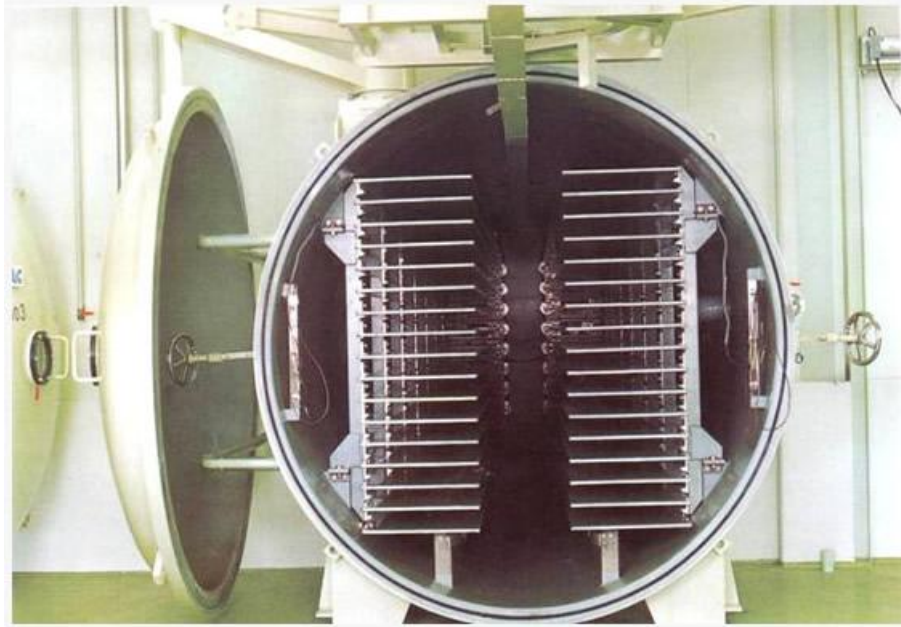




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

ISEL



Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Pedro Francisco Folque de Almeida e Costa Ribeiro

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

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

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos Quaresma Dias

Vogais:

Prof. Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca
Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa
Prof. António Manuel Matos Guerra
Prof. Francisco Gonçalves dos Santos

Novembro de 2012

Resumo

O presente trabalho, tem como objectivo a concepção de uma instalação frigorífica para armazenar camarões congelados e refrigerados, estudar o sistema frigorífico com o fluido frigorígeno R-404A, e compará-lo com um liofilizador que tenha a mesma capacidade de processamento diária de camarão.

Os produtos alimentares, em causa, são considerados perecíveis e requerem o frio para a conservação das suas características. Para tal, é necessário um correcto dimensionamento dos equipamentos que constituem o circuito frigorífico, tais como: compressores, condensadores, evaporadores, entre outros.

O trabalho inicia-se com a definição dos objectivos principais para o desenvolvimento deste estudo.

Após a definição dos objectivos, é feita uma análise aprofundada relativa à tecnologia de liofilização, definindo-se o seu historial de utilização, características principais, os vários componentes, a sua aplicação aos mais diversos produtos, entre outros parâmetros de análise.

De seguida, caracteriza-se e dimensiona-se, através de um balanço térmico manual, a instalação frigorífica. Definem-se os vários equipamentos presentes, o *layout* da mesma, o circuito frigorífico e estabelecem-se os custos que esta instalação acarreta.

Por fim, e de acordo com a produção diária estabelecida, é feita a selecção do liofilizador adequado. Neste capítulo do trabalho, também é feito um estudo económico respeitante ao liofilizador seleccionado, para que depois seja possível comparar a viabilidade económica entre os dois processos de conservação do produto.

Palavras-chave: Liofilizador, Instalação frigorífica, Produtos alimentares, Balanço Térmico, Fluido frigorígeno R404A.

Abstract

The present work aims at designing a refrigeration plant for storing frozen and refrigerated shrimp, study the refrigeration system with refrigerant R-404A, and compares it with a freeze dryer that has the same daily processing capacity of shrimp.

These food products are considered to be perishable and require low temperatures to keep their features. It is therefore necessary a correct dimensioning of equipments constituting the refrigerant circuit, such as: compressors, condensers, evaporators, etc.

The work begins with the definition of the main objectives for the development of this study.

After defining the objectives, a thorough analysis is done relating to freeze-drying technology, defining its history of use, main characteristics, the various components, its application to various products, among other analysis parameters.

Next, the refrigeration plant is characterized and dimensioned through a thermal balance manual. Are defined the various equipments present, the layout, the cooling circuit and the costs that this installation entails are established.

Lastly, according to the established daily production, is made the selection of suitable freeze dryer. In this chapter of the work is also performed an economic study concerning the freeze dryer selected, so that later is possible to compare the economic viability of the two processes of preservation of the product.

Key Words: Freeze dryer, Refrigeration plant, Food products, Thermal Balance, R404A refrigerant fluid.

Agradecimentos

Aos Professores Francisco Manuel Gonçalves dos Santos - Orientador, e António Manuel Matos Guerra - Co-orientador, pela sua orientação, apoio e total disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

Índice Geral

Resumo.....	i
Abstract	ii
Agradecimentos.....	ii
Índice Geral.....	iii
Índice de figuras	vi
Índice dos quadros.....	vii
1. Objectivos	1
2. Introdução	1
2.1. Análise histórica.....	1
2.2. <i>State of art – A liofilização ao longo do tempo</i>	4
2.3. Liofilização	6
3. Descrição do processo de Liofilização.....	10
3.1. Congelação.....	10
3.1.2. Transição Vítreas	13
3.1.3. DSC – “Differential Scanning Calorimetry”	15
3.1.4. “Annealing”.....	15
3.2. O ciclo da secagem.....	16
3.2.1. Secagem primária.....	16
3.2.2. Secagem secundária	23
4. Sistema de fecho do recipiente.....	34
5. Reidratação.....	34
6. Aplicações	35
6.1. Produtos alimentares	35
6.2. Indústria da saúde.....	36
6.3. Produtos veterinários.....	36
6.4. Outras aplicações.....	37
7. Equipamentos constituintes do processo de liofilização	38
7.1. Câmara do liofilizador.....	38
7.2. Liofilizador contínuo.....	44
7.3. Multi-estágios.....	44
7.4. Vacuum-Spray Freeze Dryers	44
7.5. Sistemas frigoríficos.....	45

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

7.5.1.	Compressor.....	45
7.5.2.	Condensador.....	46
7.5.3.	Evaporador	46
7.5.4.	Válvula de expansão.....	46
7.5.5.	Separador de óleo	46
7.5.6.	Óleo do compressor.....	47
7.5.7.	Pressostatos para o controlo	47
7.5.8.	Depósito de líquido	47
7.5.9.	Visor de líquido.....	48
7.5.10.	Filtro exsicador.....	48
7.6.	Condensador de vapor de água.....	49
7.7.	Fluido frigorígeno.....	50
7.8.	Sistema de vácuo.....	50
8.	Instalação frigorífica	53
8.1.	R-404A.....	53
8.2.	R-134a.....	53
8.3.	Isolamento térmico.....	54
8.3.1.	Paredes e Tecto.....	55
8.3.2.	Piso.....	57
8.3.3.	Portas.....	59
8.3.4.	Iluminação.....	59
9.	Layout da instalação.....	60
9.1.	Informações sobre a instalação.....	62
9.2.	Esquemas unifilares da instalação:.....	63
9.2.1.	Câmara de conservação de congelados	63
9.2.2.	Túnel de congelação.....	64
9.2.3.	Câmara de conservação de congelados	64
10.	Cálculo das cargas térmicas	64
10.1.	Procedimentos de cálculo.....	64
10.1.1.	Calculo das cargas totais	65
10.1.2.	Cargas térmicas de paredes tecto e chão – Q1:	66
10.1.3.	Carga térmica por renovação de ar – Q2:.....	67
10.1.4.	Carga térmica devido à abertura de portas – Q3:	68
10.1.5.	Carga térmica devida à iluminação da câmara – Q4	70

