluindo o camarão. Através da consulta de dados estatísticos disponibilizados pelo instituto nacional de estatística de Moçambique (Abril de 2010) foi possível estabelecer as condições de projecto que se passa a citar:

- Local: Moçambique - Maputo
- Produto: Camarão
- Temperatura (local) =  $\frac{2 \times \overline{Max} + Max_{abs} (Janeiro)}{3} = \frac{2 \times 30,9 + 39,3}{3} = 33,7 \approx 34$
- Humidade Relativa (local) = 77%
- Temperatura Ambiente (do interior do entreposto) = +20°C
- Temperatura de entrada do produto (T<sub>1</sub>): +15°C
- Temperatura de saída do produto (T<sub>3</sub>): -18°C

### 7.2. **Túnel de Congelação Clássico**

Este túnel é projectado para congelar cinco toneladas de produto por ciclo, sendo que cada ciclo tem uma duração de cinco horas, o que perfaz uma tonelada de produto por hora. Poder-se-ão realizar até três ciclos de congelação por dia, congelando um total de 15 toneladas de produto diariamente. As características do túnel clássico são:

- Dimensões: 3,5m x 8m x 3m (Altura x Largura x Profundidade)
- Temperatura: -35°C
- Duração do ciclo: 5 horas
- Carga por ciclo: 5000 Kg

Este túnel será do tipo descontínuo. As 5 ton de produto serão distribuídas por 8 paletes com aproximadamente 625 kg cada, dispostas em 4x2, ou seja, 4 paletes dispostas transversalmente e 2 longitudinalmente. Cada paleta será normalizada com a dimensão de 1000mm por 1200mm.

### 7.2.1. Sistema de Refrigeração a usar

Actualmente o amoníaco ou R717 e o R404a são os fluidos frigoríficos utilizados normalmente para o circuito frigorífico de um túnel de congelação. Neste caso optou-se por usar o amoníaco por várias razões:

- Carga térmica a retirar do túnel tem um valor bastante elevado;
- Amplitude térmica elevada, como consequência da elevada temperatura exterior;
- Período de amortização reduzido face à utilização do R404a, uma vez que se espera congelar uma grande quantidade de produto por ano.

O amoníaco utiliza-se como fluido refrigerante há mais de 120 anos e, por isso, as suas propriedades e aplicações são perfeitamente conhecidas. No entanto, devido a alguns inconvenientes inerentes à utilização deste componente, nomeadamente no que respeita à segurança, faz com que o seu uso se limite quase exclusivamente a grandes indústrias.

O amoníaco, quando usado num ciclo frigorífico tem várias vantagens, das quais se destacam:

- Excelentes propriedades termodinâmicas, de transferência de calor e de massa;
- É quimicamente neutro para os elementos dos circuitos frigoríficos, com excepção do cobre;
- O amoníaco dificilmente se mistura com o óleo lubrificante;
- Não é sensível à presença de ar húmido ou de água;
- É facilmente detectável em caso de fuga por ser muito leve, resultando num aumento de fiabilidade do sistema;
- O amoníaco é fabricado para muitos mais usos além da refrigeração, o que permite a manutenção do seu preço baixo e acessível. Em qualquer caso, o preço do amoníaco é muito inferior ao custo total da maioria dos outros refrigerantes, sendo que é necessária uma quantidade inferior de amoníaco em relação por exemplo ao R404a, para a mesma potência térmica;
- A necessidade de usar tubagem em aço, aumenta o período de vida útil da instalação;
- É facilmente biodegradável.

As propriedades químicas do amoníaco podem ser visualizadas na tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades do amoníaco

Símbolo químico	NH <sub>3</sub>
Massa molar	17,03 g/mol
Ponto de fusão a 1013 mbar	195,42 K (-77,73°C)
Ponto de ebulição a 1013 mbar	239,81 K (-33,34°C)
Solubilidade em água	88,9g/100ml a 0°C

Nas condições PTN, este fluido apresenta-se em estado gasoso e tem como principais riscos associados o facto de ser um gás tóxico, cáustico e corrosivo.

No Anexo X (figura 1) pode observar-se o diagrama de Mollier desta substância aplicado ao ciclo deste projecto.

### 7.2.2. Isolamento térmico do túnel

Cálculo da espessura mínima das paredes, da porta e da cobertura:

Na sua generalidade o valor do coeficiente de condutividade térmica do poliuretano, material usado no isolamento da parede, da porta e da cobertura, é (Centauro, 2010):

$$\lambda = 0,023 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Por outro lado, tal como foi já referido, a temperatura do interior do entreposto frigorífico é de +20°C, enquanto que a temperatura do interior do túnel de congelação é de -35°C. O fluxo máximo de calor (Q/S) admissível para um túnel de congelação é 7 W/m<sup>2</sup> (Santos, 2008). É ainda de referir que o túnel encontra-se na sua totalidade dentro do entreposto e como tal, não tem qualquer envolvente em contacto com o meio exterior.

O fluxo de transferência de calor é dado por:

$$Q = U \times S \times \Delta T$$

De onde o coeficiente de transmissão de calor é:

$$U = 1/R.S$$

Em que:

$$R = \frac{1}{h_i \cdot S} + \frac{\Sigma e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_e \cdot S}$$

Considera-se o valor global de 34 W/m<sup>2</sup>.°C para o h<sub>i</sub> e 28 W/m<sup>2</sup>.°C para o h<sub>e</sub> (Dossat, 1997). Acredita-se que estes são os valores máximos que poderão ser atingidos ao longo da vida útil do túnel, tendo em conta as velocidades médias do escoamento de ar junto à envolvente, quer no lado interior, quer no lado exterior.

O  $\Sigma e / \lambda \cdot S$  não é mais do que o somatório das resistências térmicas de condução das diferentes camadas de materiais que constituem a parede, a porta ou o pavimento.

Assim:

$$\frac{Q_1}{S} = U \times \Delta T = 7 \text{ w/m}^2 \Leftrightarrow$$

$$7 = \frac{1}{\left(\frac{1}{34} + \frac{e}{0,023} + \frac{1}{28}\right)} \times (20 - (-35)) \Leftrightarrow$$

$$e = 0,179 \text{ m} = 179 \text{ mm}$$

Selecciona-se assim uma espessura de 180 mm para os painéis que constituem as paredes do túnel de congelação e cobertura.

Estes painéis de isolamento térmico são constituídos por poliuretano injectado com um peso específico não inferior a 40 kg/m<sup>3</sup>. O seu processo de enchimento deve ser sujeito a um controlo apertado de qualidade de modo a evitar-se a formação de bolhas de ar que alteram a resistência térmica da espuma. Deverão ser constituídos por uma chapa em aço galvanizado na face quente com uma espessura mínima de 0,8 mm de forma a servir como barreira ao vapor, enquanto que a face fria poderá ser constituída por uma folha de alumínio. A barreira ao vapor deverá estar presente em todas as envolventes do túnel.

Ao contrário do que sucede com as câmaras de congelação e refrigeração, não é necessário a introdução de válvulas de estabilização de pressão, uma vez que a descongelação dos evaporadores apenas ocorre no tempo intermédio entre a descarga e carga do túnel e como tal, a porta encontra-se aberta.

Este túnel de congelação terá uma porta deslizante numa extremidade constituída também por 180mm de espessura de poliuretano rígido. Esta porta terá um funcionamento manual.

De forma a evitar a colagem da borracha da porta, o seu aro deverá ser aquecido por resistências eléctricas alimentadas por um circuito de 24V.

As portas têm de possuir um sistema de abertura manual no seu interior, enquanto que no seu exterior tem de existir uma luz encarnada ligada a um sinal sonoro que pode ser accionado no interior do túnel em caso de emergência.

#### Cálculo da espessura mínima do pavimento:

O pavimento será isolado com aglomerado de cortiça, o qual possui, na sua generalidade, o seguinte coeficiente de condutividade térmica (Centauro, 2010):

$$\lambda = 0,041 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Por outro lado, admite-se que a temperatura do terreno não ultrapasse os 20°C a cerca de 1 metro de profundidade, pois dever-se-á de contar com o vazio sanitário do entreposto, necessário para a prevenção da formação de gelo nas camadas inferiores do pavimento susceptível de o destruir. É de salientar que em caso limite, poderia ocorrer a própria destruição do túnel caso este vazio sanitário não fosse implementado.

$$Q = U \times S \times \Delta T \Leftrightarrow$$

$$\frac{Q}{S} = U \times \Delta T = 7 \text{ w/m}^2 \Leftrightarrow$$

$$7 = \frac{1}{\left(\frac{1}{34} + \frac{e}{0,041}\right)} \times (20 - (-35)) \Leftrightarrow$$

$$e = 0,321 \text{ m} = 321 \text{ mm}$$

Assim, apesar da espessura recomendada ser um pouco superior, selecciona-se apenas 300mm. Prevê-se que os ganhos térmicos adicionais, não serão muito significativos pois a área do pavimento é reduzida.

Este aglomerado negro de cortiça, será disposto em três camadas de 100mm com as juntas desencontradas de modo a prevenir pontes térmicas. Para evitar a penetração de água neste aglomerado de cortiça quando se fizer o enchimento de betão, é necessário que estas placas sejam cobertas por uma folha de polietileno na face fria. Esta folha possuirá uma espessura inferior a 0,5mm, não sendo permeável à água.

Por cima do aglomerado de cortiça será disposta uma camada de betão armado com malha de aço, de 100 mm de espessura. Na parte inferior do aglomerado de cortiça deverá existir um vazio sanitário formado por tubos de poliéster com 150 mm de diâmetro espaçados em um metro.

### 7.2.3. Balanço Térmico Manual

#### 7.2.3.1. *Cargas térmicas introduzidas pela envolvente*

A expressão usada para o cálculo da carga térmica introduzida pela envolvente ao túnel (paredes, pavimento e cobertura) é a seguinte:

$$Q_1 = U \times S \times \Delta T$$

#### Cálculo dos coeficientes globais de transmissão de calor:

$$U_{\substack{\text{paredes} \\ \text{e cobertura}}} = \frac{1}{1/h_i + \Sigma e/\lambda + 1/h_e} = \frac{1}{1/34 + 0,180/0,023 + 1/28} = 0,128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$U_{\text{pavimento}} = \frac{1}{1/h_i + \Sigma e/\lambda} = \frac{1}{1/34 + 0,300/0,041} = 0,136 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

#### Cálculo da potência calorífica do túnel de congelação:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\substack{\text{paredes} \\ \text{e cobertura}}} &= U \times S \times \Delta T \\ &= 0,128 \times (2 \times 8 \times 3,5 + 2 \times 3,5 \times 3 + 3 \times 8) \times (20 - (-35)) = 711 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{\text{pavimento}} = U \times S \times \Delta T = 0,136 \times (8 \times 3) \times (20 - (-35)) = 180 \text{ W}$$

Assim, a potência térmica devido à transmissão de calor com o exterior ao túnel de congelação será:

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{\text{paredes e cobertura}} + \dot{Q}_{\text{pavimento.}} = 711 + 180 = 891 \text{ W}$$

### 7.2.3.2. Cargas térmicas introduzidas pelo produto

Para este cálculo admite-se que o produto entra no túnel de congelação a +15°C, atingindo o equilíbrio térmico a -18°C, temperatura à qual é retirado do túnel de congelação. A taxa de congelação horária será 5ton/5horas=1000Kg/h.

$$\dot{Q}_2 = \dot{m} \times C_1 \times (T_1 - T_2) + \dot{m} \times L + \dot{m} \times C_2 \times (T_2 - T_3)$$

$$C_1 = 3390 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \text{ (Dossat, 1997)}$$

$$C_2 = 1800 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \text{ (Dossat, 1997)}$$

$$L = 253530 \text{ J/kg} \text{ (Dossat, 1997)}$$

$$T_1 = +15^\circ\text{C}$$

$$T_2 = -2,2^\circ\text{C} \text{ (Dinçer, 2003)}$$

$$T_3 = -18^\circ\text{C}$$

Assim:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_2 &= \frac{1000}{60 \times 60} \times 3390 \times (15 - (-2,2)) + \frac{1000}{60 \times 60} \times 253530 + \frac{1000}{60 \times 60} \times 1800 \times \\ &\quad \times (-2,2 - (-18)) \Leftrightarrow \dot{Q}_2 = 94\,522 \text{ W} \end{aligned}$$

- **Carga térmica Intermédia**

$$\dot{Q}_{int} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = 891 + 94\,522 = 95\,413 \text{ W}$$

- **Potência frigorífica Previsional**

A carga térmica intermédia representa uma grande aproximação ao valor real do calor a retirar, no entanto ainda não conta com o calor introduzido pelos motores eléctricos dos ventiladores do túnel. Admitindo que o calor introduzido por estes equipamentos representa 10% da carga térmica intermédia tem-se:

$$P_{\text{previsional}} = 1,10 \times Q_{int} = 1,10 \times 95\,413 = 104\,954 \text{ kW}$$

Assim, segundo o cálculo manual, a potência térmica total que os evaporadores têm de retirar de dentro do túnel de congelação é 110 kW.

### 7.2.4. Balanço Térmico Informático do túnel de congelação

O balanço térmico informático, a seguir apresentado, foi realizado com base no software disponibilizado pela empresa “Centaurus”, que é um reputado fabricante nacional na área da refrigeração. Os dados introduzidos correspondem aos utilizados no balanço térmico manual.

A versão utilizada do software foi a 2.0. Infelizmente esta versão ainda não dispõe de equipamentos (evaporadores e compressores) preparados para o amoníaco, pelo que o programa apenas será utilizado para o balanço térmico em detrimento da selecção destes equipamentos.

- ***Carga térmica Intermédia***

Cálculo de Câmaras - 1 -  
mento, apenas para o tipo de câmara / túnel seleccionado!

**TUNÉIS**  
 Arrefecimento Rápido  
 Congelação Rápida  
 Vidragem

**CÂMARAS**  
 Conservação de Frescos  
 Conservação de Congelados  
 Cons. Cong. c/ent. prod. p/congelar

**TIPO DE CONSTRUÇÃO**  
 Const. Civil  
 Painéis

**TIPO DE TUNEL**  
 Contínuo  
 Não Contínuo  
Factor de Carga | 1

**TIPO DE SERVIÇO**  
 Fraco  
 Normal  
 Forte  
 Muito Forte  
- Túnel de congelação rápida

**TEMPERATURAS [ °C ]**  
 Tempª exterior uniforme  
 Exposição solar

EXTERIOR PROJECTO	35
INTERIOR	-35
Máxima Entrada do Produto	15
Média Produto fm de Ciclo	-18

**SELECÇÃO**  
 DTm  
 DT1

**ISOLAMENTO**  
 Tipo uniforme  
 Espessura uniforme [mm] 180

Poluretano - 40 Kg/m<sup>2</sup>  
 Poliestireno - 24 Kg/m<sup>2</sup>  
 Cortiça - 112 Kg/m<sup>2</sup>

**DIMENSÕES TOSCO [ m ]**  
Comprimento 8  
Largura 3  
Altura 35

Cálculo de Câmaras - 2 -

Temperatura do Ar que se Introduz na Câmara por Renovações e Abertura de Portas: 20°C/60%HR

**PRODUTO**  
CARNIE, PEIXE, LACTIÍNIOS, LEGUMES, FRUTA, DIVERSOS

**PEIXE**  
 Crustáceos  
 Ovas  
 Peixe Seco  
 Marisco  
 Peixe Gordo  
 Pescada  
 Ostras  
 Peixe Magro  
 Polvo

Quant a Congelar/Arrefecer p/Ciclo [Kg] 5000  
Duração do Ciclo [h] 5  
Quantidade a Congelar [Kg] 0  
Nº. Renovações Automáticas 0  
Tempo Funcionamº. Compressor [h] 24

**DENSIDADE DE CARGA**  
 200 Kg/m<sup>2</sup>  
 400 Kg/m<sup>2</sup>  
 250Kg/m<sup>2</sup>  
 450 Kg/m<sup>2</sup>  
 Outra

**ENTRADA DIÁRIA [Kg]**  
 Standard 0  
 100% Capacidade Armazenagem  
 Outra

**Produto Embalado**  
 Cartão  
 Madeira  
 Alumínio  
 Outra

% Embalagem Sobre Peso Total de Produto 0  
Material da Embalagem Não embalado  
Calor Específico [kcal/Kg °C] 0

ESTIVA DO PRODUTO  
Potência [kW] 0  
Utilização Diária [h] 0  
Nº. Pessoas 0  
Tempo p/ Pessoa [h] 0

ILUMINAÇÃO  
10.8 <W/m² <18.2W/m² 0

<b>BALANÇO PROVISÓRIO</b>	
110,4	kW
94 923	kcal/h

Figura 9 - Balanço térmico informático

Se este balanço provisório for submetido a um acréscimo de 10% correspondente ao calor introduzido pelos motores dos ventiladores dos evaporadores, fica-se com uma potência total de:

$$110,4 \times 1,10 = 121,4 \text{ kW}$$

Esta potência é um pouco superior à potência atingida pelo método manual, devido principalmente ao factor de segurança inculcado pela empresa fornecedora deste software. De qualquer forma, o cálculo de todos os equipamentos necessários ao bom funcionamento da instalação far-se-á tendo como base uma potência de 125 kW.