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

10.1.6.	Carga térmica devido ao pessoal de estiva – Q5	70
10.1.7.	Cargas térmicas dependentes dos produtos armazenados – Q6	71
10.1.8.	Cargas térmicas no túnel de congelação – Q7.....	72
10.2.	Resultados obtidos.....	73
10.2.1.	Câmara de congelados.....	73
10.2.2.	Túnel de congelação.....	75
11.	Seleccção de equipamentos.....	75
11.1.	Explicação de critérios de escolha.....	75
11.1.1	Evaporadores.....	75
11.1.2.	Compressor.....	76
11.1.3.	Condensador.....	76
11.2.	Particularizando as situações:.....	81
11.2.1.	O circuito da câmara de congelação:.....	81
11.2.2.	O circuito do túnel de congelação:.....	82
11.2.3.	O circuito da câmara de refrigeração :	83
12.	Consumo Eléctrico	83
13.	Investimento	88
14.	Instalação de liofilização	90
15.	Conclusão.....	91
16.	Referências bibliográficas	94
ANEXOS.....		98
ANEXO 1 - Modelo do evaporador do circuito da câmara de congelados escolhido e forma como foi seleccionado.....		99
ANEXO 2 - Modelo do compressor do circuito da câmara de congelados escolhido e suas características.		100
ANEXO 3 - Modelo do condensador do circuito da câmara de congelados escolhido e forma como foi seleccionado.....		100
ANEXO 4 - Modelo do evaporador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.....		102
ANEXO 5 - Modelo do compressor do circuito do túnel de congelação escolhido e suas características		103
ANEXO 6 - Modelo do condensador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.....		103
ANEXO 7 - Modelo do grupo compressor do circuito do túnel de congelação escolhido e suas características.		104

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

ANEXO 8 - Modelo do evaporador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.....	105
ANEXO 9 - Modelo do liofilizador escolhido e suas características.....	107

Índice de figuras

Figura 1 - Diagrama de fases da água	7
Figura 2 - Diagrama representativo da transição entre os estados vítreo e gomosos para um material amorfo	14
Figura 3 - Representação de uma isotérmica de sorção	30
Figura 4 - Representação esquemática da histerese de sorção	31
Figura 5 - Transmissão de calor na liofilização	32
Figura 6 - Câmara com forma de sino e placa horizontal na base (liofilizador de bancada)	39
Figura 7 - Câmara de secagem cilíndrica	40
Figura 8 - Câmara de produção rectangular	40
Figura 9 - Túnel com secção transversal redonda	41
Figura 10 - Método A de carregamento do túnel	41
Figura 11 - Método B de carregamento do túnel.....	42
Figura 12 - Tipos de bandeja de liofilização	43
Figura 13 - Bandejas para aplicações especiais.....	43
Figura 14 - Gama de aplicações de refrigerantes, tendo em conta as normas legais.....	50
Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma bomba Roots de um estágio.....	51
Figura 16 - Principais componentes do liofilizador	52
Figura 17 - Curva de secagem e evolução das temperaturas das placas de aquecimento e do produto durante a liofilização.....	52
Figura 18 - Características do fluido frigorífero R-404A	53
Figura 19 - Características do fluido frigorífero R-134a.....	54
Figura 20 - Constituição de um painel sanduíche	56
Figura 21 - União entre o poliuretano	56
Figura 22 - Pavimento constituinte da câmara de congelados e túnel de túnel de congelação ...	58
Figura 23 - Planta da instalação frigorífica	60
Figura 24 - Esquema unifilar do circuito do “câmara de conservação de congelados”	63
Figura 25 - Equipamentos do esquema frigorífico.....	63
Figura 26 - Esquema unifilar do circuito do “túnel de congelação”	64
Figura 27 - Cálculo das cargas totais (fluxograma 1)	65
Figura 28 - Cálculo de Q1 (fluxograma 2).....	66
Figura 29 - Cálculo de Q2 (fluxograma 3).....	67
Figura 30 - Cálculo de Q3 (fluxograma 4).....	68
Figura 31 - Cálculo de Q4 (fluxograma 5).....	70
Figura 32 - Cálculo de Q5 (fluxograma 6).....	70
Figura 33 - Cálculo de Q6 (fluxograma 7).....	71
Figura 34 - Cálculo de Q7 (fluxograma 8).....	72

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Figura 35 - Planta da “câmara de conservação de congelados”	74
Figura 36 - Tarifa transitória de venda a clientes finais em MT	85
Figura 37 - Horário do ciclo diário transitório	85
Figura 38 - Planta da instalação liofilizadora.....	90

Índice dos quadros

Quadro 1 - Espessuras normalizadas.....	67
Quadro 2 - Duração média de abertura das portas em minutos/ton de produto de acordo com o tipo de porta e produto	69
Quadro 3 - Dados iniciais da câmara de conservação de congelados	73
Quadro 4 - Cálculos auxiliares	73
Quadro 5 - Cargas térmicas através de paredes, tecto e pavimento	73
Quadro 6 - Cargas térmicas Q2, Q4, Q5 e Q6.....	74
Quadro 7 - Carga térmica de abertura de portas.....	74
Quadro 8 - Carga térmica total na câmara de conservação de congelados	74
Quadro 9 - Dados conhecidos do túnel de congelação.....	75
Quadro 10 - Carga térmica total do túnel de congelação	75
Quadro 11 - Correspondência entre a DTm e H.R. (humidade relativa) da câmara	75
Quadro 12 - Factor de correcção “FR”.....	77
Quadro 13 - Factor de correcção “K’s”.....	77
Quadro 14 - Velocidade recomendada do fluido vs tipo de linha	78
Quadro 15 - Perdas de carga por metro e total de acordo com o tipo de linha.....	78
Quadro 16 - Coeficiente de segurança estabelecido para os equipamentos de frio vs tipo de linha	79
Quadro 17 - Consumo eléctrico para as câmaras de refrigerados e congelados.....	86
Quadro 18 - Consumo eléctrico do túnel de congelação.....	87
Quadro 19 - Encargos de Potência	88
Quadro 20 - Facturação mensal.....	88
Quadro 21 - Investimento na área de preparação e embalamento.....	89
Quadro 22 - Investimento na câmara de refrigerados	89
Quadro 23 - Investimento na câmara de congelados e túnel de congelação	89
Quadro 24 - Investimento no cais e corredor	89
Quadro 25 - Total da importância investida.....	89

1. Objectivos

No âmbito da Unidade Curricular de Dissertação, Trabalho de Projecto ou Estágio de Natureza Profissional, foi proposto o desenvolvimento do tema do processo de liofilização de produtos alimentares perecíveis.

Os objectivos propostos são:

- Estudo teórico aprofundado relativo à tecnologia de liofilização;
- Concepção e dimensionamento de uma instalação frigorífica, utilizando o fluido frigorigéneo R-404A;
- Estudo económico da instalação em causa;
- Escolha e caracterização do liofilizador seleccionado (tem de ter a mesma capacidade de produção diária do túnel de congelação);
- Estudo de viabilidade económica entre os dois tipos de tecnologia de conservação de alimentos (Liofilização e Congelação).