#### 7.2.5. Fundamentos termodinâmicos da instalação

Esta instalação terá, como já se disse, o amoníaco como fluido de trabalho e funcionará com dois estágios de compressão e com injeção total de modo a promover um aumento de rendimento do ciclo através do aumento do efeito refrigerante, quando comparado com a injeção parcial.

A potência frigorífica total a retirar é de 125 kW, sendo que vai estar repartida por dois evaporadores. O sistema de compressão vai ser assegurado por dois compressores alternativos onde cada um assegura um estágio de compressão. A baixa pressão opera no regime  $-40^{\circ}\text{C}/-5^{\circ}\text{C}$  enquanto que a alta pressão opera no regime  $-5^{\circ}\text{C}/+49^{\circ}\text{C}$ .

Na figura 10 mostra-se o esquema de princípio do funcionamento da instalação frigorífica. O fluido no estado líquido é fornecido aos evaporadores a partir de um separador de líquido, que está a uma temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$ , através de um sistema de bombagem. É feita uma injeção total de fluido no depósito intermédio, enquanto que o fluido frigorífico condensa num condensador evaporativo a ar a  $+49^{\circ}\text{C}$ .

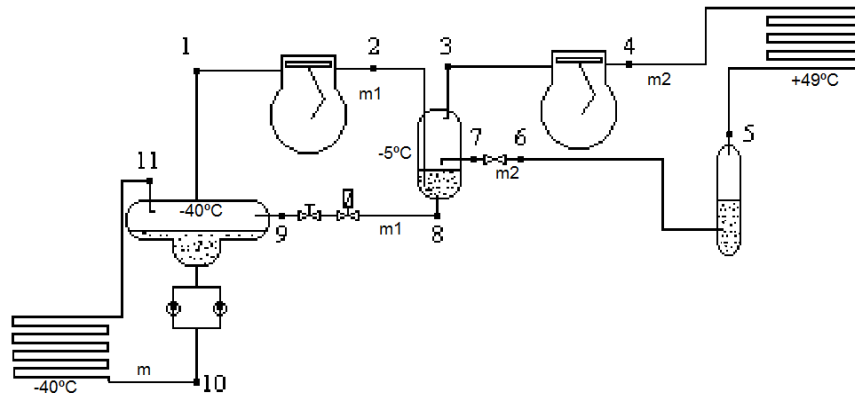


Figura 10 – Esquema do circuito frigorífico a amoníaco com injeção total

A figura 11 representa um esboço do diagrama de Mollier (P-h) deste circuito frigorífico.

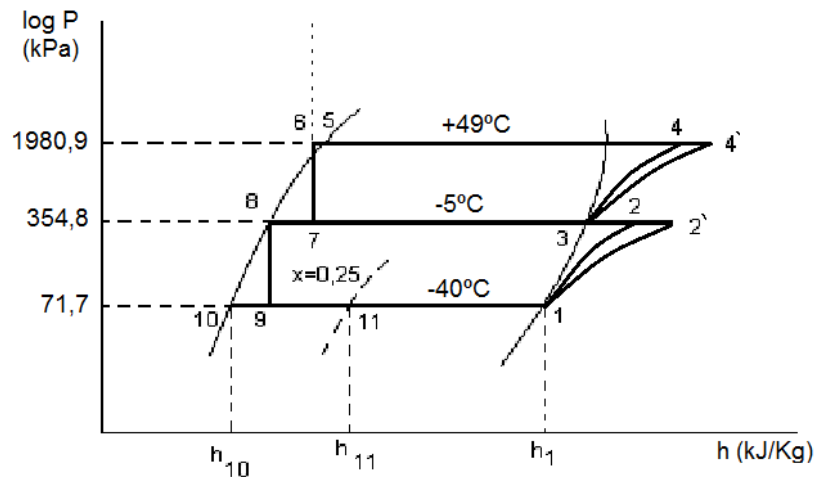


Figura 11 – Diagrama de Mollier da instalação frigorífica clássica

O funcionamento deste tipo de instalação é muito semelhante ao circuito básico atrás representado. O fluido frigorigéneo, que neste caso é o amoníaco, é aspirado pelo compressor na baixa pressão como vapor saturado onde é comprimido até ao ponto 2 como vapor sobreaquecido. Este vapor é admitido no depósito intermédio. De seguida o vapor saturado existente no depósito intermédio é aspirado pelo compressor na alta pressão (ponto 3) e comprimido até à pressão de condensação (ponto 4).

O fluido é então admitido no condensador no estado de vapor sobreaquecido onde rejeita, numa primeira fase, calor sensível e numa segunda fase calor latente, ambos para o exterior. A rejeição de calor latente é feita a uma temperatura de +49°C. De forma a garantir que apenas entra líquido na válvula de expansão, o fluido é subarrefecido em 5°C até ao ponto 6. Este líquido subarrefecido é expandido para o depósito intermédio formando-se a mistura

correspondente ao ponto 7. Parte desta mistura é vaporizada como consequência do calor introduzido pelo fluido vindo do compressor de baixa pressão sendo admitida no compressor de alta pressão.

O restante líquido saturado a  $-5^{\circ}\text{C}$  é expandido para o separador de líquido dando origem a uma mistura (ponto 9). O líquido saturado é admitido pelo grupo de bombagem que bombeia o líquido até aos evaporadores a  $-40^{\circ}\text{C}$ . Aqui o líquido é vaporizado até atingir um título de 0,25 (ponto 11) com a consequente absorção do calor da envolvente, que neste caso é o ar presente no túnel de congelação. O vapor saturado presente no separador de líquido é então aspirado pelo compressor de baixa pressão, reiniciando-se o ciclo.

Através de uma consulta directa das tabelas do  $\text{NH}_3$  consegue-se retirar os valores dos pontos: 1, 3, 5, 8 e 10.

$$h_1 = h_g(-40) = 1407,25 \text{ kJ/kg} ; v_1 = v_g(-40) = 1,55117 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_3 = h_g(-5) = 1455,16 \text{ kJ/kg} ; v_3 = v_g(-5) = 0,34618 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_5 = h_f(+49) = 429,93 \text{ kJ/kg}$$

$$h_8 = h_9 = h_f(-5) = 177,21 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{10} = h_f(-40) = 20,25 \text{ kJ/kg} ; v_{10} = v_f(-40) = 1,4491 \text{ dm}^3/\text{kg}$$

Por seu lado, através da consulta no diagrama de Mollier, conseguem-se retirar as entalpias dos pontos 2 e 4 uma vez que as suas entropias são iguais aos pontos 1 e 3 respectivamente.

$$h_2 = 1619,62 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 1707,40 \text{ kJ/kg}$$

Os pontos 2' e 4' face aos pontos 2 e 4, correspondem aos ganhos de entropia no fluido, devido à ineficiência de compressão. O rendimento volumétrico de uma compressão pode ser calculado pela seguinte expressão proposta por Rapin (1978):

$$\eta_v = 1 - 0,05 \times \frac{P_{alta}}{P_{baixa}}$$

Assim:

$$\eta_{v\ 1-2'} = 1 - 0,05 \times \frac{354,8}{71,7} = 0,753$$

$$\eta_{v\ 3-4'} = 1 - 0,05 \times \frac{1980,9}{354,8} = 0,721$$

O rendimento inferior da compressão de 3 para 4' deve-se sobretudo à sua maior taxa de compressão, levando-a a uma maior ineficiência.

Após o conhecimento do rendimento de cada compressão, facilmente se calculam os pontos 2' e 4':

$$\begin{aligned} \eta_{v\ 1-2'} = \frac{h_2 - h_1}{h'_2 - h_1} &\Leftrightarrow h'_2 = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{\eta_{v\ 1-2'}} = 1407,25 + \frac{1619,62 - 1407,25}{0,753} \\ &= 1689,28 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_{v\ 3-4'} = \frac{h_4 - h_3}{h'_4 - h_3} &\Leftrightarrow h'_4 = h_3 + \frac{h_4 - h_3}{\eta_{v\ 3-4'}} = 1455,16 + \frac{1707,40 - 1455,16}{0,721} \\ &= 1805,00 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$h'_2 = 1689,28 \text{ kJ/kg}$$

$$h'_4 = 1805,00 \text{ kJ/kg}$$

O ponto seis resulta de um subarrefecimento de 5K relativamente ao ponto cinco que se encontra a +49°C. Uma vez que o fluido se encontra na zona de líquido, o volume específico é praticamente constante (os líquidos são incompressíveis) pelo que a entalpia no ponto 6 é muito semelhante à entalpia da fase líquida à temperatura de 44°C:

$$h_6 = h_7 \approx h_f(+44) \approx 405,66 \text{ kJ/kg}$$

O ponto 11 pode ser encontrado através da expressão que relaciona o título de uma solução com as entalpias de vapor e de líquido:

$$\begin{aligned} x = \frac{h_{11} - h_{10}}{h_1 - h_{10}} &\Leftrightarrow h_{11} = h_{10} + x(h_1 - h_{10}) = 20,25 + 0,25(1407,25 - 20,25) = \\ &= 367,00 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$v_{11} = v_{10} + x(v_1 - v_{10}) = \frac{1,4491}{1000} + 0,25 \left( 1,55117 - \frac{1,4491}{1000} \right) = 0,3889 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_{11} = 367,00 \text{ kJ/kg}; v_{11} = 0,3889 \text{ m}^3/\text{kg}$$

O efeito refrigerante não é mais do que a potência calorífica retirada através dos evaporadores, sendo que o caudal mássico de amoníaco necessário será:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times (h_{11} - h_{10}) \Leftrightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{(h_{11} - h_{10})} = \frac{125}{367,00 - 20,25} = 0,360 \text{ kg/s}$$

O caudal volumétrico que as bombas terão de bombear será:

$$\dot{V} = \dot{m} \times v_{10} = 0,360 \times 1,4491 = 0,522 \text{ dm}^3/\text{s} = 1878 \text{ dm}^3/\text{h} \approx 1,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

O cálculo de  $\dot{m}_1$ , que é o caudal mássico do compressor de baixa pressão, pode ser conseguido através do balanço energético aplicado ao volume de controlo constituído pelo separador de líquido de baixa pressão (figura 12):

$$\sum \dot{Q}_{entra} = \sum \dot{Q}_{sai} \Leftrightarrow \dot{m} \times h_{11} + \dot{m}_1 \times h_9 = \dot{m} \times h_{10} + \dot{m}_1 \times h_1 \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_1 = \frac{\dot{m} \times (h_{11} - h_{10})}{h_1 - h_9} = \frac{0,360 \times (367,00 - 20,25)}{1407,25 - 177,21} = 0,101 \text{ kg/s}$$

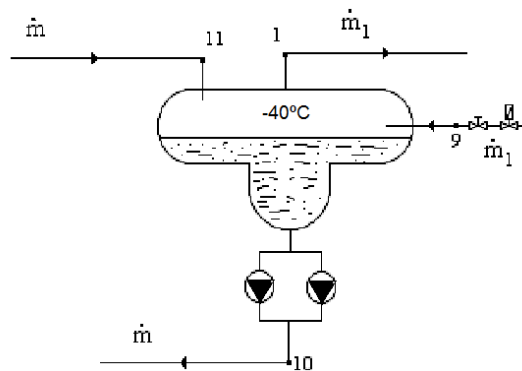


Figura 12 – Separador de líquido de baixa pressão

O caudal volumétrico aspirado pelo compressor de baixa pressão será:

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 \times v_1 = 0,101 \times 1,55117 = 0,157 \text{ m}^3/\text{s} = 565,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Por sua vez, o caudal mássico de amoníaco a comprimir no compressor de alta pressão pode ser calculado de modo semelhante, mas aplicando o volume de controlo ao depósito intermédio (figura 13):

$$\sum \dot{Q}_{entra} = \sum \dot{Q}_{sai} \Leftrightarrow \dot{m}_1 \times h'_2 + \dot{m}_2 \times h_7 = \dot{m}_1 \times h_8 + \dot{m}_2 \times h_3 \Leftrightarrow$$

$$\dot{m}_2 = \frac{\dot{m}_1 \times (h'_2 - h_8)}{h_3 - h_7} = \frac{0,101 \times (1689,28 - 177,21)}{1455,16 - 405,66} = 0,146 \text{ kg/s}$$

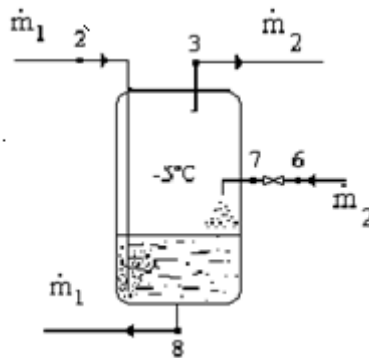


Figura 13 – Depósito intermédio (injecção total)

O caudal volumétrico aspirado pelo compressor de alta pressão será:

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_2 \times \dot{v}_3 = 0,146 \times 0,34618 = 0,051 \text{ m}^3/\text{s} = 183,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

As potências de compressão são facilmente calculadas:

$$\dot{W}_{1-2'} = \dot{m}_1 \times (h_{2'} - h_1)$$

$$\dot{W}_{3-4'} = \dot{m}_2 \times (h_{4'} - h_3)$$

$$\dot{W}_{1-2'} = 0,101 \times (1689,28 - 1407,25) = 28,5 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{3-4'} = 0,146 \times (1805,00 - 1455,16) = 51,1 \text{ kW}$$

A capacidade mínima teórica do compressor de baixa pressão é de 125 kW, enquanto que a do compressor de alta pressão é de 125+28,5=153,5kW.

## 7.2.6. Dimensionamento de equipamentos

Neste subcapítulo dimensionar-se-ão os equipamentos de produção de frio, de controlo e de protecção de modo a garantir um bom funcionamento de toda a instalação.

### 7.2.6.1. *Compressores*

A instalação irá ter um compressor do tipo alternativo na baixa pressão e um compressor também do tipo alternativo na alta pressão. Ambos os compressores vão ser accionados, através de acoplamento directo, por motor eléctrico, com arranque em estrela-triângulo.

O primeiro estágio de compressão vai ser assegurado por um compressor da GRASSO modelo 612 que possui um total de 6 cilindros dispostos em “W”. A sua velocidade de funcionamento será de 1000 r.p.m e terá uma potência frigorífica total aproximada de 134,8 kW no regime -40/-5°C, uma potência absorvida de 36,5 kW e um COP de 3,69. O volume aspirado será de 614,4 m<sup>3</sup>/h. Será accionado por um motor eléctrico com uma potência de 50 kW.

Por sua vez, o segundo estágio de compressão vão estar ao encargo do compressor da GRASSO modelo 412 constituído por 4 cilindros em “V”. A sua velocidade será de 725 r.p.m. e terá uma potência frigorífica total aproximada de 242,4 kW quando em funcionamento em plena carga no regime -5°C/+49°C, uma potência absorvida de 73,3 kW e um COP de 3,31. O volume aspirado será de 228,0 m<sup>3</sup>/h. O motor eléctrico que acciona este compressor terá uma potência de 90 kW. Apesar deste compressor ter uma potência térmica bastante superior à mínima necessária (171,3 kW) é o recomendado pelo fabricante.

A selecção de compressores foi feita através do software Comsel - Grasso Compressor Selection software, versão 3.8.31.

Estes compressores serão equipados com os seguintes componentes:

- Pressostato de segurança de baixa pressão;
- Pressostato de segurança de alta pressão;
- Pressostato de segurança do óleo lubrificante;

- Separador de óleo e respectivo sistema de abastecimento ao cárter que também inclui sistema de controlo de nível de óleo;
- Resistências de aquecimento do cárter (300W/230V para ambos os compressores).
- Permutador de calor de arrefecimento do óleo;
- Resistências de aquecimento de óleo nas cabeças dos compressores (2 elementos aquecedores de 600W/230V cada, para ambos os compressores) uma vez que a temperatura da casa das máquinas pode atingir valores inferiores a 15°C (valor mínimo recomendado pelo fabricante).

O compressor de baixa pressão possuirá um sistema de regulação de débito em quatro escalões de potência: 134,8; 112,1; 90,6 e 67,7kW correspondentes aos funcionamento de 6, 5, 4 e 3 cilindros respectivamente. O compressor de alta pressão também terá um sistema semelhante, mas apenas com três escalões: 242,4; 181,8 e 121,2 kW correspondentes ao funcionamento de 4,3 e 2 cilindros respectivamente.

Todo o sistema de comando e controlo será realizado em modo automático por meio de electroválvulas colocadas na cabeça dos compressores e por outros dispositivos tais como controlos de líquido presentes no separador de líquido e pressostatos de alta e baixa pressão existentes na instalação.

Os compressores terminam o seu funcionamento quando o túnel é aberto para o descarregamento e carregamento de produto.

Os valores das potências e dos caudais de funcionamento dos compressores calculados termodinamicamente diferem ligeiramente dos valores fornecidos pelo software da Grasso, tal como se pode verificar pela tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre os valores teóricos e reais do caudal volumétrico e da potência absorvida

	Valores Teóricos		Valores Reais	
	B. Pressão	A. Pressão	B. Pressão	A. Pressão
<b>Caudal Volumétrico</b>	565 m <sup>3</sup> /h	184 m <sup>3</sup> /h	614 m <sup>3</sup> /h	228 m <sup>3</sup> /h
<b>Potência absorvida ao veio</b>	28,5 kW	51,1 kW	36,5 kW	73,3 kW

A partir dos valores dispostos no quadro superior, verifica-se que quer os caudais volumétricos, quer as potências fornecidos pelos software da Grasso são superiores quando comparados com os valores calculados analiticamente através de um raciocínio termodinâmico.

Uma possível explicação prende-se com o facto de os fabricantes sobredimensionarem ligeiramente os componentes como forma de segurança, fazendo com que os caudais volumétricos e as potências absorvidas ao veio sejam um pouco superiores aos valores teóricos.

#### 7.2.6.2. Evaporadores

O túnel terá 2 evaporadores idênticos da Helpman, modelo ZLA 728-10. A potência necessária a cada evaporador é:

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{n} \times F_c = \frac{125}{2} \times 1,15 = 71,9 \text{ kW}$$

$Q_{eva}$  - Potência térmica a retirar do túnel

$n$  - Número de evaporadores

$F_c$  - Factor de correcção=1,15

Este factor de correcção foi obtido tendo em conta um  $\Delta T_1$  de 8°C ( $T_{eva}=-40^\circ\text{C}$   $T_{ent}=-32^\circ\text{C}$ ), e o uso de um sistema de bombeamento de amoníaco. Tal como foi dito anteriormente, a temperatura nominal do túnel de congelação é de -35°C.

Este modelo possui um espaçamento entre alhetas de 10 mm e a sua capacidade nominal é de 74,5 kW com dois ventiladores helicoidais que asseguram um caudal de 40 500m<sup>3</sup>/h de ar. As suas dimensões são: 3,730 metros de comprimento; 1,190 metros de altura e 1,355 metros de largura, enquanto o seu volume interno é de 152 dm<sup>3</sup>.

Cada ventilador absorve uma potência 2,4 kW pelo que, no total os ventiladores dos dois evaporadores contribuem com uma carga térmica de 9,6 kW. Este valor vem confirmar a percentagem de 10% usada no cálculo da potência frigorífica previsional, a qual representou 9,5 kW no cálculo teórico e 11,0 kW no cálculo informático.

Os evaporadores tal como acontece com os compressores, terminam o seu funcionamento quando o túnel é aberto para o descarregamento e carregamento de produto.

É imperativo que a tubagem de fluidos condensados seja aquecida por meio de resistências eléctricas a si enroladas. A operação de descongelação dos evaporadores é efectuada nos períodos entre o descarregamento e o carregamento de produto e é assegurada também por resistências eléctricas.

Idealmente os seus ventiladores deverão proporcionar uma velocidade de escoamento de ar de 6 m/s de modo a potenciar uma elevada velocidade de congelação do camarão ao mesmo tempo que evita uma exagerada taxa de evaporação de água da camada exterior do produto.

Os órgãos de comando dos evaporadores são os seguintes (figura14):

- Uma electroválvula EVRA 10 por cada evaporador para admissão de NH<sub>3</sub> líquido;
- Uma válvula de corte SVA-ST 100 após o evaporador;
- Uma válvula de corte SVA-ST 40 antes do evaporador;
- Uma válvula reguladora de caudal REG 40 antes do evaporador;

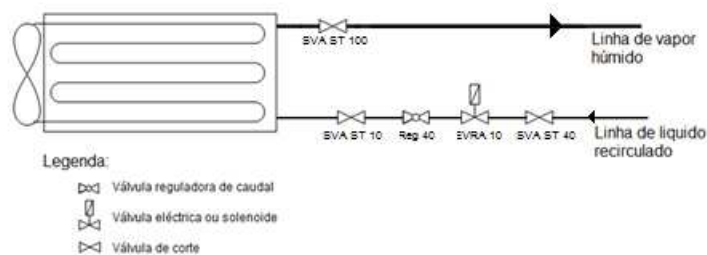


Figura 14 – Estação de válvulas de um evaporador

### 7.2.6.3. Separador de líquido de baixa pressão

Tendo em conta que o volume aspirado pelo compressor de baixa pressão é de aproximadamente 615 m<sup>3</sup>/h, foi seleccionado um separador de líquido da Centauro, modelo SBC 10/2465, com um diâmetro de virola de 1000 mm, um comprimento total de 3.460 mm e um volume de 2.465 dm<sup>3</sup> que permite uma carga total de NH<sub>3</sub> líquido de 820 dm<sup>3</sup>.

O código de fabrico deste equipamento é o A.S.M.E. (Pressure Vessel Code) e ASHRAE (Safety Code) e foi dimensionado pelo fabricante admitindo uma velocidade do vapor saturado do NH<sub>3</sub> sobre a superfície do líquido de 0,4 m/s.

O separador de líquido possui dois sistemas de controlo de nível (nível alto e baixo) constituídos por bóias em aço inoxidável e caixa electrónica amplificadora, do tipo 38 E da DANFOSS com as seguintes funções:

- Controlador de nível de trabalho alto no separador, através do 38E superior. Quando este nível for atingido o controlador dá ordem de paragem aos compressores bem como a outros componentes tais como, ventiladores do condensador e electroválvulas que não estejam associadas ao circuito dos evaporadores.
- Controlador de nível de trabalho baixo no separador, através do 38E inferior. Em funcionamento normal, caso o nível atinja um valor baixo, a electroválvula a montante do separador abre e o líquido começa a expandir para o interior do separador.
- Para além destes dois níveis de trabalho, existem outros dois de segurança assegurados por dois pressostatos diferenciais tipo RT260A da Danfoss:
  - Segurança superior para evitar um nível demasiado elevado, susceptível de propiciar uma aspiração de gotas de líquido por parte do compressor, originando golpes de líquido, diminuindo a sua vida útil.
  - Segurança inferior para evitar um nível demasiado baixo, protegendo assim as bombas de líquido do separador de fenómenos de cavitação originados por vortex que atinjam estes equipamentos.

O separador de líquido deverá também estar equipado com um sistema de separação e reencaminhamento de óleo para o cárter dos compressores.

Quanto ao isolamento do separador, este é realizado da seguinte forma:

- Preparação da superfície metálica com pintura betuminosa.
- Colagem com flintkote 382 de duas camadas de poliuretano com 100 mm de espessura previamente cortado em aduelas.
- Reforço da colagem com cinta de plástico.
- Aplicação de material impermeabilizante e respectiva protecção mecânica de fibra de vidro e resina de poliéster (face quente).
- Acabamento final com pintura de cor normalizada.

#### 7.2.6.4. Bombas do separador de líquido

Tal como calculado anteriormente, o caudal volumétrico a bombear será de 1,9 m<sup>3</sup>/h estimando-se que a altura máxima de pressão não ultrapasse os 20m, ou seja, 1,96 bar.

Foram assim seleccionadas duas bombas, sendo uma de reserva disposta em paralelo, da marca WITT, semiherméticas, modelo HRP 3232 – PN 25. Esta bomba será trifásica e a 50 Hz (frequência de rede em Moçambique) e terá uma velocidade de rotação de 2900 r.p.m.

#### 7.2.6.5. Depósito intermédio

O depósito intermédio é seleccionado em função do caudal de fluido aspirado pelo compressor de alta pressão. Assim, como esse caudal é de 230 m<sup>3</sup>/h, o depósito intermédio será o modelo 55/209 disponibilizado pela Centauro que está preparado para um caudal máximo de 330 m<sup>3</sup>/h.

Este depósito terá forma cilíndrica, é construído em chapa de aço H-11, DIN 17155 e terá as seguintes dimensões: diâmetro de 550 mm e altura de 2090 mm. Terá já as picagens feitas, prontas para receber a descarga do compressor de baixa pressão, saída do fluido a -5°C para o compressor de alta pressão, expansão do fluido a alta pressão vindo do depósito de líquido e saída de NH<sub>3</sub> líquido a 3,55bar para a expansão no separador de líquido.

Quanto ao isolamento do depósito intermédio, este é realizado da seguinte forma:

- Preparação da superfície metálica com pintura betuminosa.
- Colagem com flintkote 382 de uma camada de poliuretano com 100 mm de espessura previamente cortado em aduelas.
- Reforço da colagem com cinta de plástico.
- Aplicação de material impermeabilizante e respectiva protecção mecânica de fibra de vidro e resina de poliéster (face quente).
- Acabamento final com pintura de cor normalizada.

Este depósito terá um controlador de nível máximo e mínimo tal como sucede com o separador de líquido, sendo fornecido pela Danfoss modelo 38E. Por seu lado, o nível de

trabalho é conferido por um dispositivo flutuador que comanda uma válvula servo controlada que expande o líquido no depósito intermédio.

Por fim, este depósito contará também com uma válvula de segurança da Danfoss modelo SFVL calibrada para uma pressão de 1034 kPa (150 Psi).

#### 7.2.6.6. Condensador

Tal como foi fito, esta instalação encontra-se em Moçambique na cidade de Maputo e segundo dados estatísticos disponibilizados pelo governo daquele país, a temperatura de projecto aconselhável é de 34°C de bolbo seco, 77% de humidade relativa média, o que resulta numa temperatura de bolbo húmido de 30,4°C.

Tendo como base estes valores e a potência térmica real a dissipar, que resulta na soma da potência térmica a retirar pelos evaporadores com as potencias absorvidas ao veio por parte dos compressores (Ângelo, 2009), seleccionou-se um condensador evaporativo do fabricante Evapco.

$$\dot{Q}_{cond\ total} = 125 + 36,5 + 73,3 = 234,8\ kW$$

Seleccionou-se a versão ATC modelo 65B da Evapco, que é um condensador evaporativo cuja capacidade nominal de rejeição de calor é 280 kW. Este condensador possui um ventilador de 4,0 kW que garante um caudal de ar total de 21 240 m<sup>3</sup>/h.

Este evaporador terá um pressostato de baixa pressão que controlará o ventilador de forma a que a pressão do circuito não tome valores excessivamente reduzidos.

Não se introduziu qualquer factor de correcção à potência total uma vez que o catálogo do fabricante não dispunha dos valores relativos a este projecto. No entanto tem-se plena noção que este condensador se encontra ligeiramente sobredimensionado apesar da humidade relativa no local ser bastante elevada. De facto, como a temperatura de condensação tem um valor bastante elevado, actua como grande atenuante da temperatura do bolbo húmido, resultando inclusive, numa diminuição da potência nominal necessária a este equipamento uma vez que o factor de correcção teria sempre um valor inferior à unidade.

### 7.2.6.7. Depósito de líquido

Para o dimensionamento do depósito de líquido tem de se ter em conta o volume interno dos evaporadores, podendo ser calculado através da seguinte expressão (Guerra, sem data):

$$V_{dep.liq.} = n \times V_{int} \times 1,5 = 2 \times 152 \times 1,5 = 456 \text{ dm}^3$$

$n$  – Número de evaporadores

$V_{int}$  - Volume interno de cada evaporador

O depósito de líquido a instalar será o modelo vertical FS4752 da Bitzer construído em chapa de aço e com um volume interno total de 473dm<sup>3</sup>. A sua construção deverá obedecer às directrizes impostas pela Comissão Europeia, nomeadamente às EC Machine Directive (98/37/EC) e EC Pressure Equipment Directive (97/23/EC).

Este equipamento contará com uma válvula de segurança DVFL da Danfoss calibrada para uma pressão de 2068 kPa (300 Psi), com um sistema de controlo electrónico de nível de líquido semelhante ao depósito intermédio e com um purgador de ar.

### 7.2.6.8. Tubagem

Toda a tubagem a utilizar na instalação será de aço uma vez que o amoníaco tem um cariz altamente corrosivo no cobre. O aço não terá costuras e as suas dimensões estarão de acordo com a norma DIN 2448 ST35. Todo o seu dimensionamento será feito tendo como base as tabelas técnicas com as capacidades das linhas de aço (Anexo XI) (Gameiro, 1999).

As linhas que se encontram entre o separador de líquido e os evaporadores terão de ter uma capacidade equivalente aos próprios evaporadores. As restantes terão de ter uma capacidade igual à soma da potência dos evaporadores com a potência absorvida ao veio do compressor de baixa pressão (Guerra, sem data).

- Linhas de descarga:
  - Linha desde o compressor de baixa pressão até ao depósito intermédio

$$\text{Potência total} = 125 \text{ kW} = 107\,481 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1 \frac{1}{4}'' = 31,75 \text{ mm}$$

- Linha desde o compressor de alta pressão até ao condensador

$$\text{Potência total} = 125 + 36,5 = 161,5 \text{ kW} = 138\,865 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1 \frac{1}{2}'' = 38,10 \text{ mm}$$

- Linhas de aspiração seca:

- Linha desde o separador de líquido até ao compressor de baixa pressão

$$\text{Potência total} = 125 \text{ kW} = 107\,481 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 4'' = 101,60 \text{ mm}$$

- Linha desde o depósito intermédio até ao compressor de alta pressão

$$\text{Potência total} = 125 + 36,5 = 161,5 \text{ kW} = 138\,865 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 5'' = 127,00 \text{ mm}$$

- Linha de dreno:

- Desde o condensador até ao depósito de líquido

$$\text{Potência total} = 125 + 36,5 = 161,5 \text{ kW} = 138\,865 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1 \frac{1}{4}'' = 31,75 \text{ mm}$$

- Linhas de líquido a alta pressão:

- Desde o depósito de líquido até ao depósito intermédio

$$\text{Potência total} = 125 + 36,5 = 161,5 \text{ kW} = 138\,865 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1'' = 25,40 \text{ mm}$$

- Desde o depósito intermédio até ao separador de líquido

$$\text{Potência total} = 125 \text{ kW} = 107\,481 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1'' = 25,40 \text{ mm}$$

- Linhas de líquido recirculado:
  - Linha desde a saída do separador de líquido até aos dois evaporadores

$$\text{Potência total} = 125 \text{ kW} = 107\,481 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 2'' = 50,80 \text{ mm}$$

- Linha individual para cada evaporador

$$\text{Potência total} = 62,5 \text{ kW} = 53\,740 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 1\frac{1}{2}'' = 38,10 \text{ mm}$$

- Linhas de aspiração húmida:
  - Linha individual desde cada evaporador

$$\text{Potência total} = 62,5 \text{ kW} = 53\,740 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 3\frac{1}{2}'' = 88,90 \text{ mm}$$

- Linha desde os dois evaporadores até ao separador de líquido

$$\text{Potência total} = 125 \text{ kW} = 107\,481 \text{ kcal/h}$$

$$\phi = 5'' = 127,00 \text{ mm}$$

Relativamente ao isolamento das tubagens, este irá ser feito com poliuretano revestido com material impermeabilizante na face quente, isto é, no lado em contacto como meio ambiente, de forma a evitar condensações. Este material impermeabilizante é constituído por alumínio flexível.

O cálculo da espessura do isolamento teve como base a diminuição das perdas térmicas lineares para 10% das perdas que se iriam verificar caso as tubagens não fossem isoladas. Para o efeito recorreu-se a ábacos disponibilizados pela The Engineering Toolbox (sem data).

Não serão isoladas as seguintes linhas: desde a saída do compressor de alta pressão até ao condensador evaporativo, deste o condensador evaporativo até ao depósito de líquido e desde o depósito de líquido até ao depósito intermédio. No entanto a tubagem em aço não deverá ser exposta ao meio ambiente uma vez que este tem uma elevada humidade e salinidade e como tal, deverá ser revestido com produtos anti-corrosivos.