2. Introdução

2.1. Análise histórica

O processo básico de liofilização de alimentos é conhecido desde os antigos Incas do Peru dos Andes. Conheciam o processo básico da liofilização. O alimento (carnes, batatas e outras culturas alimentares) era congelado, durante a noite e na manhã seguinte, o calor do sol e baixa pressão (usavam os picos das montanhas dos Andes) causavam a sublimação da água que havia sido congelada. [1] Os métodos de liofilização têm sido utilizados há mais de 100 anos para diversos fins técnicos. Durante a Segunda Guerra Mundial, equipamentos e técnicas foram desenvolvidas para o fornecimento de plasma sanguíneo e penicilina para as forças armadas. Foi também durante esta época que a liofilização em alimentos ganhou um grande impulso, devido ao facto de que neste período desenvolveram-se muitos estudos sobre o processamento de alimentos liofilizados e suas condições. No final dos anos 70, a liofilização era, frequentemente, utilizada para taxidermia, conservação de alimentos, conservação de peças e artefactos em museus, e produção farmacêutica. No final dos

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

anos 80, a indústria de liofilização descobriu, finalmente, os benefícios do processo aplicados ao mercado das flores. [1]

Sem dúvida, o maior destaque foi durante o programa Apollo da NASA, que impulsionou as pesquisas básicas para explicação dos mecanismos de liofilização de alimentos. Os produtos tecnológicos existentes, actualmente, foram desenvolvidos a partir dos fundamentos adquiridos nessas pesquisas. [2]

A liofilização requer o uso de uma máquina especial chamada liofilizador, que tem uma grande câmara de secagem e uma bomba de vácuo para a remoção de água. Mais de 400 tipos diferentes de alimentos liofilizados foram produzidos comercialmente desde os anos 60.

A melancia e alface são dois dos alimentos em que a liofilização não tem grande aplicação, pois estes são constituídos por grandes quantidades água. O café liofilizado é, sem dúvida, o produto liofilizado mais conhecido. [1]

À medida que o século XIX progrediu, houve uma evolução no estudo de micro organismos. Os esforços foram muitas vezes em vão pela natureza lábil dos espécimes, o que impedia que se estudassem as amostras durante um largo período de tempo. As tentativas para armazenar amostras biológicas através de secagem do ar muitas vezes não foram bem-sucedidas. Por exemplo, a desidratação das amostras, em geral, levou a uma perda considerável na virulência ou actividade da mesma. Este período, também testemunhou o desenvolvimento da liquefacção de gases atmosféricos e ofereceu um meio para a preservação de espécimes, através da congelação a baixas temperaturas. Embora mantendo uma substância a temperaturas baixas, oferecia e oferece um meio de armazenar amostras biológicas, era necessário um meio para a preservação de materiais lábeis a uma temperatura próxima da temperatura ambiente. [3]

Em 1890, Altman relatou que foi capaz de obter tecido animal seco, a pressões inferiores à pressão atmosférica, a temperaturas de aproximadamente -20°C . Não se sabe a maneira como Altman conduziu o processo de secagem, nem a natureza do seu aparelho.

A bem sucedida secagem de tecido, realizada por ele, aparentemente, não inspirou outros a realizar o mesmo processo. Só em 1905 é que Benedict and Manning comunicaram a desidratação de tecido animal, a uma pressão de vácuo, através de uma bomba química. [3]

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

A bomba química alcançava as baixas pressões, mediante a evaporação do éter etílico. A bomba trabalhava deslocando o ar da câmara através da evaporação do éter etílico. Quando todo o éter etílico era evaporado, o sistema fechava, e o éter etílico residual era absorvido num recipiente separado, contendo ácido sulfúrico concentrado, produzindo-se, assim, uma pressão de vácuo. [3]

À medida que a pressão na câmara ia sendo reduzida, o vapor de água proveniente do espécime era, igualmente, absorvido pelo ácido sulfúrico concentrado, reduzindo assim o teor de humidade na amostra. Apesar de bastante engenhosa, a nível de projecto, a bomba química não era muito eficiente em operação. Benedict e Manning afirmaram que eram necessárias cerca de 2 semanas para reduzir o teor de humidade numa amostra de gelatina a 20% do seu peso. Alguns anos mais tarde Shackell publicou um estudo intitulado "Um método melhorado de dessecação...". O aparelho utilizado por Shackell era similar, em projecto, ao usado por Benedict e Manning. No entanto, a necessidade de éter etílico para deslocar o ar na câmara foi eliminado pelo uso de uma bomba de vácuo mecânica. Com a ajuda da bomba de vácuo, Shackell foi capaz de alcançar pressões no sistema inferiores a 1 mm Hg em cerca de 2 min. O aparelho Shackell usava ácido sulfúrico concentrado à mesma, num recipiente separado para impedir a entrada de vapor d'água no sistema de bombeamento a vácuo. [3]

É de interesse referir, que o aparelho de secagem de Shackell tem os mesmos componentes básicos que hoje em dia são utilizados nos liofilizadores: uma câmara de secagem, uma câmara de condensação e um sistema de vácuo. Shackell demonstrou a versatilidade do seu método e aparelho de secagem, preparando uma série de produtos alimentares secos, como mel, leite e manteiga. Após a desidratação, a perda de peso foi associada com a quantidade de vapor de água removida do espécime. Amostras de carne foram também secas, mas estes casos apresentaram um encolhimento considerável, como resultado do processo de secagem. Shackell constatou que o encolhimento podia ser reduzido se a carne de bovino fosse misturada com areia seca antes de ser colocada no aparelho de secagem. Na altura, Shackell, não soube explicar a influência da areia no encolhimento da carne, mas é possível que a presença da mesma tenha permitido que a carne alcançasse o estado de congelação, na sua totalidade, ao abrandar o processo de secagem. A grande contribuição de Shackell, prende-se com o facto de ele ter atingido a estabilidade biológica dos espécimes em estudo, e prevenido a ocorrência de reacções

químicas (maléficas, ou seja, que pusessem em causa a saúde dos consumidores) a longo prazo. [3]

Demonstrou que a actividade biológica ou a reactividade química de tais espécimes poderiam ser restauradas pela adição de água. Estes resultados eram alcançados apenas se a amostra fosse congelada antes de ser colocada no sistema de secagem e se, neste, a pressão fosse reduzida para valores abaixo de 1 mm Hg. Os resultados alcançados pelas experiências de Shackell eram, tendo em vista a natureza do seu aparelho, verdadeiramente notáveis. Noutra experiência, tecido cerebral de um coelho, infectado com a raiva, foi seco, no estado congelado. O tecido cerebral seco foi, então, convertido numa solução de emulsão aquosa e injectada num coelho. O coelho desenvolveu os sintomas habituais da raiva e morreu. Shackell, em mais uma das suas experiências, congelou o sangue do cão antes que este coagulasse. O sangue congelado foi então seco. A coagulação foi observada com a introdução de água no sangue seco. Shackell, providenciou à comunidade científica uma nova técnica para conservar substâncias biológicas lábeis. Apesar dos seus resultados experimentais notáveis, não houve qualquer ideia sobre os mecanismos que estavam envolvidos no processo de secagem. [3]

2.2. State of art – A liofilização ao longo do tempo

Ao longo do tempo, muitos esforços foram feitos, por diversos indivíduos, para que a liofilização evoluísse e ganhasse expressão no mercado da conservação de produtos alimentares, e não só. Contudo, como em tudo, há sempre avanço e recuos no desenvolvimento de uma tecnologia. Neste capítulo, para que se fique com uma ideia geral da evolução desta tecnologia, são apresentadas algumas personalidades que prestaram um contributo para a evolução da mesma.