Os restantes troços terão a seguinte espessura de isolamento:

- Do compressor de baixa pressão ao depósito intermédio – 80mm
- Do separador de líquido ao compressor de baixa pressão – 80mm
- Do depósito intermédio ao compressor de baixa pressão – 80mm
- Do depósito intermédio ao separador de líquido – 100mm
- Do separador de líquido aos evaporadores – 100mm
- Linha individual para cada evaporador – 100mm
- Linha individual desde cada evaporador – 100mm
- Linha dos evaporadores até ao separador de líquido – 100mm

#### 7.2.6.9. *Outros elementos de controlo*

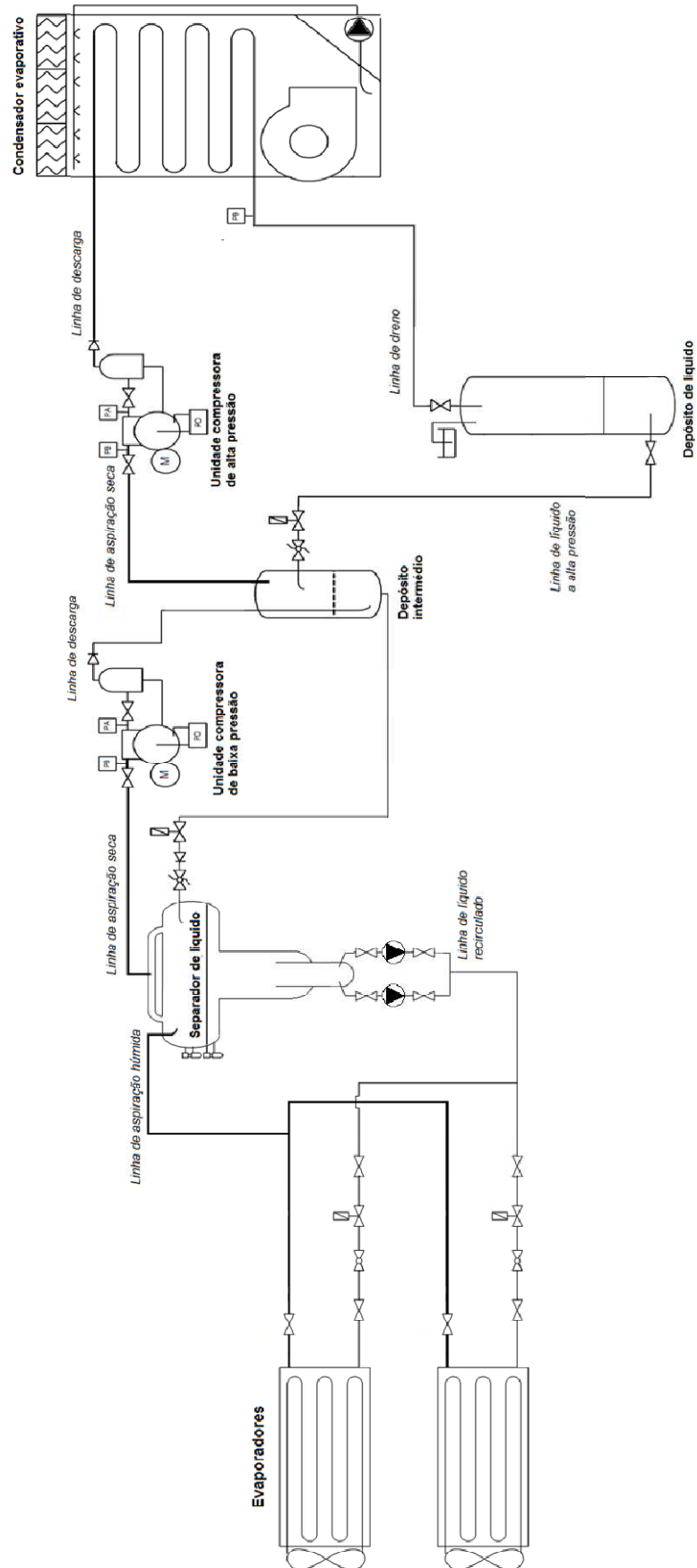
A instalação contará com duas válvulas de expansão termostáticas TEA da Danfoss, modelo 85-55 que expande o fluido no separador de líquido e cuja capacidade máxima é de 190 kW e modelo 85-85 que expande o fluido no depósito intermédio e cuja capacidade máxima é de 295 kW.

Existirão inúmeras válvulas de corte ou seccionamento, distribuídas por toda a instalação de modo a ser possível a substituição de algumas unidades com o mínimo desperdício de fluido. Uma vez mais, serão da Danfoss e os modelos são função do diâmetro da tubagem existente na secção em causa:

- SVA-ST 32 (1 ¼'') – A jusante do compressor de baixa pressão;

- SVA-ST 125 (5'') – A montante do compressor de alta pressão;
- SVA-ST 40 (1 ½'') – A jusante do compressor de alta pressão;
- SVA-ST 32 (1 ¼'') – A montante do depósito de líquido;
- SVA-ST 25 (1'') – A jusante do depósito de líquido;
- SVA-ST 40 (1 ½'') – A montante de cada uma dos evaporadores;
- SVA-ST 100 (4'') – A jusante de cada um dos evaporadores. Haverá a necessidade de recorrer a um adaptador para ligar esta válvula à tubagem que tem um diâmetro de 3 ½''.
- SVA –ST 50 (2'') – A Montante e a jusante de cada uma das bombas recirculadoras de líquido.

### 7.2.7. Circuito frigorífico da instalação



### 7.3. **Túnel de Congelação Criogénico**

Tal como já foi dito, o fluido a utilizar no túnel criogénico será o azoto. No entanto, neste túnel não se irá fazer um dimensionamento como foi feito no túnel clássico, devido sobretudo à existência de variados modelos no mercado, que permitem um escolha de um túnel normalizado, capaz de congelar a quantidade e tipo de produto pretendidos.

Poder-se-ia realizar um projecto completo de um novo túnel, no entanto ir-se-ia sair do âmbito inicial deste estudo.

Assim, e desprezando a carga térmica que passa pela envolvente do túnel (partes laterais, superior e inferior), o túnel terá de ter uma potência mínima de 94 500 W, correspondente à carga térmica introduzida pelo produto, atrás calculada, referente à congelação de 1000 Kg de camarão por hora.

Assim, o túnel seleccionado foi o modelo Zip Freeze (figura 15) da Air Liquide, com uma gama de capacidades de congelação entre 200 a 1000 Kg/h. Este equipamento é do tipo pulverização em túnel contínuo.

Este túnel tem uma regulação de 0°C a -140°C, enquanto que a velocidade do tapete pode variar de forma a que a congelação se faça entre 5 e 45 minutos. Neste caso, prevê-se que a congelação dure entre 10 a 20 minutos de forma a que o processo seja o mais optimizado possível (Air Liquide, sem data).



Figura 15 – Túnel criogénico Zip Freeze (Air Liquide, sem data).

Para o funcionamento deste equipamento é necessária a montagem de um depósito de azoto exterior e respectiva tubagem de alimentação ao túnel, bem como condutas de extracção de

azoto no estado de vapor. No anexo XII pode-se visualizar um esquema de princípio típico de uma instalação de congelação criogénica a N<sub>2</sub> (Air\_liquide, 2010).

Para se poder estimar o consumo de fluido, neste caso de azoto, partir-se-á de uma potência de 100 kW, de forma a introduzir um ligeiro coeficiente de segurança no cálculo.

Através de uma análise termodinâmica, é expectável que a mudança de estado, do fluido, ocorrida dentro do túnel de congelação, seja a uma pressão constante de 1 atmosfera, ou seja, 101,325kPa, do estado de líquido saturado até vapor sobreaquecido. Estima-se que este vapor deixará de entrar em contacto com o produto a cerca de -60°C uma vez que o interior do túnel estará a cerca de -70°C, temperatura considerada como ideal, para este túnel de congelação, conforme atrás demonstrado.

Através da consulta do diagrama de Mollier (P-h) do azoto (anexo X – figura 2) consegue-se obter a entalpia destes dois pontos:

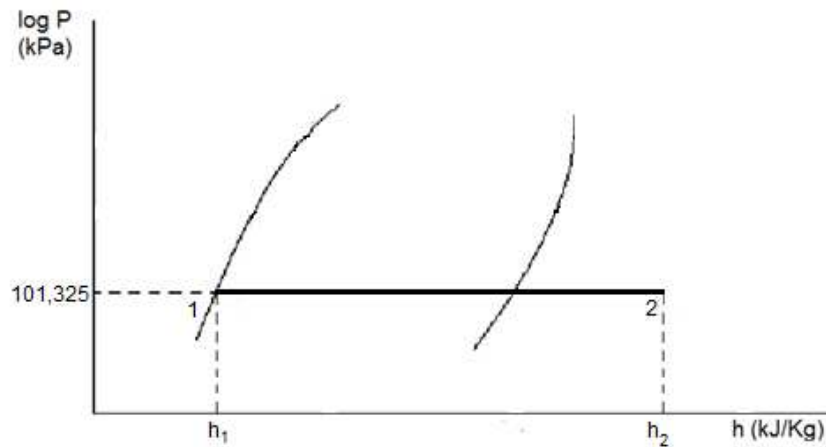


Figura 16 – Diagrama de Mollier da instalação criogénica

$$h_1 = h_f(-196) = 81,79 \text{ kJ/kg}; v_1 = v_g(-196) = 0,0012352 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_2 = 424,88 \text{ kJ/kg} (-60^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \times (h_2 - h_1) \Leftrightarrow 100 = \dot{m} \times (424,88 - 81,79) \Leftrightarrow \dot{m} = 0,29 \text{ kg/s} = 1050 \text{ kg/h}$$

Admitindo um rendimento global de 85%:

$$\dot{m}_{real} = \frac{1050}{0,85} = 1236 \text{ kg/h}$$

Prevê-se assim, que para congelar 1000 kg de camarão, seja necessário cerca de 1240 kg de azoto líquido. Este valor é perfeitamente aceitável, tendo em conta os valores de referência, que se situam entre 1,2 e 1,4 kg de azoto para congelar 1 kg de produto (Air Liquide, sem data).

Este túnel absorve uma potência eléctrica na ordem dos 7500 W, de forma a garantir um normal funcionamento ao motor da cinta transportadora, motores dos ventiladores que se encontram dentro do túnel a promover um fluxo turbulento de ar e ao motor do ventilador de extracção de azoto em estado de vapor.

Para o cálculo da tubagem, parte-se do princípio que a velocidade do fluido não deverá ser superior a 0,6m/s (Air Liquide, sem data).

$$Q = V.A \Leftrightarrow \dot{m}.v = V.\frac{\pi D^2}{4} \Leftrightarrow D = \sqrt{\frac{4.\dot{m}.v}{\pi.V}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,29 \times 0,0012352}{\pi \times 0,6}} = 0,0276m$$

$$\approx 28mm$$

Assim, a tubagem que leva o azoto líquido desde o depósito de armazenamento até ao túnel de congelação terá um diâmetro de 28,58 mm, seleccionando-se por isso, uma tubagem de  $1 \frac{1}{8}$ ”.

Esta tubagem será em cobre devidamente isolada com poliuretano com uma espessura de 300mm (Air Liquide, sem data). Será ainda revestido com material impermeabilizante, que pode ser alumínio, na face quente, de forma a evitar condensações.

## 8. Análise de custos

A análise que se segue irá ter em conta o investimento inicial e os principais custos de utilização dos túneis, isto é, o custo de energia eléctrica e o custo de azoto para o caso do túnel criogénico, bem como a diferença de perda de massa do produto.

No entanto, não entrará para efeitos de cálculo, o custo relacionado com os recursos humanos isto é, com os trabalhadores, nem com o transporte do produto para Portugal, uma vez que estes valores serão muito semelhantes entre os dois processos. Para efeitos de venda de produto, este será encaminhado para uma superfície comercial em Portugal.

Partir-se-á do pressuposto que o túnel clássico fará dois ciclos diários, correspondentes a 10 horas de funcionamento, congelando um total de 10 toneladas de produto. Por analogia, o túnel criogénico congelará igual quantidade de camarão diariamente ao longo de 10 horas.

Em termos anuais, o cálculo será feito tendo como base um total de 2880 horas de trabalho, correspondentes a uma carga de 6 dias por semana durante 12 meses, ou seja, 288 dias anuais.

As tarifas eléctricas (Anexo XIII) dizem respeito à Electricidade de Moçambique, EDM. A electricidade é fornecida em média tensão uma vez que além de ser mais barata tem menos perdas na linha (transporte de potência em tensão induz uma corrente menor, resultando num menor efeito de Joule).

É ainda de referir que, em Moçambique, ainda se aplica uma tarifa única ao contrário de Portugal onde, para esta gama de tensões contratadas, se aplicam quatro tarifas diferentes, relativas ao período do dia em que o consumo é feito: hora de super vazio, vazio normal, cheio e de ponta.

Por outro lado, a tarifa fixa da componente activa tem um valor muito reduzido, sendo compensada pelo alto valor da componente reactiva. Tal deve-se sobretudo ao objectivo de penalizar todos aqueles que possuem equipamentos ineficientes ou que não têm equipamentos para reduzir o factor de potência como é o caso das baterias de condensadores. É de salientar que os custos de produção da energia reactiva são extremamente elevados pois

obriga a elevados investimentos nas centrais eléctricas para garantir o fornecimento de energia reactiva que acaba por não ter utilização produtiva.

Como ambas as instalações são servidas em média tensão, não se irá aplicar aos custos finais, a tarifa fixa relativa ao contrato com a fornecedora eléctrica.

### 8.1. *Túnel clássico*

Esta foi a primeira solução estudada e assentava na utilização de dois andares de compressão a NH<sub>3</sub> ou R717 com um compressor alternativo em cada andar.

Na baixa pressão o compressor aspira amoníaco do separador de líquido e opera no regime -40/-5°C. Os evaporadores são inundados em amoníaco previamente bombeado.

Na alta pressão o compressor aspira amoníaco do depósito intermédio e opera no regime -5/+49°C. A condensação é feita num condensador evaporativo.

Tal como foi analisado atrás, o compressor de baixa pressão tem um motor eléctrico com uma potência de 50kW enquanto que o de alta pressão tem uma potência de 90kW.

Estima-se que um túnel clássico descontínuo a amoníaco poderá ter um custo inicial de **430000€**. Note-se que este valor, apesar de parecer algo elevado, acaba por representar uma grande poupança ao longo da vida útil do túnel, uma vez que o consumo energético é pouco significativo quando comparado com uma instalação a R404a. Por outro lado, uma vez que as tubagens são em aço e não em cobre, a vida útil deste túnel é bem mais ampla.

Para efeitos de análise dos consumos eléctricos, os compressores funcionam durante todo o ciclo quer no Verão quer no Inverno uma vez que a diminuição da carga térmica no Inverno é desprezável face à carga introduzida pelo produto. Assim, a energia eléctrica activa consumida por dia será:

$$\text{Motor de BP: } 50kW \times 10 h = 500 kWh$$

$$\text{Motor de AP: } 90kW \times 10 h = 900 kWh$$

No total, consomem-se 1400 kWh de energia activa por dia. Tendo em conta a tarifa eléctrica aplicada ao país que é de 0,0384€/kWh, o custo diário relativa ao consumo de energia activa, cifra-se em 53,76 €.

Estima-se que a energia reactiva não ultrapasse os 2% uma vez que existem poucos arranques dos compressores em comparação com outras instalações que têm, por exemplo, o R404a como fluido frigorífico, em virtude da utilização da bomba recirculadora. Assim, o custo diário relativo à energia reactiva é de:  $1400 \times 0,02 \times 3,9985 = 111,96 \text{ €}$

Ao fim de um ano de utilização o consumo de energia por parte dos compressores terá um custo de aproximadamente  $(53,76 + 111,96) \times 288 = 47\,727\text{€}$ .

Há ainda que considerar o consumo eléctrico por parte dos ventiladores dos evaporadores e do condensador e da bomba de recirculação de amoníaco para os evaporadores, acrescentando-se para isso uma percentagem de 10% ao valor introduzido pelos compressores.

**O custo anual estimado desta instalação é de:  $47\,727 \times 1,1 = 52\,499 \approx 52\,500 \text{ €}$ .**

## 8.2. Túnel criogénico

O túnel de crio-congelação a azoto líquido foi a segunda solução estudada.

Segundo a AirLiquide pode estimar-se que um túnel criogénico contínuo deste tipo poderá ter um custo de 80 000€, mais 50 000 € para o depósito de armazenamento, mais 20 000€ para a tubagem de transporte do fluido, resultando num investimento inicial de **150 000€**. Tal como sucede no investimento do túnel clássico, este valor é aproximado.

Este túnel apresenta um consumo estimado de azoto de 1,24 kg por cada kg de produto a congelar e uma potência eléctrica de 7500 W, resultando num consumo diário de 75 kWh.

Uma vez que se congela 10 ton de produto diariamente, resulta num consumo de 12 400kg de azoto por dia. O custo do azoto a nível mundial não varia significativamente, podendo adoptar-se o valor médio de  $0,12 \pm 0,01 \text{ €/kg}$  (Air Liquide, sem data; Praxair, sem data). Aplicando o mínimo valor, ou seja,  $0,11 \text{ €/kg}$  obtém-se um custo diário de 1364 €, o que se traduz num custo anual de  $1364 \times 288 = 392\,832 \text{ €}$ .

Apesar de não haver certezas quanto ao real custo do azoto líquido em Moçambique, este nunca será inferior a  $0,11 \text{ €/kg}$ . Tal como a Air Liquide confirmou, o continente Africano, e Moçambique em particular, têm um problema relacionado com o abastecimento de azoto líquido, uma vez que não existem muitas fábricas de gases. Assim, o abastecimento ou é feito por via terrestre a partir da África do Sul e como tal, os custos de logística serão elevados, ou por via marítima em iso-contentores, resultando também num encarecimento desta aplicação.

Quanto ao custo da energia eléctrica, este túnel tem um consumo manifestamente inferior, quando comparados com os custos associados ao consumo de azoto tal como se irá ver.

Tendo em conta a tarifa de  $0,0384 \text{ €/kWh}$  o custo diário da energia activa é:  $2,88 \text{ €}$ .

Admitindo que o factor de potência é semelhante ao do túnel clássico, o custo diário relativo ao consumo de energia reactiva é:  $75 \times 0,02 \times 3,9985 = 6,00 \text{ €}$ .

Ao fim de um ano de utilização o consumo de energia por parte do túnel criogénico terá um custo de aproximadamente  $(2,88 + 6,00) \times 288 = 2557,44\text{€}$ , o que é desprezável face ao custo do azoto pois representa apenas 0,65% .

O custo anual estimado desta instalação é de:  $392\ 832 + 2557 = 395\ 389 \approx 395\ 400\text{€}$ .

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

Segundo a tabela 6 atrás apresentada, o camarão, quando congelado classicamente com uma velocidade de escoamento de ar de 6m/s, tem uma percentagem de perda média de 2,14%. Por outro lado, quando este produto é congelado criogénicamente com uma temperatura do interior do túnel de  $-70^{\circ}\text{C}$  apresenta uma percentagem de perda média de 1,83%, o que dá uma diferença de 0,31% face à congelação clássica.

Tendo em conta que uma grande superfície comercial em Portugal, vende 1kg de camarão calibre 40/60 de Moçambique a 22,49€/kg (19/06/2010) e admitindo que, regra geral, esta superfície comercial tem um lucro médio de 30% (Guerra, sem data), significa que o retalhista vendeu este produto a 15,74€/kg.

Aquela aparente pequena diferença de 0,31% representa uma perda anual de 8928 kg de produto caso este seja congelado classicamente, isto é, pelo facto de um retalhista congelar camarão, sob os pressupostos assentes neste trabalho, de uma forma clássica faz com que tenha uma perda directa anual de 140 527€ face à congelação criogénica.

Em termos comparativos, este valor pode servir para atenuar o custo anual relativo ao consumo de azoto, ficando-se com um custo de utilização do túnel criogénico de  $395\ 400 - 140\ 500 = 254\ 900\text{€}$ .

A diferença da receita de utilização anual dos tipos de instalação frigorífica estudados será de:

$$254\,900 - 52\,500 = 202\,400\text{€}$$

A diferença de investimento inicial das instalações e respectiva montagem será de:

$$430\,000 - 150\,000 = 280\,000\text{€}$$

A economia anual obtida pelo túnel clássico de aproximadamente 200 000 €, vai compensar esta instalação num prazo aproximado entre um e dois anos face à instalação criogénica. Após este período, o custo total de utilização do túnel criogénico aumenta progressivamente face ao túnel clássico, tal como se pode verificar na figura 17. Após 11 anos de funcionamento, espera-se que o túnel criogénico apresenta um custo de 2 000 000€ superior ao túnel clássico (valor estimado).

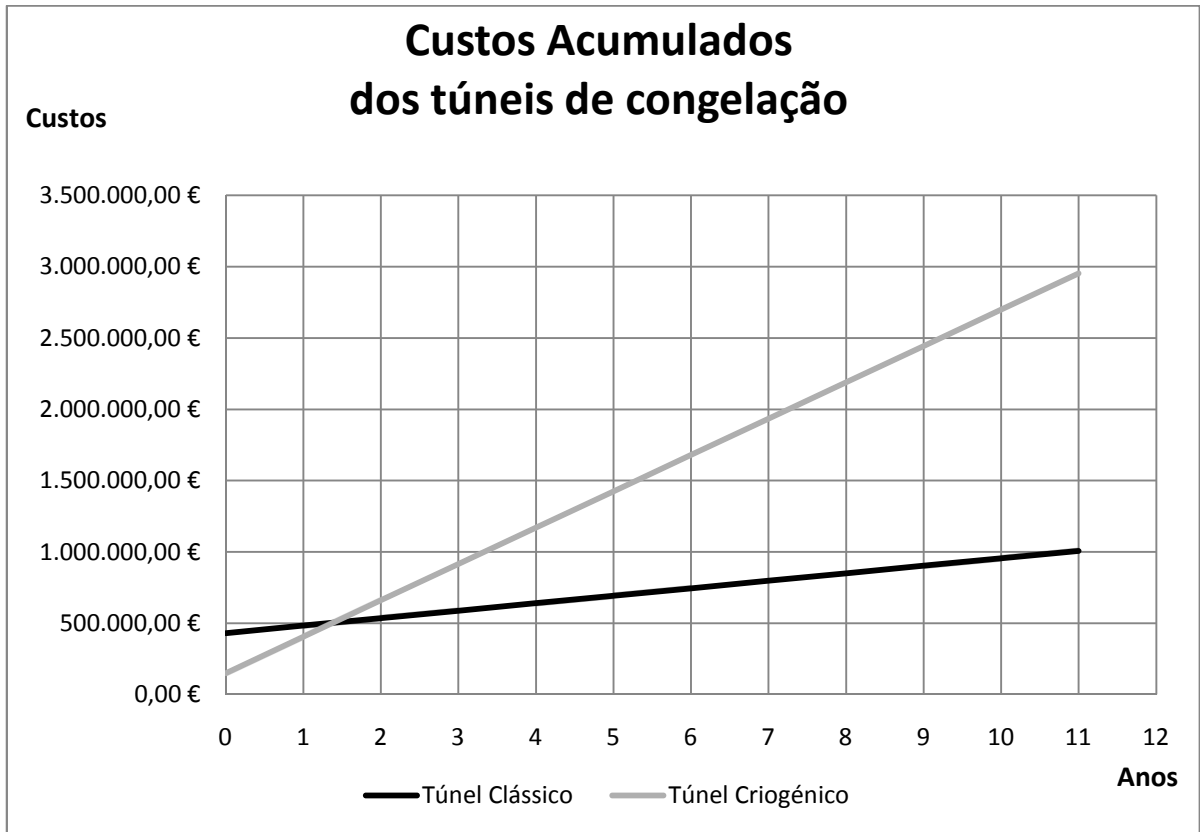


Figura 17 – Custos acumulados do túnel de congelação clássico e criogénico

## 9. Discussão dos resultados

Este estudo dividiu-se em duas partes principais, a primeira em que se analisou a efectiva diferença qualitativa entre uma congelação criogénica e uma congelação clássica, onde se verificou, entre outras coisas, a diferença de humidades, perda de produto e qualidade geral. Para a obtenção da qualidade geral foi analisada a textura, sensação gustativa, oleosidade e sabor.

A tabela 6, disponibilizada no capítulo 6, apresenta uma série de características do produto quando este foi congelado de forma clássica e de forma criogénica. A velocidade da frente de frio apurada é de certo modo a esperada uma vez que vem comprovar o que diversos autores afirmam, nomeadamente Kondratowicz et al. (2002), em que, segundo eles, esta taxa situa-se entre 5 e 8 cm/h num produto congelado mecanicamente, enquanto que no caso do uso de azoto, este valor situa-se acima dos 10cm/h.

Relativamente à perda de produto, conseqüente da velocidade de fluxo de ar, chega-se à conclusão que 8 m/s é uma velocidade excessiva uma vez que as perdas de produto são mais expressivas do que as existentes com as duas velocidades mais baixas. Este facto pode ser facilmente explicado uma vez que com velocidades de fluxo mais elevadas resulta uma maior desidratação do produto como conseqüência da maior taxa de vaporização de água.

Ao ser usado um fluxo de ar de 6 m/s ou de 4 m/s, resulta uma menor perda de produto. No entanto, o produto ao ser submetido a um fluxo de ar de 6m/s necessita de uma força de corte muito semelhante ao produto fresco ( $P < 0,05$ ). Aparentemente a força de corte está relacionada com a taxa de evaporação de água na superfície do produto, pois a maior desidratação leva a uma maior dureza da sua superfície e conseqüentemente a força de corte necessária aumenta. Assim, com a velocidade de fluxo de ar de 6m/s, a taxa de evaporação de água da superfície do produto é próxima do ideal, e por isso admite-se que é esta a velocidade de fluxo de ar mais aconselhada para a congelação do camarão.

Ainda relativamente ao mesmo quadro, mas analisando a congelação criogénica, a perda de produto é muito semelhante entre as quatro temperaturas diferentes do túnel de congelação. No entanto não se passa o mesmo relativamente à força de corte, resultando numa vantagem explícita com a temperatura de  $-70^{\circ}\text{C}$  uma vez que a força de corte necessária ao produto

congelado com esta temperatura é muito semelhante à necessária ao produto fresco ( $P < 0,05$ ). Caso se use a temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$  necessita-se de uma força de corte bastante inferior à normal, talvez devido ao fenómeno de ruptura “estaladiça” presente nas células do produto quando este é congelado a baixas temperaturas (Pan, et al., 1993). Assim, admite-se que a temperatura ideal do interior túnel criogénico para o congelamento de camarão é de  $-70^{\circ}\text{C}$ .

Ainda relativamente a este estudo, pensa-se que seria vantajoso submeter o produto a uma congelação criogénica com temperaturas superiores a  $-70$ , nomeadamente  $-60$  e  $-50$ , uma vez que nada impede que a temperatura óptima do interior do túnel de congelação seja superior a  $-70$ . Por outro lado, caso haja evidência de que se pode utilizar uma temperatura superior àquela, ter-se-ia uma clara vantagem relacionada com os custos de operação, uma vez que o consumo de azoto iria reduzir-se para a mesma quantidade de produto a congelar. Esta foi de facto a temperatura escolhida pois, de todas as disponíveis, foi a que apresentou melhores resultados

Relativamente à análise dos ciclos congelação/descongelação, presentes nas figuras 7 e 8, desde logo se verifica que a congelação criogénica apresenta sempre melhores resultados em relação à congelação clássica, tanto na perda de produto como na força de corte, resultando numa significativa vantagem da congelação criogénica face à clássica.

Esta análise é ainda mais expressiva caso o produto seja submetido a quatro congelações criogénicas e quatro descongelações em câmara de refrigeração, onde continua a ter perdas inferiores a uma só congelação clássica/descongelação lenta realçando a vantagem da congelação criogénica ao nível de perdas de produto.

Uma das limitações do estudo teve como origem o facto de não se encontrar nenhum estudo comparativo da qualidade, no caso específico, de camarão quando congelado de forma clássica e de forma criogénica. Ainda assim, tentou-se solucionar este problema através da inclusão de um estudo deste género, não relativo ao camarão mas à batata frita. Pensa-se que os resultados podem ser cuidadosamente extrapolados, sem grandes erros associados, para o camarão uma vez que ambos são constituídos por células, o que faz com que apresentem danos celulares semelhantes.

Relativamente aquela comparação directa entre as principais propriedades de um alimento celular, sob ponto de vista da qualidade obtida pelos dois tipos de congelação em análise (Tabela 7), observa-se facilmente que o júri atribuiu uma superioridade geral à congelação criogénica face à congelação clássica, através da pontuação da qualidade geral.

Relativamente à batata frita, não se verificou uma grande diferença no que respeita à cor, textura e à sensação gustativa, no entanto já a oleosidade e sabor tiveram uma média mais elevada na congelação criogénica do que na congelação clássica, quer o produto seja avaliado imediatamente após a congelação, quer o produto seja avaliado após 12 semanas de armazenamento. É ainda de salientar que, caso o produto seja armazenado durante 12 semanas, a congelação criogénica de forma indirecta deixa o produto com uma qualidade ligeiramente superior à congelação criogénica de forma directa.

Em produtos não celulares, já não se verifica uma diferença tão notória, especialmente quando o produto fica armazenado durante algum tempo, diluindo-se assim, a diferença entre a congelação clássica e criogénica neste tipo de produtos.

Apesar desta comparação vir dar ênfase à superioridade da congelação criogénica em termos de qualidade final do produto, não se deve, afirmar que a congelação rápida é benéfica para todos os géneros alimentícios. Tal como se afirmou no decorrer do trabalho, uma congelação excessivamente rápida pode vir a ser problemática em produtos de grande dimensão e em produtos com texturas mais sensíveis.

Na análise económica de ambos os tipos de congelação, desde logo se verifica um investimento inicial do túnel clássico bastante superior ao túnel criogénico, que neste caso foi de 187%. É importante referir que o túnel clássico tem como fluido o amoníaco e como tal, apesar de necessitar de um investimento mais dispendioso, apresenta um consumo energético bastante inferior, ao mesmo tempo que anuncia uma vida útil significativamente superior a um túnel clássico que tem como fluido frigorífico o R404a.

Por outro lado, existe um grande volume de perdas económicas, associadas às perdas de produto, isto é, o túnel clássico provoca uma perda de peso do produto superior ao túnel criogénico. Em termos médios esta diferença ronda os 0,35%, no entanto como o volume de produto congelado deste tipo de túneis é de milhares de toneladas por ano, traduz-se numa

perda económica realmente significativa, dependendo do valor do produto congelado, mas que pode atingir algumas centenas de milhares de euros anuais.

Esta é de facto uma das razões 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 produto têm um valor muito significativo. Esta escolha torna-se ainda mais evidente caso as tarifas energéticas sejam elevadas, uma vez que propicia um aumento do custo de utilização do túnel clássico e consequente diminuição da diferença deste tipo de custos entre este túnel e o túnel criogénico.

Um outro factor não menos importante é a facilidade concedida por alguns fornecedores de fluidos criogénicos uma vez que em certas situações existe a possibilidade de aluguer de um túnel criogénico, mediante uma prestação mensal não muito significativa. Esta situação apresenta como principal vantagem o facto de se poder trocar de túnel quando necessário sem ter o prejuízo do investimento inicial.

O custo anual associado ao funcionamento do túnel criogénico é muitíssimo superior ao túnel clássico, sendo que a diferença, no caso estudado, foi de 653% valor próximo ao disponibilizado pelo fabricante Advanced Equipment Inc. Este valor representa um custo anual de centenas de milhares de euros, o que pode desde logo, representar o maior problema na aquisição deste tipo de túnel.

No presente caso, o custo anual associado ao consumo de azoto é de aproximadamente 393.000€/ano para um total de produto congelado de 2880 ton/ano. O custo do consumo anual de azoto foi, neste caso, quase equivalente a todo o investimento inicial do túnel clássico. Admitindo que o retalhista vende este produto a 15€/kg como foi atrás descrito, basta aumentar 0,136€/kg (0,91%) de produto para que se pague todo o azoto gasto no processo de congelação.

Significa então que, para este caso, se o retalhista vender o seu produto 0,91% mais caro, fica com todos os custos associados ao fluido, pagos. Por ventura, este custo poderia ser suportado pelos consumidores finais, uma vez que o produto adquirido possui uma qualidade significativamente superior ao produto congelado mecanicamente, pagando-se assim a

qualidade. Pensa-se que este raciocínio não seria válido para o caso da economia Portuguesa, devido à mentalidade existente no seio da comunidade, uma vez que o típico Português quer comprar ao mínimo custo possível. No entanto talvez fosse válida para outras economias mais exigentes como é o caso dos países nórdicos.

Acredita-se que a maioria dos retalhistas, prefiram assim suportar todo o custo da congelação criogénica, ganhando assim eventuais clientes. Desta forma, o presumível aumento de clientes seria responsável por uma aumento de lucro o que, conseqüentemente, ajudaria ao suporte dos elevados custos que envolvem o processo de congelação criogénica.