R. Altaman (1890) conservava tecidos animais, através de um procedimento idêntico ao do utilizado na liofilização. Afirmou, também, que era possível secar tecidos a uma temperatura em redor dos -20°C . Estava à frente do seu tempo. [4]

Benedict e Manning (1905) comunicaram a desidratação de tecido animal, a uma pressão de vácuo, através de uma bomba química. [4]

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

L.F. Shackell (1909), agregou uma bomba mecânica de vácuo a um equipamento de secagem similar ao usado por Benedict e Manning, reduzindo a pressão da câmara para valores inferiores a 1 mmHg, em poucos minutos. Foi o pioneiro a trabalhar com alimentos, demonstrando que as carnes, frutas e vegetais podiam ser desidratados, quando congelados.

Pouco tempo após a publicação dos seus resultados, outros cientistas começaram a aplicar a sua técnica de secagem a produtos congelados, a fim de estabilizar produtos lábeis. [4]

B.W. Hammer (1911) demonstrou que a bactéria E.coli poderia ser estabilizada durante mais de 54 dias, usando a referida técnica de Shackell. Embora o processo, desenvolvido por Shackell, só tenha sido nomeado algum tempo depois, o nome liofilização foi estabelecido por volta de 1920, como um processo de estabilização para materiais lábeis. [3]

Couriel, na sua análise histórica da liofilização, fornece algumas ideias interessantes acerca da evolução do processo e equipamento. Destaca que a primeira patente americana foi implementada por Tival. Em 1934, Elser, implementou uma patente americana, em que descreve o equipamento de secagem que substituiu o sistema usado por Shackell (sistema de dessecação por ácido sulfúrico) com redução da temperatura através de um condensador de vapor de água, utilizando gelo seco. [3]

Só em 1939, segundo Couriel, trinta anos depois da introdução ao processo de liofilização de Shackell, é que Greaves publicou um trabalho descrevendo o uso da refrigeração mecânica no equipamento de secagem. Forneceu, também, a primeira ideia científica dentro do processo de secagem, ao identificar os parâmetros-chave operacionais. [3]

Não se devem desprezar os esforços realizados por E.W. Flosdorf e S. Mudd (1935-1940). Apesar dos seus estudos ao nível de sistema de bombeamento não terem tido muita aceitação, estes serviram de estímulo para futuros cientistas. Entre outras melhorias implementadas, destaca-se o facto de eles terem definido as melhores condições de processo para plasma sanguíneo e antibióticos. [3 e 4]

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Após diversas tentativas falhadas para desenvolver um sistema eficaz para o bombeamento de grandes quantidades de vapor de água, Struma e McGraw construíram um sistema de secagem, que empregava um sistema mecânico de refrigeração, que retinha o vapor de água, para evitar a sua entrada no sistema de bombeamento a vácuo.

A ciência associada à liofilização, instituída por estudos realizados por Rey, Merymann (1959 – 1966) e outros, avançou drasticamente durante os anos 50 e 60. Contudo, o ritmo de desenvolvimento tem vindo a diminuir nos últimos anos. [3]

2.3. Liofilização

A liofilização também denominada por outras nomenclaturas como criodesidratação ou criosecagem, é um processo diferenciado de desidratação de produtos, pois ocorre em condições especiais de pressão e temperatura, possibilitando que a água previamente congelada (estado sólido) passe directamente ao estado gasoso (sem passar pelo estado líquido), ou seja, a mudança de estado físico ocorre por sublimação. [2] Este é o princípio fundamental deste processo de conservação de produtos alimentares (e não só) e é utilizado com o fim de reduzir as perdas dos componentes voláteis ou termo-sensíveis. [4] Tal como a evaporação, a sublimação ocorre quando a molécula ganha energia suficiente para se desprender das outras em seu redor. [5]

A liofilização é definida como sendo um processo de estabilização, no qual a substância é primeiramente congelada e, depois, a quantidade de solvente é reduzida por sublimação seguida da dessorção, com o objectivo de garantir que não há apoio para o crescimento biológico ou reacções químicas. [4] O termo-chave da definição de liofilização está na estabilização do produto (um processo de estabilização é aquele em que o relógio cinético natural de uma substância não foi muito alterado). [3] O processo tem por objectivo estabilizar produtos (diminuição da actividade de água), através de uma série de operações em que o material é submetido durante o processamento: congelação, sublimação, secagem a vácuo e armazenagem do produto. [2] É o mais nobre processo conhecido de conservação de produtos biológicos, porque reúne os dois métodos mais fiáveis de conservação, a congelação e a desidratação. [4]

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

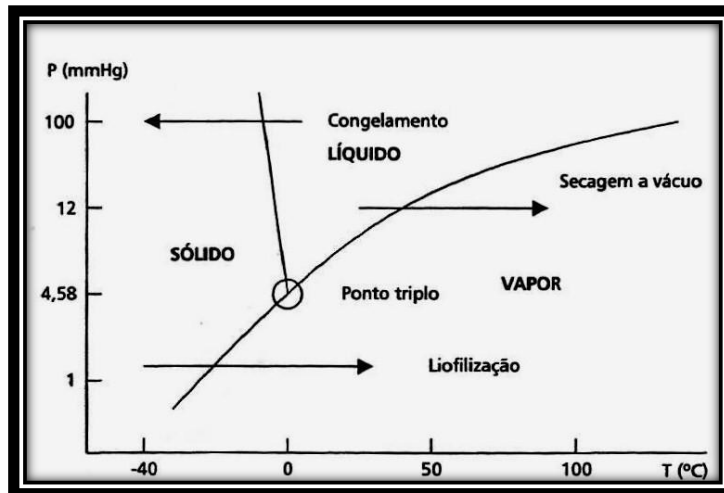


Figura 1 - Diagrama de fases da água (adaptado de 2)

Ao observar a figura 1, conclui-se que a uma pressão superior a 4,58 mmHg, ao fornecer-se calor a um material congelado, a água contida neste fundirá tornando-se líquida, e se o fornecimento de calor for continuado irá evaporar-se. Portanto, fornecendo-se calor a um material congelado a uma pressão menor que 4,58 mmHg, a água presente neste material passará para o estado de vapor, ou seja, sublimará. Usualmente, na prática da liofilização, a temperatura do produto congelado deve ser mantida bem abaixo de 0 °C.

Assim, para ser possível a realização de uma liofilização é preciso que o produto esteja previamente congelado, haja uma fonte de calor, câmara de vácuo e que exista um sistema de condensação que opere a temperaturas inferiores à do produto congelado. [2]

Sem conservantes ou produtos químicos, é o processo mais adequado para preservar células, enzimas, vacinas, vírus, leveduras, soros, derivados sanguíneos, algas, assim como frutas, vegetais, carnes, peixes e alimentos em geral. [4]

É um processo caro, exige matéria-prima de qualidade e a aplicação de tratamentos prévios adequados [6]. O ponto de partida, então, para um processo de conservação ideal, é a recepção de matérias-primas de boa qualidade. Por exemplo, para produtos de origem vegetal, a qualidade física depende principalmente dos estágios finais do processo produtivo (a colheita e o transporte), além das suas condições de armazenagem antes e depois da acção das etapas conservativas. [7]

Por exemplo, para produtos de origem vegetal, a partir da recepção e inspeção da matéria-prima, inicia-se a etapa de preparação do vegetal.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

- Seleccção;
- Limpeza (lavagem);
- Inactivação enzimática (tratamento térmico ou químico);
- Preparação do produto (corte p/ produtos sólidos ou pré-concentração p/ produtos líquidos). [6]

A liofilização não altera a estrutura físico-química do material, mas permite a sua conservação indefinida sem a cadeia de frio, com menos de 15% de humidade e alta estabilidade microbiológica. O encolhimento é mínimo, o aspecto, a textura, o sabor e o aroma não se perdem, mas sim, intensificam-se e mantêm as características nutricionais. É ideal para conservar produtos alimentares, farmacêuticos e biológicos que não devem aquecer nem mesmo a temperaturas moderadas.