## 10. Conclusão

As principais conclusões que se obtêm deste estudo são:

- Os cristais de gelo formados durante o processo de congelação têm um impacto directo na qualidade final do produto, na medida em que, uma congelação lenta, com uma reduzida velocidade da frente de frio, origina grandes cristais que danificam as paredes celulares resultando numa perda da integridade estrutural e consequente diminuição da qualidade do produto.
- Os produtos com células danificadas, devidas aos cristais de gelo, dão origem a uma diminuição da massa do produto, fruto da perda de fluidos. A congelação clássica propicia um tamanho superior de cristais de gelo que, aliada à maior taxa de vaporização de água da superfície do produto, se traduz em superiores perdas económicas directas face à congelação criogénica.
- A crio-congelação de géneros alimentícios garante um aumento geral da qualidade dos produtos face à congelação clássica.
- Não se deve submeter o produto a mais de dois ciclos congelação/descongelação de forma a evitar o aumento e ampliação dos efeitos indesejáveis que ocorrem durante a congelação e como tal, é importantíssimo evitar flutuações térmicas durante o transporte e armazenamento de produtos congelados.
- O investimento inicial associado a um túnel clássico apesar de ser significativamente superior ao túnel criogénico, é quase insignificante quando comparado com a diferença de custos de utilização entre os dois túneis.
- Esta análise económica é de tal modo assimétrica que, mesmo contando com a maior perda da menor perda de massa de produto do processo criogénico, após 11 anos de funcionamento, o túnel clássico apresenta uma redução de custos na ordem dos 2000000€ face à utilização do túnel criogénico nas condições referidas neste estudo, e como tal, neste momento a implementação de um túnel de congelação criogénica a azoto em detrimento de um túnel clássico para o processamento de camarão em Moçambique e venda em Portugal não é viável.

Este estudo apresenta as seguintes limitações:

- Não se encontraram estudos relativos à análise comparativa da qualidade obtida no camarão quando este é congelado classicamente e criogénicamente.
- Apenas se conseguiu realizar uma ligeira comparação física entre o processo de congelação com azoto e com dióxido de carbono, uma vez que não se encontraram estudos que aprofundassem esta temática. Não foi, por isso, possível estabelecer as diferenças de qualidade obtidas perante uma congelação com recurso a azoto e com recurso a dióxido de carbono.

Pensa-se que este trabalho pode posteriormente ser desenvolvido de forma a aprofundar e melhorar ainda mais o conhecimento existente nesta área e como tal sugerem-se os seguintes estudos futuros:

- Estudo e comparação da qualidade obtida no caso específico da congelação de camarão, quando esta é feita de forma criogénica ou de forma clássica.
- Análise da qualidade obtida num produto quando congelado por azoto ou por dióxido de carbono.
- Medição e monitorização constante dos consumos energéticos e de fluidos nomeadamente de azoto ou dióxido de carbono em túneis de congelação em pleno funcionamento de forma a ser possível uma comparação do custo real da operação destes dois túneis.
- Estudo da aplicabilidade de um sistema de congelação misto no mercado, isto é, verificar se o mercado acolheria e utilizaria um túnel de congelação de géneros alimentícios que tem por base do seu funcionamento uma combinação entre um túnel clássico e um túnel criogénico. Por outro lado, seria também interessante o estudo e comparação do custo de utilização de um túnel deste tipo com um túnel clássico e um túnel criogénico.
- Um estudo com temperaturas superiores a  $-70^{\circ}\text{C}$  num túnel de congelação criogénico seria vantajoso a fim de se saber se o produto continua com as suas excelentes propriedades características deste tipo de congelação. Em caso afirmativo, poderá haver a mais-valia da diminuição do consumo de azoto neste tipo de túneis e consequentes custos.

- Por fim, seria muito útil a existência de um estudo de mercado, de forma a concluir se é ou não viável a introdução de géneros alimentícios ligeiramente mais caros, mas com uma qualidade superior, no mercado Português.

Seria de facto óptimo caso se conseguisse dizer qual é o melhor túnel. No entanto pelas razões conhecidas, tal é impossível, uma vez que ambos apresentam vantagens e limitações. A escolha do túnel depende, principalmente, do tipo de produto a congelar, do tipo de mercado alvo a que o produto se destina, da filosofia de negócio de cada retalhista, bem como dos custos associados ao processo de congelação.

Faz todo o sentido que o túnel criogénico seja usado em produtos com um elevado valor comercial, ou em produtos cujas características físicas, impossibilitam o seu congelamento em túneis clássicos.

O ideal seria obter uma elevada qualidade no produto ao mesmo tempo que se alcançava um custo de congelação reduzido, no entanto estes dois objectivos permanecerão, por enquanto, inatingíveis enquanto o processo de congelação for feito apenas por túneis clássicos ou por túneis criogénicos.

## 11. Referências bibliográficas

- Ahmedabad (2008). *Freezing - Low temperatures preservation technologies*. FMC FoodTech.
- Air\_liquide (2010). *Produção de gases do ar*. Disponível:  
<http://www.airliquide.pt/pt/produtos-e-servicos/fornecimento-canalizado/producao-de-gases-do-ar-asu.html>.
- Air\_liquide (sem data). Air Liquide Portugal. Disponível:  
<http://www.airliquide.pt/pt/quem-somos/air-liquide-portugal.html>
- Ângelo, Maria Gabriela (2009). *Projecto de concepção de entreposto frigorífico para produtos alimentares congelados*. Lisboa: ISEL.
- AOAC (1995). *Official method analysis* (vol. 16). Washington: Association of the Official Analytical Chemists.
- Arjárov, A., Marfénina, I. & Mikulin, E. (1990). *Sistemas Criogénicos*. Editorial Mir Moscú.
- Boonsumrej, S., Chaiwanichsiri, S., Tantratian, S., Suzuki, T. & Takai, R. (2007). *Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (Penaeus monodon) frozen by air-blast and cryogenic freezing*. Journal of Food Engineering, 80, 292-299.
- Çengel, Y. & Boles, M.A. (2001). *Termodinâmica* (vol. 3). Lisboa: McGraw-Hill.
- Centauro, 2010. Disponível:  
[www.centauro.pt/index.php?option=com\\_docman&task=cat\\_view&gid=36&Itemid=26](http://www.centauro.pt/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=36&Itemid=26)
- Chourot, J.M., Macchi, H., Fournaison, L. & Guilpart, J. (2003). *Technical and economical model for the freezing cost comparison of immersion, cryomechanical and air blast freezing processes*. France : Energy Conversion and Management, 44, 559-571.
- Costa, Ê.C. (1982). *Refrigeração* (vol. 3). Editora Edgard Blucher.
- Creus, J.A. (1978). *Tratado Prático de Refrigeração Automática*. Lisboa : Dinalivro.
- Dash, S.M. (2009). *Study of cryogenic cycles with aspen-insys simulations*. Rourkela : National Institute of Technology.
- Dinçer, I. (2003). *Refrigeration Systems and Applications*. England: Wiley.
- Dossat, R.J. (1980). *Princípios de Refrigeração* (vol. 1). USA : Hemus.
- Dossat, R.J. (1997). *Principles of Refrigeration* (vol. 4). New Jersey : Prentice Hall.
- EDM (2006). *Relatório Anual de Estatística – EDM*. Unidade de Gestão e Desempenho Empresarial da Electricidade de Moçambique. Moçambique.
- ETSIA-UPM (2005). *Termodinamica aplicada*. Madrid : Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid.
- Freezer – Advanced Equipment Inc. (2007). Disponível:  
[http://www.iqffreezer.com/plistings\\_268\\_41.php](http://www.iqffreezer.com/plistings_268_41.php).
- Gameiro, W. (1999). *Concepção e cálculo de um sistema sobrealimentado*. Lisboa
- Guerra, Matos. (sem data). Unidade curricular de Refrigeração. Lisboa: ISEL
- Johnston, W.A., Nicholson, F.J., Roger, A. & Stroud, G.D. (1994). *Freezing and refrigerated storage in fisheries* - Fao Fisheries Technical Paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 340.
- Karel, M., & Straud, D.B. (2003). *Physical principles of food preservation* (vol. 39). New York : Marcel Dekker, Inc.
- Khadatkar, R.M., Kumar, S. & Pattanayak, S.C. (2004). *Cryofreezing and cryofreezer*. Science Direct, 44, 661-678. India.
- Kister, H. Z. (1992). *Distillation Design* (vol. 1). United States of America: McGraw-Hill.
- Kock, S., Minnaar, A., Berry, D. & Taylor, J.R.N. (1995). *The effect of freezing rate on the quality of cellular and non cellular par-cooked starchy convenience foods*. South Africa : Lebensmittel Wissenschaft & Technologie, 28, 87-95.

- Koelet, P.C. (1992). *Industrial Refrigeration - Principles, Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc.
- Kondratowicz, J. & Matusевичius, P. (2002). *Use of low temperatures for food preservation*. Olsztyn : University of Warmia and Mazury - Departement od Science od Commodities od Animal Raw Materials, 17 (39), 88-92.
- Linde (2005). *Aplicações dos gases*. Disponível: <http://www.linde-gas.com.br/International/Web/Lg/BR/Likelgbr.nsf/0/A82AF7EC3F282C3106256DE800213934>.
- Linde (2009). *Criogenic Air Separation - History and Tecnological Progress*. The Linde Group, Germany.
- Londahl, G. (1997). *Technological aspects of freezing and glazing shrimp*. Infofish International, 3, 49-56.
- Lopkulkiaert, W., Krisana, P. & Rungsardthong, V. (2009). *Effects of sodium bicarbonate containing traces of citric acid in combination with sodium chloride on yield and some properties of white shrimp (Penaeus vannamei) frozen by shelf freezing, air-blast and cryogenic freezing*. Elsevier, 42, 768-776.
- Matheson Tri Gas, sem data. Disponível: <http://www.mathesontrigas.com/industrialgas/FoodAndBeverage.aspx>
- Pan, B. S. & Yeh, W. T. (1993). *Biochemical and morphological changes in grass shrimp (Penaeus monodon) muscle following freezing by air blast and liquid nitrogen methods*. *Journal of Food Biochemistry*, 17, 147-160.
- Pereda, O. & Juan A. (2005). *Tecnologia dos alimentos*. Porto Alegre : ArtMed, 2005.
- Praxair (sem data). *Alimentação*. Castanheira do Ribatejo.
- Pruthi, J.S. (1999). *Quick freezing preservation of foods* (vol. 1). New Delhi : Allied India Publishers Ltd.
- Rapin, P. (1978). *Manual do Frio: formulas técnicas refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: Hemus
- Refrigeration Utilities (2001). Department of Mechanical Engineering. Denmark.
- Roça, R. O. (sem data). *Congelamento*. Botucatu: Laboratório de Tecnologia dos Produtos de Origem Animal.
- Santos, F. G. (2008). *Instalações Frigoríficas*. Lisboa: ISEL.
- Sethi, S. (2007). *Principles od Food Processing*. New Delhi : Horticulture Post Harvest Tecnology.
- The Engineering Toolbox (sem data). *Steel pipesand heat loss diagram*. Disponível: [http://www.engineeringtoolbox.com/steel-pipes-heat-loss-d\\_53.html](http://www.engineeringtoolbox.com/steel-pipes-heat-loss-d_53.html)
- The Engineering Toolbox (sem data). *Heat loss diagrams of insulated pipes*. Disponível: [http://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-insulated-pipes-d\\_1151.html](http://www.engineeringtoolbox.com/heat-loss-insulated-pipes-d_1151.html)
- University of Twente portal (2009). Disponível: [http://lt.tnw.utwente.nl/research/cooling/Technology/linde\\_hampson.doc/](http://lt.tnw.utwente.nl/research/cooling/Technology/linde_hampson.doc/).

## **12. Anexos**

## ANEXO I – Ciclo frigorífico

A figura reflecte o ciclo frigorífico clássico, onde são evidenciadas a zona fria e a zona quente referentes ao calor absorvido e ao calor rejeitado, respectivamente.

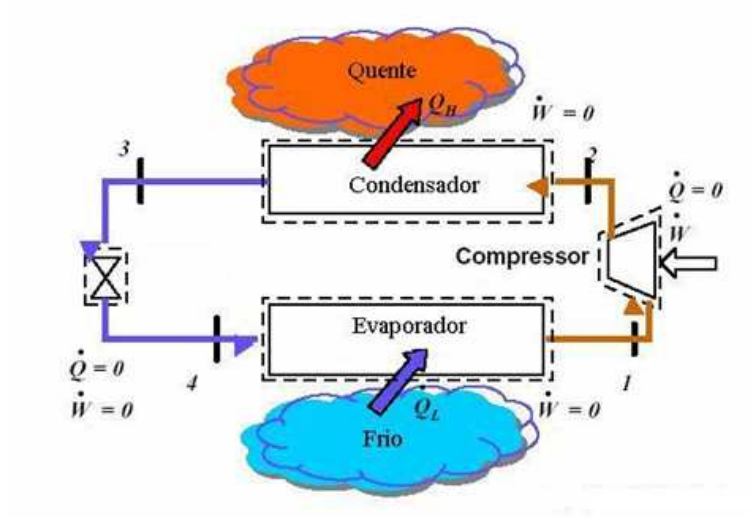


Figura 1 – Ciclo frigorífico (Çengel, et al., 2001)

ANEXO II – Curvas críticas do ar e seus principais constituintes

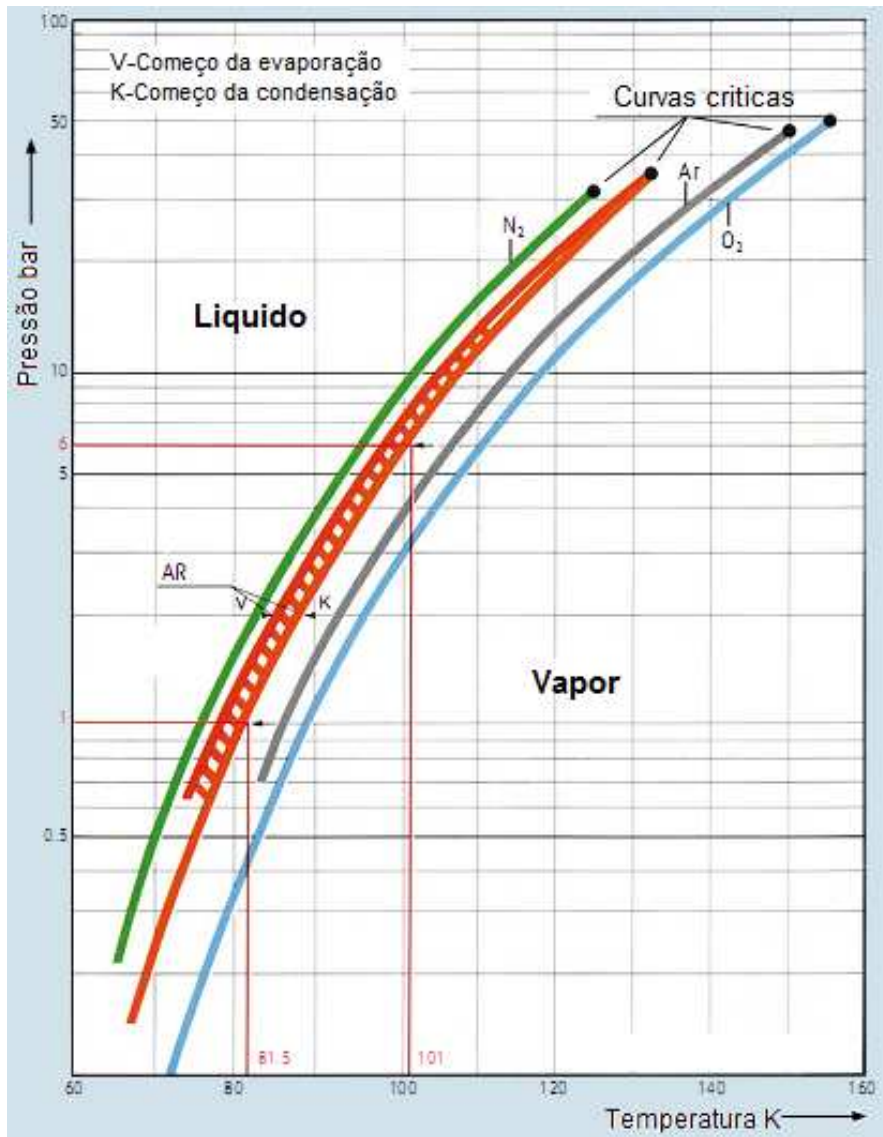


Figura 1 – Curvas críticas (Linde, 2009)

ANEXO III – Diagrama T-s do ar.