Se para um investigador, liofilizar significa extrair grandes quantidades de água, para um comerciante significa: levar dez vezes mais de mercadoria, mas sem uma unidade frigorífica; stocks de frutas e hortaliças sem gastos de conservação, etc. [4]

As principais vantagens relacionadas à liofilização são:

- A liofilização é efectuada a baixas temperaturas. Não ocorre alteração química das substâncias suscetíveis à deterioração pelo calor;
- Também devido à temperatura do processo ser baixa, a perda de constituintes voláteis é minimizada;
- O produto liofilizado apresenta estrutura esponjosa, o que facilita a redissolução na concentração que se queira ou mesmo a reprodução fiel das condições anteriores à aplicação da técnica;
- Inibição no desenvolvimento de microrganismos ou eventuais reações enzimáticas que possam contribuir para a alteração química ou mesmo degradação do produto ainda durante a secagem;
- O produto liofilizado apresenta uma resistência infinitamente maior à propagação de microrganismos devido à concentração de água residual no produto liofilizado ser mínima e tornar impossível a subsistência de algum microrganismo;

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

- Produtos que sofrem coagulação (Ex: hemoderivados, lácteos), quando submetidos a processos de secagem convencionais, não apresentarão mais este problema após a liofilização. [8 e 9]

Entre as desvantagens na utilização do método temos:

- Operação demorada;
- Elevado gasto energético;
- Custo e complexidade do equipamento. [8]

A secagem, apesar de ainda pouco utilizada em produtos alimentares, está entre as operações mais usadas na indústria química. Numa boa parte das situações é o último processamento do produto antes da sua classificação e embalagem.

A qualidade do produto seco, a quantidade de energia gasta e o tempo utilizado neste processo são parâmetros primordiais para a rentabilidade do bem submetido a esta operação. Os fenómenos de transferência de calor, remoção de humidade e alterações de dimensões, cor, sabor, resistência mecânica e outros, envolvidos numa operação de secagem são complexos.

A secagem consiste em reduzir a quantidade de água existente nos produtos, mediante desidratação. Num processo de secagem, os produtos obtidos não são alterados ao nível das suas propriedades e reidratam-se facilmente. [10] Podem-se considerar vários tipos:

- Secagem por adsorção, aplicada a gases e líquidos, usando agentes ávidos de água, tais como o cloreto de cálcio seco, o ácido sulfúrico, o anidrido fosfórico, e o sulfato de sódio anidro. Certos sólidos podem ser desidratados com solventes do tipo acetona.
- Por arrastamento: coloca-se o corpo húmido em contacto com os solventes, tais como benzeno, talueno, xilol, e procede-se à ebulição, após o que a água é arrastada.
- Evaporação sob pressão normal e pressão reduzida. Sob pressão normal procede-se a uma ventilação e aquecimento combinados, usando estufas de vários tipos. Inclui-se aqui a secagem por atomização. Sob pressão reduzida, a secagem é feita em vácuo e, normalmente, à volta de +40°C, encarando já a possibilidade de alteração de princípios termo-sensíveis.

Os vapores são condensados num dispositivo refrigerado. É este o tipo utilizado na preparação de certos extractos secos cuja actividade não resistiria a um aquecimento maior.

- Secagem por radiação – normalmente usa-se a radiação infra-vermelha.
- Secagem por sublimação (liofilização) – método estudado e explicado neste trabalho de mestrado. [10]

3. Descrição do processo de Liofilização

Na tentativa de contornar os danos celulares, substâncias protectoras podem ser adicionadas durante o desenvolvimento de microrganismos, antes da congelação ou da secagem. Vale destacar que a escolha destas substâncias varia com o microrganismo alvo da liofilização, porém, compostos como o leite desnatado, soro, trealose, glicerol, betaína, adonitol, sacarose, glicose, lactose e alguns polímeros como dextran e polietilenoglicol podem oferecer protecção para muitas espécies. [11]

O processo de liofilização compreende três etapas básicas que são:

1. Congelação do produto fresco;
2. Secagem primária - ocorre uma secagem primária ou sublimação, onde se elimina, por sublimação, a água no estado sólido (gelo);
3. Secagem secundária - após a eliminar a totalidade de gelo no produto, termina a sublimação e inicia-se a secagem secundária ou dessorção. A água ligada por adsorção é eliminada por evaporação diminuindo constantemente, mas sem nunca chegar à eliminação total. A temperatura a que se efectua esta etapa pode variar entre 30° e 60°C, segundo a natureza do produto a liofilizar. [9 e 12]

3.1. Congelação

Relativamente ao primeiro passo do processo, o produto formulado deve ser congelado antes de se realizar a sublimação. A congelação tem como objectivos:

1. Imobilizar os componentes contidos na solução e prevenir a formação de espuma, quando o vácuo é aplicado;

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

2. Reduzir a inativação térmica do produto;
3. Induzir uma determinada estrutura de cristais de gelo dentro da massa congelada, que facilitará ou inibirá a migração do vapor do produto seco. Em resumo, a estrutura de gelo formada durante a congelação ditará o subsequente comportamento da liofilização. [13]

A etapa de congelação é de extrema importância e grande interesse. Nela, efectua-se a primeira modificação no produto e condiciona-se todas as etapas seguintes/sucessivas. Tem uma grande influência sobre a qualidade do produto final e no tempo que será necessário para secar o material. Num processo normal de secagem por evaporação, as moléculas de água têm apenas uma rota de fuga para serem removidas e têm que ser transportadas de onde estão, para a superfície. Em vez disso, no processo de liofilização, cada núcleo cristalino, formado durante o curso da congelação inicial, torna-se o centro onde as moléculas de água convergem da vizinhança. [14]

Depois de se reduzir a temperatura, ou surge a cristalização do solvente e soluto, formando uma mistura eutética abaixo da temperatura eutética (T_e), ou ocorre a cristalização apenas do solvente, resultando numa separação de fase e a formação de cristais de gelo e de soluto no estado amorfo. No caso da separação de fase, um aumento da concentração na restante solução é observada. A concentração congelada continua até a viscosidade exceder um valor crítico, que define a transição vítrea da solução concentrada ao máximo. Abaixo da transição vítrea, a fase amorfa é sólida e é conhecida como vidro na região intersticial dos cristais de gelo. [14]

A etapa da congelação, durante a liofilização, é considerada, pelo menos, tão importante para a qualidade do produto como as etapas de secagem, devido ao seu efeito potencial sobre a estabilidade das proteínas. O parâmetro-chave é a taxa de congelação ou melhor, a taxa de nucleação do gelo [14]. Durante a congelação, a solução aquosa, em cada recipiente, é arrefecida abaixo do seu ponto de congelação e permanece no estado de subarrefecimento, até que a nucleação do gelo ocorra. A nucleação indica o início da cristalização, quando as moléculas de água, dispersas na solução, reúnem-se, em primeiro lugar, para criar núcleos a uma escala nanométrica. A adição de moléculas de água a esses núcleos, constituem o crescimento do cristal, e os processos de nucleação e crescimento continuam até ficar completamente solidificada. A probabilidade de que tal solução espontaneamente nucleia e começa a congelar, aumenta com um maior grau de

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

subarrefecimento e com a presença de contaminantes, aditivos ou estruturas que fornecem um local ou superfície para iniciar a formação de núcleos de gelo [16].