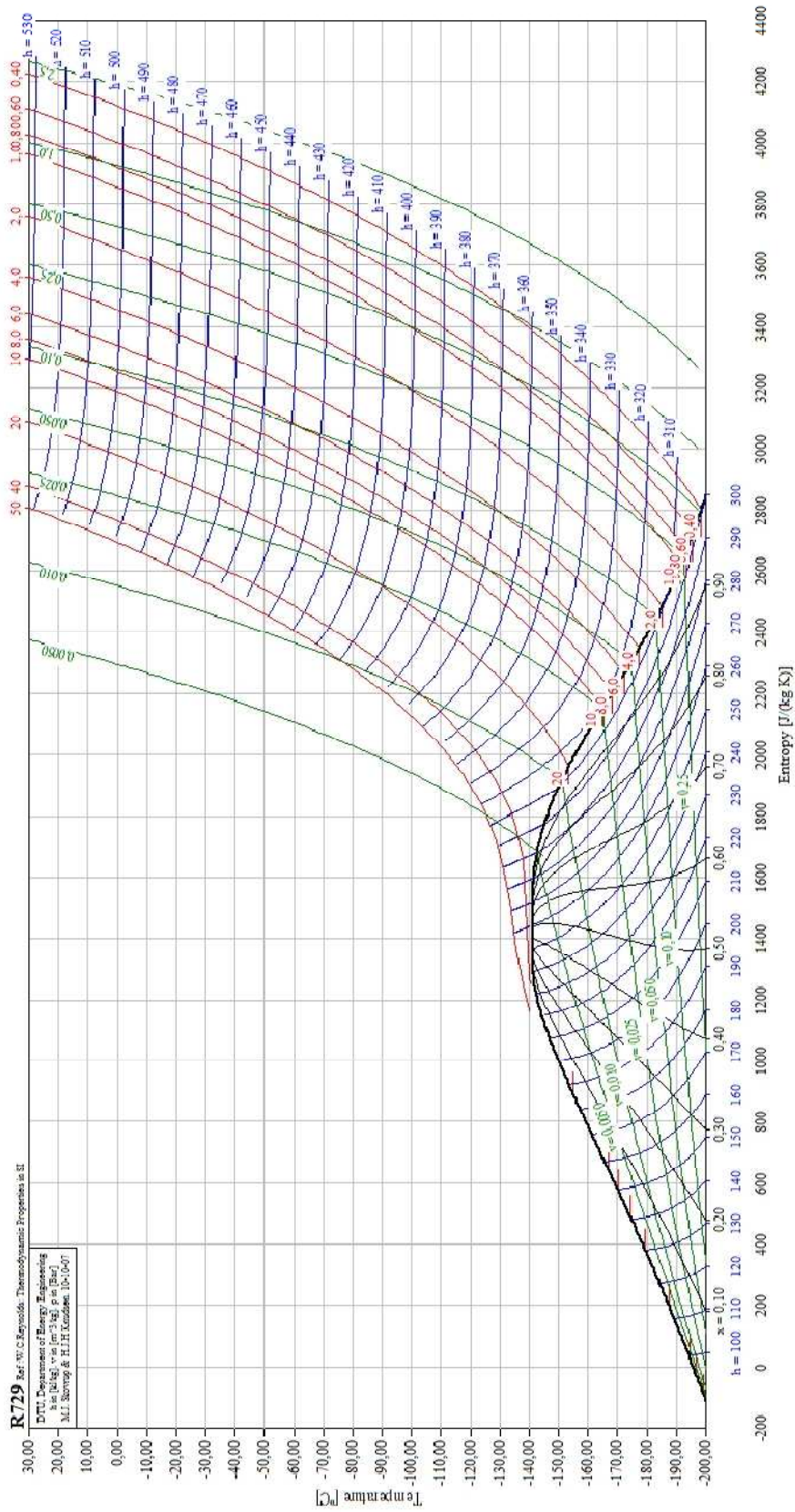


Figura 1 – Diagrama T-s do ar (Refrigeration Utilities, 2001)

## ANEXO IV – Túneis de congelação de ar clássicos

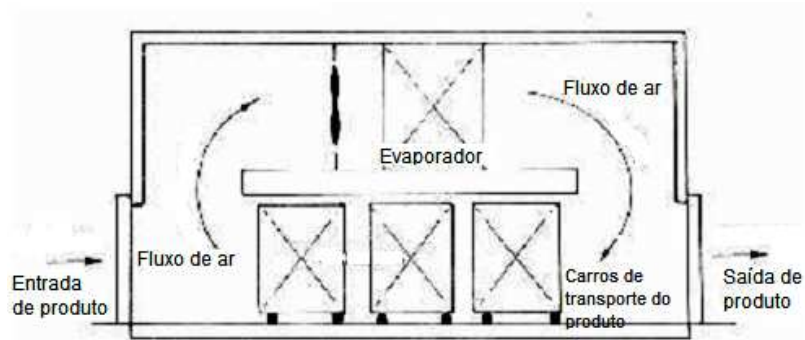


Figura 1 – Túnel de congelação contínuo com carros de transporte (Johnston, et al., 1994)

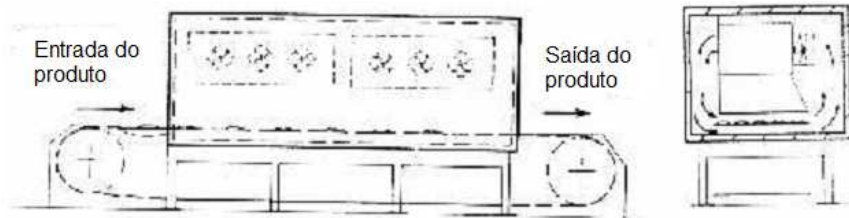


Figura 2 – Túnel de congelação contínuo em cintas transportadoras (Johnston, et al., 1994)

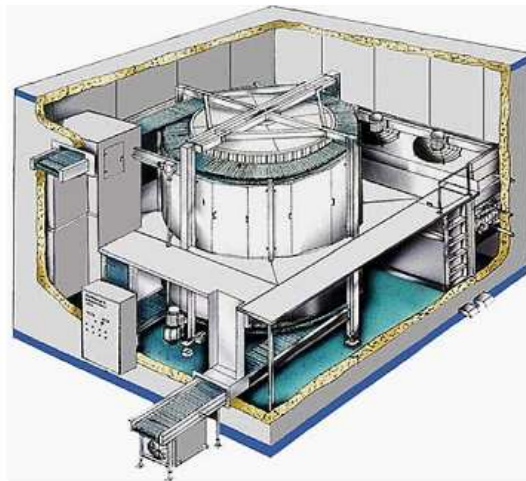


Figura 3- Túnel de congelação clássico em espiral (Advanced\_Equipment\_Inc.)

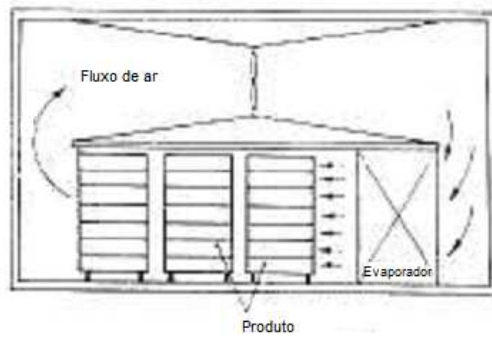


Figura 4 – Túnel de congelação descontínuo (Johnston, et al., 1994)

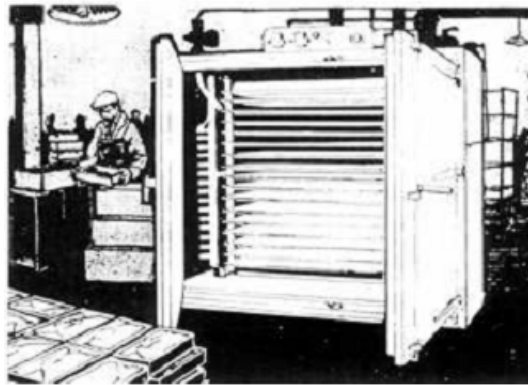


Figura 5 – Armário de placas horizontais (Johnston, et al., 1994)

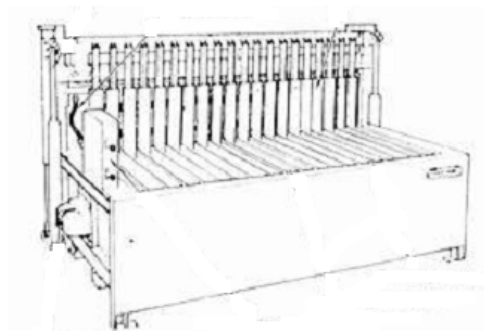


Figura 6 – Armário de placas verticais (Johnston, et al., 1994)

ANEXO V – Propriedades de algumas salmouras

ÁLCOOL		CLORETO DE CÁLCIO (Cl <sub>2</sub> Ca)				CLORETO DE SÓDIO (ClNa)		
Volume de álcool em 100 de água	Ponto de congelação C	Peso específico (Densímetro normal)	Partes de sal em 100 de água (Densímetro normal)	Ponto de congelação C	Calor específico	Partes de sal em 100 de água (Densímetro normal)	Ponto de congelação C	Calor específico
2,5	0	1,05	6,3	— 3,0	0,915	7,5	— 4,6	0,910
6,8	— 3,0	1,10	13,0	— 7,1	0,835	15,7	— 10,4	0,855
13,8	— 6,0	1,12	15,9	— 9,1	0,805	19,3	— 13,2	0,835
17,5	— 8,5	1,14	18,8	— 11,4	0,775	23,1	— 16,2	0,815
20,3	— 10,8	1,16	21,7	— 14,2	0,750	26,9	— 19,4	0,800
24,2	— 14,0	1,18	24,9	— 17,4	0,730	—	—	—
29,9	— 19,0	1,20	28,0	— 21,2	0,705	—	—	—
39,0	— 29,0	1,24	34,6	— 31,2	0,665	—	—	—
56,1	— 41,0	1,28	41,6	— 50,1	0,630	—	—	—

Figura 1 – Propriedades de salmouras (Creus, 1978)

## ANEXO VI – Tanque de salmoura

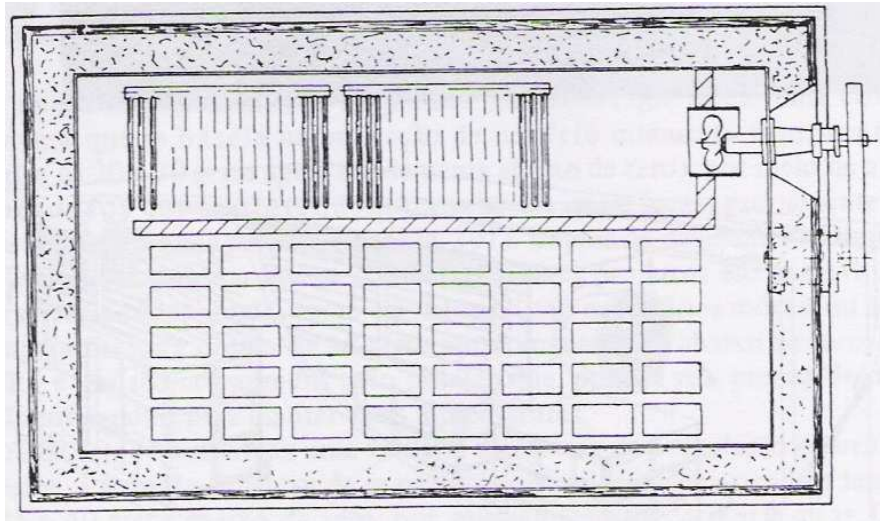


Figura 1 – Tanque de salmoura (Creus, 1978)

Neste figura pode-se observar o circuito evaporativo e o impulsor responsável por mover o fluido desde a serpentina evaporativa até ao produto a congelar.

## ANEXO VII – Túneis de congelação criogénicos

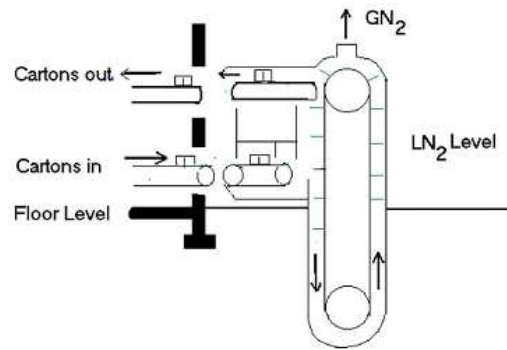


Figura 1 – Elevador de congelação criogénica (Khadatkar, et al., 2004)

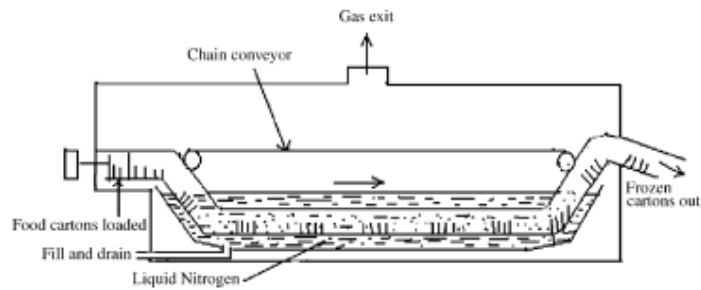


Figura 2 – Transportador de congelação criogénica (Khadatkar, et al., 2004)



Figura 3 – Congelador criogénico por pulverização (Air Liquide, sem data)

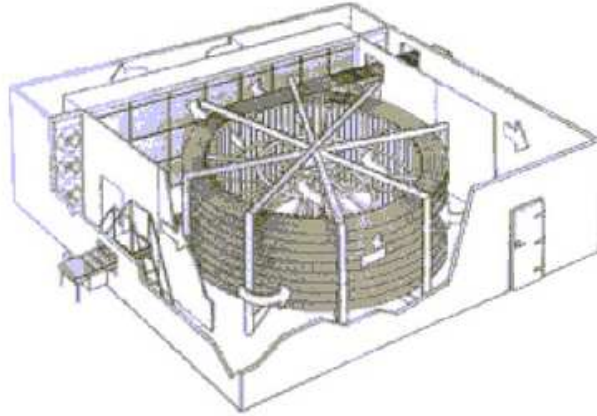


Figura 4 – Congelador criogénico por pulverização em espiral (Khadatkar, et al., 2004)2

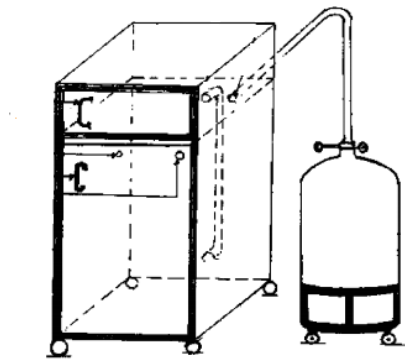


Figura 5 – Congelador criogénico indirecto vertical. (Khadatkar, et al., 2004)

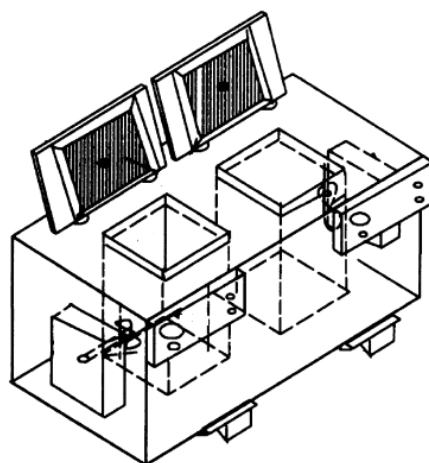


Figura 6 – Congelador criogénico indirecto horizontal. (Khadatkar, et al., 2004)

## ANEXO VIII – Túnel de congelação misto



Figura 1 – Túnel de congelação misto (Miakawa, 2001)

ANEXO IX – Fotografia microscópica de células danificadas e não danificadas

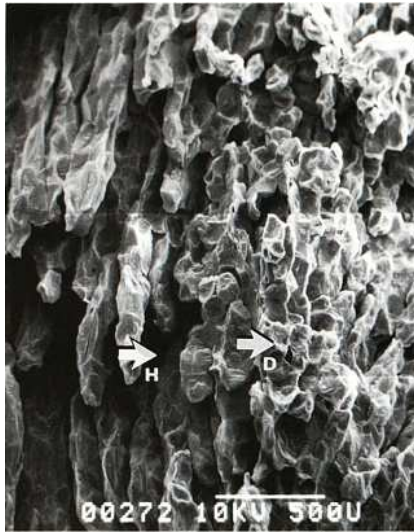


Figura 1 – Plano de batatas fritas congeladas mecanicamente (ampliação de 45X) D- célula danificada; H – cavidade formada por um grande cristal de gelo intercelular. (Kock, et al., 1995)



Figura 2 – Plano de batatas fritas congeladas criogenicamente (ampliação de 45X) U – célula não danificada. (Kock, et al., 1995)