Em geral, uma congelação rápida, conhecida como “quick-freezing”, resulta em pequenos cristais de gelo. Sendo o produto rapidamente refrigerado, abaixo da temperatura à qual se formam microorganismos, e em que se produzem acções enzimáticas, previne-se a sua decomposição no período de congelação, e preserva-se as estruturas para serem examinadas microscopicamente [9 e 15]. Também após a reidratação, o produto recompõe-se facilmente [17]. Contudo, isto resulta num produto que é mais difícil de liofilizar (o processo levará mais tempo), ou seja, os poros que se formam durante a sublimação são mais restritivos ao fluxo de vapor do que os formados pela congelação lenta [13]. Naturalmente, este método de congelação rápida constitui também uma grande vantagem no que respeita a sua aplicação industrial, porque aumenta a capacidade das instalações [9].

Em geral opta-se pela congelação rápida porque os cristais formados causarão menor dano estrutural [2]. A rápida congelação provoca um maior grau de subarrefecimento. No estado de subarrefecimento, enquanto a composição da solução mantém-se inalterada, o líquido arrefecido é termodinamicamente instável e sensível à formação de gelo. À medida que a solução é arrefecida para temperaturas inferiores, a probabilidade de cristalização do gelo vai aumentar proporcionalmente [15 e 13].

Por outro lado, a congelação lenta resulta na formação de grandes cristais de gelo e de menos canais restritivos na matriz, durante o processo de secagem. A maior dimensão dos cristais confere ao produto uma estrutura grosseira e esponjosa [9]. Estes criam grandes poros, conduzindo a uma rápida sublimação da água durante o processo de secagem primária e que facilitará a entrada da água numa posterior. Contudo, a secagem secundária pode tornar-se lenta devido à menor área de superfície formada, limitando a dessorção da água, durante esta etapa [15]. A congelação lenta induz, também, a cristalização de determinados solutos que, caso fossem sujeitos a uma congelação rápida, não cristalizariam [13].

A facilidade de sublimação depende do tamanho e configuração da massa de gelo e, em particular, até que ponto é que oferece grandes áreas de superfície para a sublimação em vácuo e canais para a circulação de vapor de água. Visto que o tamanho e número dos centros de cristalização dependem essencialmente da velocidade da congelação inicial,

o papel desta etapa no processo de sublimação é evidente [9]. Em geral, a capacidade de controlar a taxa de congelação é limitada. Assim, uma taxa de congelação intermédia é recomendada, mas, em geral, e de acordo com o supracitado, usa-se a congelação rápida. [14]

Na prática, costuma-se denominar velocidade de congelação pelo número de graus Celsius dividido pela unidade de tempo, no caso segundo. Assim, diz-se que as velocidades de congelação são: muito lentas, quando estão abaixo de $0,001^{\circ}\text{C/s}$; lentas, quando situam-se entre $0,001$ e $0,06^{\circ}\text{C/s}$; rápidas, compreendidas entre $0,06$ e $0,50^{\circ}\text{C/s}$ e, muito rápidas, acima de $0,50^{\circ}\text{C/s}$. Também se encontra a expressão da velocidade de congelação em termos da profundidade, num dado intervalo de tempo (entre 0,5 e 1 mm por minuto) [2].

3.1.2. Transição Vítrea

Os alimentos são compostos por uma combinação de diferentes componentes e, por essa razão, geralmente existem num estado de não-equilíbrio amorfo. A transição vítrea, que consiste numa transição de fase de segunda ordem de um estado sólido-vítreo para um estado semilíquido gomoso, é a principal transição de fases observada em componentes amorfos e, portanto, a mais comum em alimentos. A transição vítrea em materiais amorfos ocorre numa faixa de temperaturas, mas geralmente é associada a um único valor – a temperatura de transição vítrea (T_g). Essa temperatura varia com a composição dos alimentos, principalmente com a concentração de água. O conhecimento do comportamento da temperatura de transição vítrea em função da humidade dos alimentos é essencial para a determinação das melhores condições de processamento e armazenagem dos alimentos, de forma a manter a qualidade do produto pelo maior tempo possível.

É a temperatura característica para cada material, abaixo da qual a mobilidade se limita a segmentos contíguos. A temperaturas abaixo de T_g , o polímero (ou outro componente alimentar solúvel em água) apresenta-se no estado vítreo (“glass”). [17]

Em alimentos, a T_g está directamente ligada à alteração de textura dos materiais, que é uma das propriedades mais relevantes do ponto de vista sensorial.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Quando materiais amorfos se encontram sob baixas temperaturas (estado vítreo), são duros e quebradiços, com características vítreas. Um aumento na temperatura pode causar nesses materiais uma transformação para o estado gomoso, um estado menos viscoso, à temperatura de transição vítrea (T_g).

A determinação das propriedades de estado em alimentos, em função da temperatura e da concentração de água, fornece informações valiosas no estabelecimento da formulação, processamento, embalagem e armazenagem para que seja evitada a mudança de fase (vítreo-gomoso), mantendo o alimento na forma desejada para consumo pelo maior tempo possível [17].

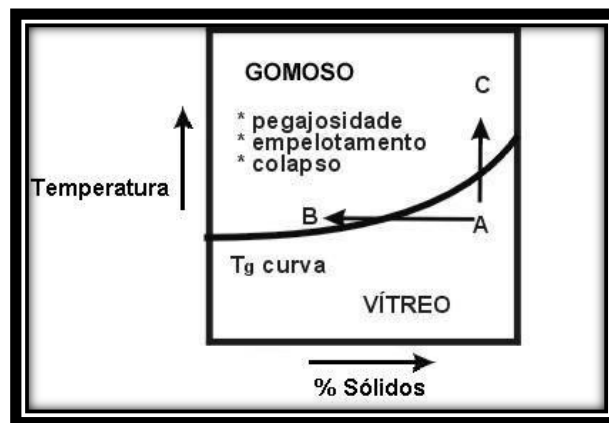


Figura 2 - Diagrama representativo da transição entre os estados vítreo e gomosos para um material amorfo (Adaptado de 17)

A partir da observação da figura 2, percebe-se que a transição do estado vítreo para o gomoso pode ocorrer, tanto pelo aumento da temperatura, como pelo aumento na concentração do plasticizante, no caso, a concentração de água (humidade). À temperatura de transição vítrea ocorre uma mudança drástica no movimento local das cadeias de polímeros, resultando em inúmeras diferenças entre as propriedades dos estados vítreo e gomoso. Quando um alimento é submetido a um ambiente de elevada humidade relativa e temperatura constante, ele absorve água, havendo um aumento na concentração desse plasticizante. Com isso, ocorre uma redução na sua viscosidade e um consequente aumento na mobilidade molecular, entre outras modificações.

Analogamente, num material submetido a um aumento da temperatura acima da T_g , com humidade constante, observam-se várias alterações, tais como: aumento de volume livre, decréscimo da viscosidade, aumento do calor específico, etc.

Entre as transformações observadas, aquelas que mais afectam o comportamento dos alimentos estão relacionadas com o aumento exponencial da mobilidade molecular e com decréscimo da viscosidade [17].

3.1.3. DSC – “Differential Scanning Calorimetry”

Existem vários métodos para a determinação de transições vítreas de compostos amorfos: Calorimetria Diferencial com Varrimento de Temperatura, Análise Termomecânica, Ressonância Magnética Nuclear (NMR), Ressonância de ‘Spin’ Electrónico (ESR), Espectroscopia Mecânica, Dilatometria, etc [18].

A técnica mais simples e mais utilizada para a medição de Tg é a Calorimetria Diferencial com Varrimento de Temperatura (DSC – “Differential Scanning Calorimetry”). Esta técnica apresenta como principais vantagens, a possibilidade de operar com amostras de reduzida dimensão e ser pouco exigente sob o ponto de vista de preparação da requerida amostra. Detecta uma mudança típica no calor específico da amostra à temperatura de transição vítrea. [18]

3.1.4. “Annealing”

Como uma alternativa para aumentar a duração do tempo de espera para incentivar recristalização de gelo, é utilizado um método de recristalização, mais controlado e eficiente no tempo, na amostra congelada. É designado por recozimento ou mais vulgarmente conhecido pelo termo inglês “annealing” [13].

Um período de consolidação (definido por tempo de espera), é necessário no fim do arrefecimento da amostra, para assegurar que os conteúdos dos frascos no lote das amostras congelam adequadamente. Contudo, tempos de esperas excessivos irão aumentar o tempo de congelação da amostra e terão impacto sobre o tempo total do ciclo. Uma estrutura de gelo com um grande número de pequenos cristais pequenos, induzidos pela rápida congelação, é termodinamicamente menos estável que uma estrutura compreendendo menor quantidade cristais de dimensão superior.

O equilíbrio termodinâmico pode ser mantido por recristalização do gelo a partir da transformação de pequenos cristais para grandes. A este processo dá-se o nome de crescimento de cristais.

O recozimento é particularmente útil para:

- Converter uma estrutura de gelo para uma forma cristalina, o que melhora a eficiência da sublimação;
- Cristalizar solutos que são resistentes à cristalização durante o arrefecimento;
- Proporcionar uma homogeneidade durante o crescimento dos cristais de gelo;
- Integrado com o arrefecimento rápido, o calor de recozimento pode minimizar o desenvolvimento de uma película superficial sobre a amostra, facilitando assim a sublimação; e,
- Uma vez que o “annealing” induz uma estrutura de “bolo” mais porosa com eficiência de secagem melhorada, um menor teor de humidade da amostra seca pode ser alcançado, com solubilidade melhorada.

Apesar de o “annealing” aumentar a duração da etapa do ciclo de congelação, a duração do ciclo total de liofilização pode ser, significativamente, reduzida devido às melhorias da eficiência de secagem, resultantes do “annealing” [13].

3.2. O ciclo da secagem

Para maior clareza, é comum separar o ciclo de secagem em secagem primária (fase de sublimação) e secagem secundária ou dessorção.

3.2.1. Secagem primária

Vários factores podem afectar a capacidade de liofilizar partículas em suspensão. Enquanto estes factores podem ser discutidos separadamente, é bom lembrar que eles interagem num sistema dinâmico, e é este delicado equilíbrio entre os demais factores que resulta numa correcta liofilização do produto [15]

Após a fase de congelação, a câmara de secagem, onde o produto é colocado, é submetida ao vácuo e a pressão na câmara é reduzida a um valor que permita que haja a sublimação do solvente (água) na fase de secagem primária [19].

As condições obtidas devem permitir que o gelo possa ser removido do produto congelado via sublimação, resultando num produto estruturalmente seco e intacto. Isto requer um controlo muito cuidado sobre dois parâmetros, temperatura e pressão, envolvidos no processo de liofilização [15].

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

A sublimação do gelo de uma amostra congelada resulta numa estrutura aberta, porosa e seca, onde solutos são espacialmente arranjados como na solução original. Ao contrário da evaporação, onde os componentes estão concentrados à medida que a secagem progride, a sublimação sob vácuo minimiza os efeitos de concentração, fornecendo um produto seco que está activo e facilmente solúvel [13]. Após a solução ter sido congelada, o passo seguinte é secar a amostra ao sublimar o gelo directamente para vapor de água.

De modo a manter as condições de liofilização, é essencial baixar a pressão abaixo do ponto triplo, para assegurar a conversão directa de gelo em vapor de água e prevenir que a amostra funda [13]. O ponto T define o equilíbrio das 3 fases. A água tem um ponto triplo a uma pressão inferior à normal e, por isso, a água não sublima à pressão atmosférica normal, necessitando, de um certo vácuo [20]. O vácuo reduzirá a concentração do ar acima do produto e incentivará a sublimação [13].

A remoção do vapor de água durante a sublimação pode fazer-se por:

- Bombeamento directo;
- Passagem do vapor de água através de agentes fixadores;
- Condensação a baixa temperatura [10].

- Bombeamento directo

As bombas de vácuo utilizadas não permitem a passagem de vapores condensáveis através do óleo, pois estes vapores condensam-se aí e dissolvem-se dando misturas, com uma tensão de vapor elevada em virtude da alta temperatura aí existente. O vácuo alcançado é então limitado por esta tensão de vapor e a operação de liofilização perde eficiência [10].

- Passagem do vapor através de agentes fixadores

Inicialmente, usou-se a absorção por produtos químicos, como o pentóxido de fósforo ou o sulfato de cádmio, cloreto de cálcio ou a adsorção por produtos de grande porosidade, tais como o gel de sílica, mas o seu uso em liofilização não é cómodo [10].

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

- Condensação a baixa temperatura

Na realidade, uma superfície arrefecida funcionando como condensador é o melhor sistema (basicamente é uma superfície fria que permite a condensação do vapor de água). A condensação na parede fria implica, como se sabe, a utilização de baixas temperaturas. A temperatura dessa superfície deve ser inferior à do produto congelado, permitindo ao condensador a fixação do vapor de água libertado do produto [10].

Para manter a liofilização, é necessário estabelecer um gradiente de pressão entre a amostra (pressão alta) e a bomba de vácuo (pressão baixa), passando pela superfície fria, de modo a que a água migre da amostra, à medida que a secagem progride [13]. As moléculas têm uma afinidade natural para se mover em direcção à superfície fria porque a sua pressão de vapor é menor que a do produto. Portanto, a temperatura do colectador deve ser significativamente menor do que a temperatura do produto [15].

Uma maior eficiência na sublimação é derivada do aumento da temperatura da amostra, em vez da redução da temperatura da superfície fria [13]. As prateleiras, nesta fase, podem atingir temperaturas acima dos 0°C (5°C, por exemplo).

Quando as moléculas de água sublimam e entram na fase de vapor, mantêm com elas uma quantidade significativa de calor latente de sublimação (2840 kJ / kg) e, portanto, a temperatura do produto congelado é de novo reduzida [19].

Se não houver nenhum calor fornecido ao produto por uma fonte de calor, então, a pressão de vapor da água à temperatura do produto atinge o mesmo valor que o da pressão parcial do vapor de água na câmara de secagem e, portanto, o sistema atinge o equilíbrio, e nenhuma sublimação da água adicional, a partir do produto, irá ocorrer. Assim, a fim de ter a sublimação contínua da água, a partir do produto, o calor latente de sublimação deve ser fornecido ao material a partir de uma fonte de calor [19].

É extremamente importante que a temperatura, na qual um produto é liofilizado, seja equilibrada entre a temperatura que mantém a integridade do produto congelado e a temperatura que maximiza a pressão de vapor do produto. Este equilíbrio é a chave para a secagem ideal [19].

O calor extraído da amostra seca, como vapor de água, deve equilibrar cuidadosamente a quantidade de energia adicionada à amostra. A menos que esse equilíbrio possa ser mantido, a temperatura do produto ou diminui,

reduzindo assim a eficiência de secagem ou aumenta, o que pode comprometer a qualidade do produto induzindo a fusão ou colapso [13].

A fusão na interface entre a camada congelada e a camada seca, ou outra fusão que possa ocorrer na camada congelada, pode causar falhas de material como tufamento, encolhimento, entre outras. Quando ocorre a fusão, nalgum ponto da camada congelada, o solvente, nesse ponto, não pode ser removido por sublimação [19].