# ANEXO X – Diagramas de Mollier do amoníaco e do azoto

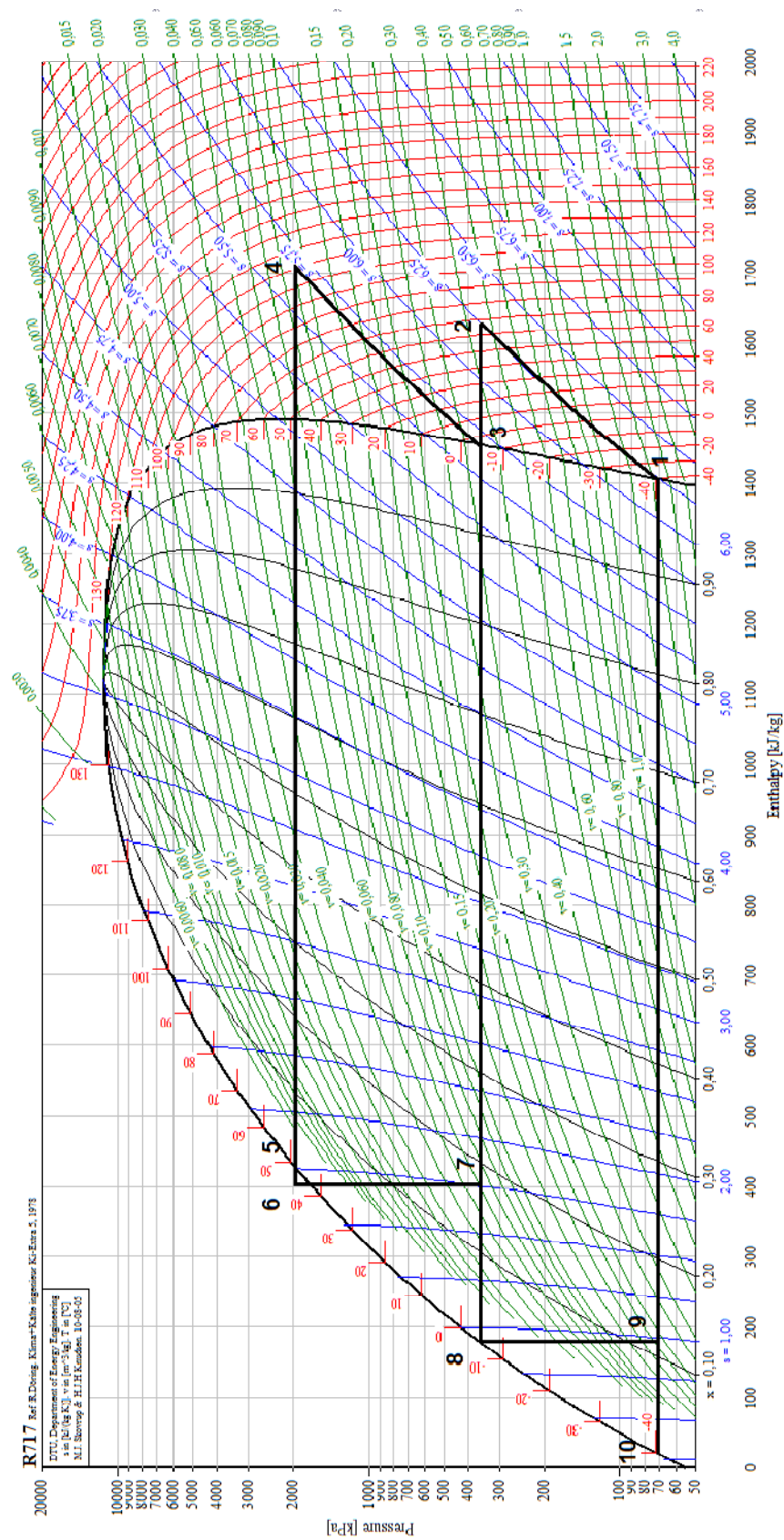


Figura 1 – Diagrama de Mollier do amoníaco (Refrigeration Utilities, 2001)

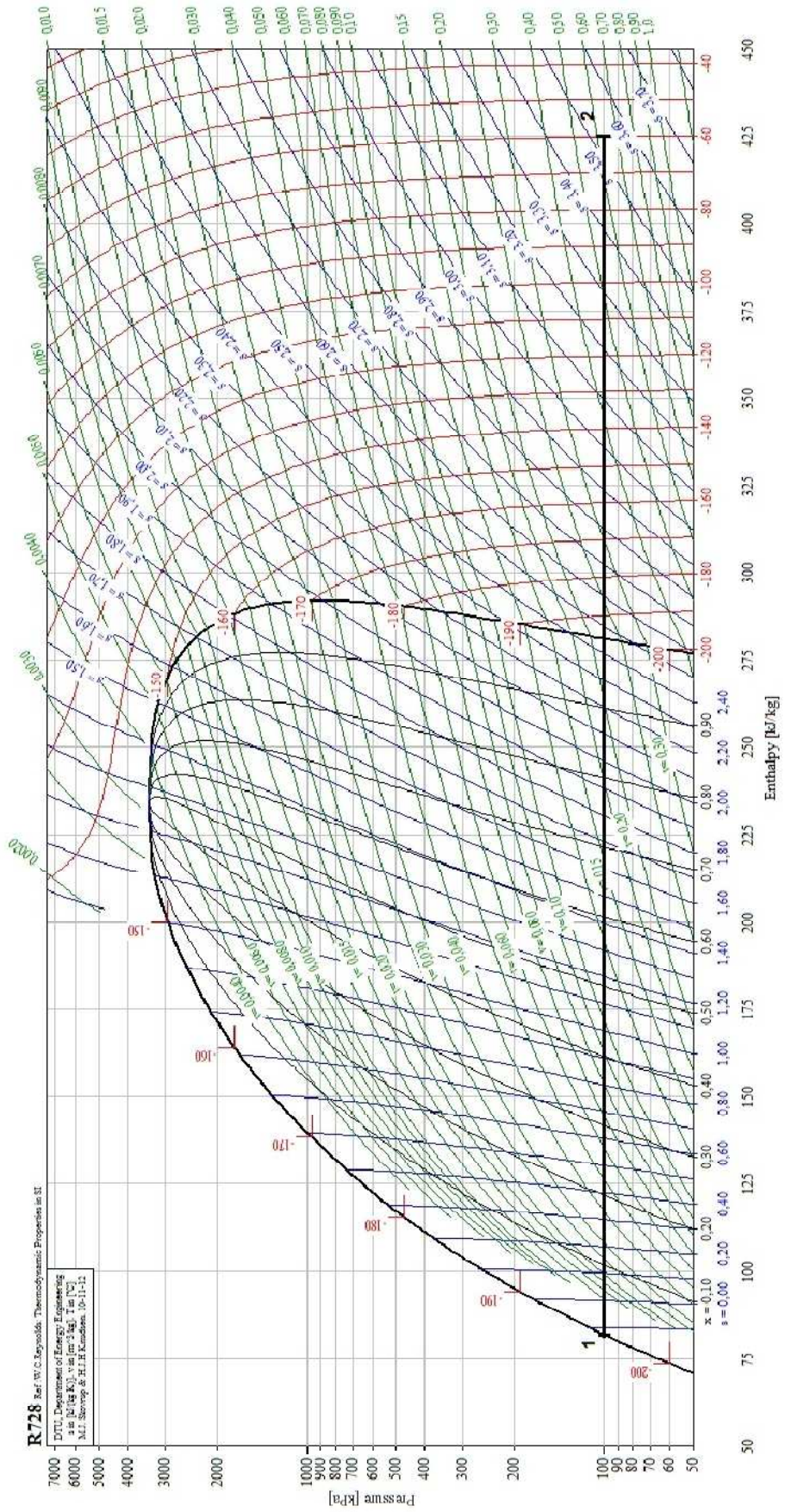


Figura 2 – Diagrama de Mollier do azoto (Refrigeration Utilities, 2001)

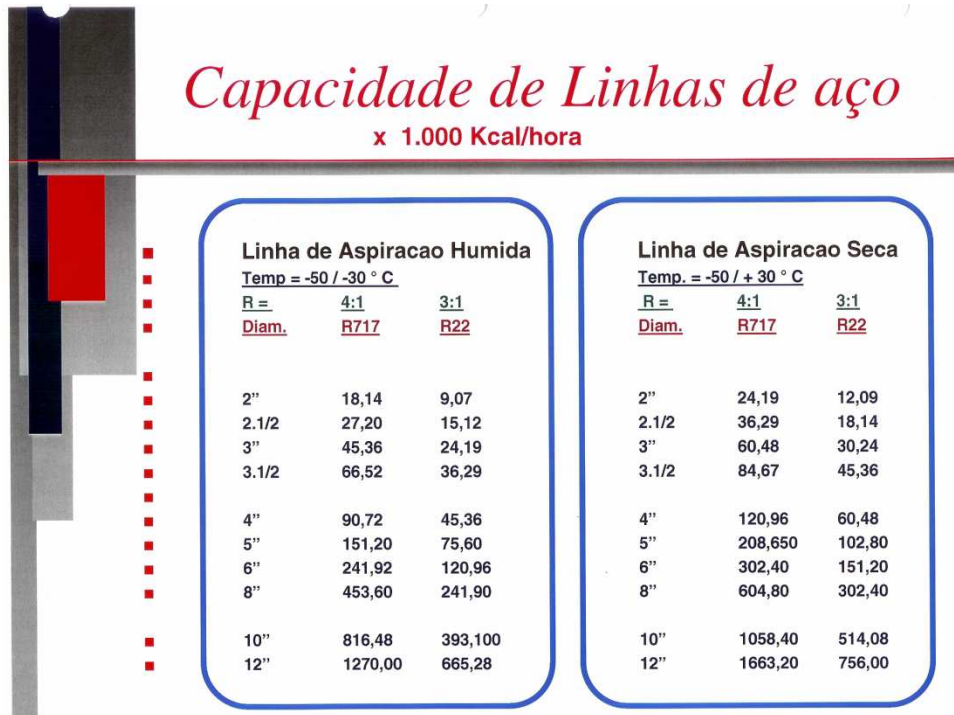


Figura 1 – Linha de aspiração húmida e linha de aspiração seca. (Gameiro, 1999)

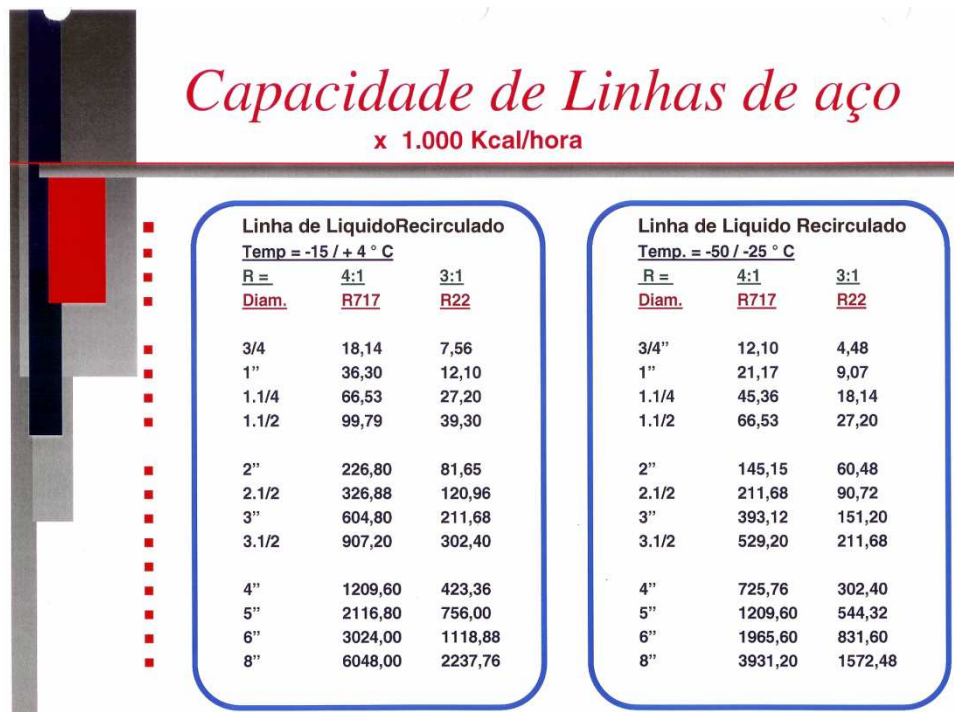


Figura 2 – Linha de líquido recirculado (Gameiro, 1999)

## Capacidade de Linhas de aço

x 1.000 Kcal/hora

### Linhas de DESCARGA

120 ° C

Delta P = 0,00678 Bar/m

Diam.	R717	R22
1/2"	9,83	5,17
3/4	21,62	11,55
1"	42,94	21,10
1.1/4	112,49	41,73
1.1/2	166,32	65,32
2"	323,57	126,70
2.1/2	517,10	198,98
3"	907,20	350,78
4"	1838,59	701,57
5"	3326,40	1285,20
6"	5443,20	2059,34
8"	11037,60	4354,56

### Linha de Líquido de Alta pressão

-29 / +4 ° C

Delta P = 0,00452 Bar/m

Diam.	R717	R22
1"	317,52	61,09
1.1/4	680,40	133,36
1.1/2	1061,42	200,99
2"	2434,32	480,82
2.1/2	3870,72	749,95
3"	6842,48	1388,00
4"	14001,12	2754,86

Figura 3 – Linha de descarga e linha de líquido a alta pressão (Gameiro, 1999)

## Capacidade de Linhas de aço

x 1.000 Kcal/hora

### Linha de DRENO do Condensador ao Deposito de Líquido

Valido desde + 4 a + 40 ° C

Velocidade 0,5 m/s 0,5 m/s

Diam. R717 R22

1"	127,31	35,38
1.1/4	227,70	63,20
1.1/2	311,47	87,10
2"	595,73	165,11
2.1/2	846,72	235,57
3"	1306,37	362,88
4"	2252,88	625,97

Figura 4 – Linha de dreno (Gameiro, 1999)

ANEXO XII – Esquema de princípio de uma instalação criogénica

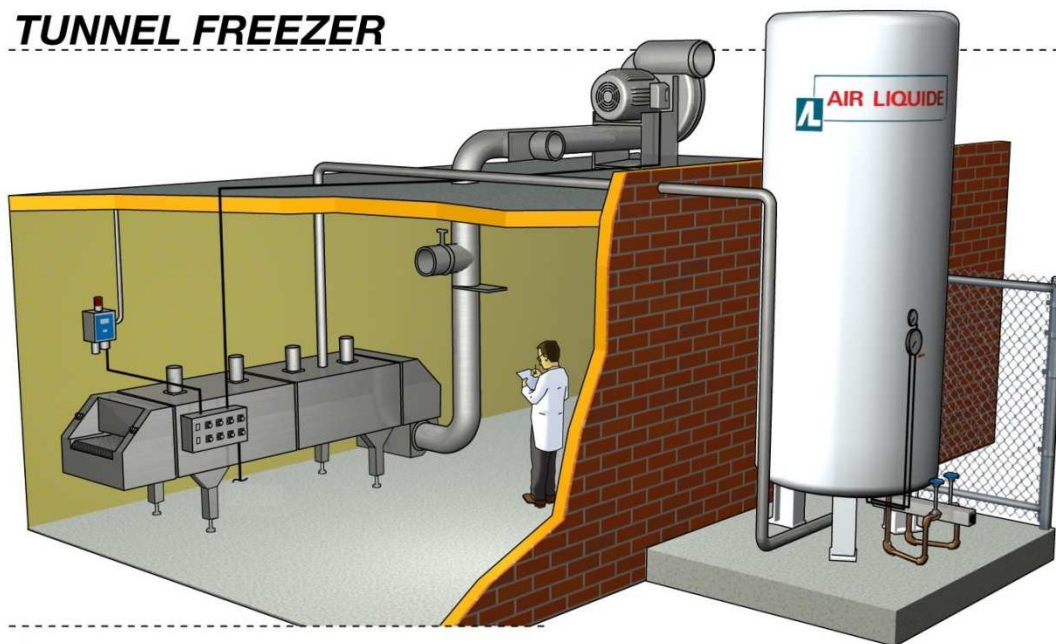


Figura 1 – Esquema de princípio (Air\_liquide, 2010)

## ANEXO XIII – Tarifas aplicadas pela EDM

Tabela 1 – Tarifas aplicadas pela EDM em Metical (EDM, 2006)

<b>Grandes consumidores de baixa, média e alta tensão</b>			
<b>Categoria de Consumidores</b>	Preço de Venda (energia activa)	Preço de Venda (energia reactiva)	Taxa fixa
	MT/kWh	MT/kWh	MT
<b>Baixa tensão</b>	1,378	105,973	207,308
<b>Média tensão</b>	1,144	118,615	973,079
<b>Alta tensão</b>	1,020	130,654	973,079

Tabela 2 – Tarifas aplicadas pela EDM após conversão em Euros

<b>Grandes consumidores de baixa, média e alta tensão</b>			
<b>Categoria de Consumidores</b>	Preço de Venda (energia activa)	Preço de Venda (energia reactiva)	Taxa fixa
	€/kWh	€/kWh	MT
<b>Baixa tensão</b>	0,0462	3,5724	6,95
<b>Média tensão</b>	0,0384	3,9985	32,64
<b>Alta tensão</b>	0,0342	4,4044	32,64