Se o material tem uma forma vítrea e se a temperatura de congelação mínima é excedida durante a fase de secagem primária, então, o fenómeno de colapso pode ocorrer. O produto colapsa e há uma perda de rigidez na matriz sólida. Novamente, neste caso, existe uma falha no processo na secagem do material congelado, porque a água já não pode ser removida a partir da camada congelada, apenas por sublimação. Também há, pelo menos, uma perda de estabilidade estrutural [19]. Em geral, a estabilidade do produto está relacionada com a temperatura da camada congelada durante a fase de secagem primária. A temperatura máxima admissível que a camada congelada pode tolerar sem sofrer fusão, encolhimento, colapso e perda da estabilidade (ou propriedade) do produto, é denominada, para um determinado produto, por T_m . (T_m é frequentemente chamado, por convenção, a temperatura de fusão da interface de sublimação da camada congelada.) [19].

Nos estágios iniciais da sublimação, o equilíbrio é simples de manter, porque a estrutura seca oferece a mínima resistência ao fluxo de vapor. Contudo, à medida que a secagem prossegue e a profundidade da camada seca aumenta, o constrangimento ao fluxo de vapor aumenta e a amostra pode aquecer o suficiente para fundir ou colapsar, a menos que a temperatura do processo seja reduzida. Como foi referido, uma consequência da redução da energia do processo é a redução da taxa de secagem e alongamento do tempo do ciclo, mas é inevitável se a qualidade do produto for prioritária [13].

3.2.1.1. Colapso

De seguida, segue-se uma descrição mais aprofundada do colapso.

O colapso é a mudança macroscópica ou microscópica na estrutura de um material desidratado como resposta às condições ambientais. Shackell, um dos pioneiros da liofilização, tentou congelar carne bovina, mas observou que ao ser seca, sofria um

significativo grau de encolhimento. Observou depois que, ao misturar a carne com areia antes da secagem, este encolhimento poderia ser reduzido. Jennings esclareceu essa observação com o abrandamento do processo de secagem e a manutenção de um estado congelação completo, durante a secagem.

O colapso é caracterizado pela perda de estrutura de “bolo” ou durante a secagem ou durante o, subsequente, armazenagem. Este fenómeno, geralmente, resulta num bolo cujo volume é menor que o volume da matriz inicial congelada. Além disso, uma redução do tamanho médio dos poros e da porosidade, bem como um aumento na densidade, podem ser observados.

Normalmente, a ocorrência do colapso é considerada prejudicial para a qualidade do produto. No entanto, a observação do colapso não se limita à liofilização, mas atinge outras tecnologias de secagem [14].

A ocorrência do colapso

Como foi referido em cima, o colapso pode ocorrer durante o processo de liofilização em si, ou durante a armazenagem.

Colapso durante o processo

Durante o processo de liofilização, o colapso pode ocorrer tanto na secagem primária como durante a secundária. O início do colapso é regulado pela viscosidade do sistema liofilizado, pela escala de tempo do processo de secagem e pelo diâmetro dos poros do bolo liofilizado. Durante o processo de liofilização, o período de tempo durante o qual o colapso tem a probabilidade de ocorrer é ditado pelo tempo que as lamelas, que se encontram entre os cristais de gelo, levam a secar. O aparecimento do colapso é, principalmente, influenciado pela viscosidade da fase amorfa e pelo diâmetro dos poros. O último tem um efeito menos acentuado que o primeiro. A viscosidade da fase amorfa é afectada pela temperatura do produto, determinada pela pressão da câmara e temperatura da prateleira. Sempre que a temperatura do produto sobe acima de uma temperatura crítica, temperatura de colapso, T_c , o colapso ocorre [14].

Colapso durante a armazenagem

O colapso durante a armazenagem, evidentemente, ocorre sempre que um produto é armazenado acima da sua temperatura de transição vítrea, ou quando a temperatura é

demasiado elevada, por exemplo, quando um sistema de arrefecimento durante o transporte está defeituoso, ou quando a temperatura de transição vítrea do sistema é reduzida para temperaturas inferiores à da temperatura de armazenagem, a partir da humidade exterior que foi absorvida, através dos sistemas de fechos permeáveis (um exemplo). Relativamente ao colapso durante a armazenagem, o prazo de validade torna-se dominante. [14]

Temperatura de colapso (T_c)

A temperatura de colapso representa a temperatura de funcionamento máxima permitida durante a secagem primária. Assim, é um dos parâmetros importantes durante o desenvolvimento do ciclo de liofilização e sempre houve um interesse especial na sua determinação. Uma grande quantidade de métodos para a determinação da T_c tem sido estudada, desde métodos térmicos, a métodos ópticos, entre outros.

Visto que a definição de colapso esta relacionada com a perda de estrutura, a maioria dos métodos que determinam a temperatura de colapso é baseada no julgamento óptico da amostra, resultando em desvios característicos da análise do operador.

A temperatura de colapso é afectada pelo peso molecular dos solutos, bem como sua estrutura e composição. A temperatura de colapso de uma mistura de vários solutos é influenciada pela temperatura de colapso e peso de cada um dos componentes individuais [14].

Deve-se notar que a regularidade, e a uniformidade do aquecimento, e o seu perfeito controlo, são essenciais para uma boa liofilização.

Os insucessos, por vezes, observados, são muitas vezes, devidos, mais às irregularidades de aquecimento que às imperfeições das máquinas de vácuo ou das máquinas frigoríficas.

O calor pode ser aplicado por vários meios [10].

- Aquecimento pelo ar ambiente:

É um sistema difícil de controlar e usado para secagens múltiplas.

No fim da operação, o aquecimento pelo ar ambiente é, muitas vezes, insuficiente, para diminuir a taxa de humidade residual para valores desejáveis.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

É necessário, por isso, aquecer os frascos ou as ampolas seja aquecendo todo o ar ambiente, seja aquecendo somente o ar que os envolve, por sistema eléctrico ou por raios infra-vermelhos [10].

- Aquecimento sobre tabuleiros com circulação de um líquido quente no interior:
O fluido é aquecido no exterior, quer por resistências eléctricas, quer por queimadores a gás, e a temperatura é regulada por termóstato, geralmente entre +30° e +40°, dependendo das velocidades de circulação do fluido, das secções dos tubos, e da disposição dos tabuleiros. Estas instalações necessitam de grande vigilância. [10].
- Aquecimento por resistências eléctricas:
Colocam-se as resistências por baixo das placas metálicas que constituem os tabuleiros, sobre os quais assentam as caixas contendo os frascos ou ampolas. Este aquecimento é mais regular e uniforme, mas requer a observação de certos pormenores. [10].

Controlo do aquecimento

O controlo do aquecimento pode fazer-se por:

- Reguladores automáticos:
São dispositivos especiais que nos permitem regular o aquecimento, à nossa vontade. [10].
- Controladores cíclicos:
Permitem limitar a energia de aquecimento disponível, dando uma variação mais lenta da temperatura dos tabuleiros, evitando, assim, impulsos térmicos no produto.
Dão segurança à operação quando abandonamos o aparelho. [10].
- Reguladores de aquecimento pela resistividade do produto:
Este método exige a utilização de aparelhagem especial e, em particular de células de resistividade adaptadas à liofilização dos produtos. [10].

A secagem primária pode levar 6 a 10 horas, até reduzir o conteúdo de água a 15% sobre o peso húmido inicial. O final desta etapa pode ser constatado pelo aumento da temperatura do produto num valor próximo ao da prateleira ou pela observação visual quando desaparece a interface entre camada seca e camada congelada [2].

3.2.2. Secagem secundária

A secagem secundária esteve, certamente, presente quando Shackell realizou a primeira secagem de espécimes congelados num sistema de vácuo, onde o ácido sulfúrico serviu como um sistema condensador [3]. A referência mais antiga que menciona que o processo de secagem está dividido em duas fracções, e em que a segunda fracção foi descrita como secagem secundária, remonta a Greaves [3].

Enquanto o principal objectivo da secagem primária, é sublimar o solvente da matriz, a secagem secundária tem como principal função a redução do teor de humidade residual contida no produto, para níveis que não suportarão mais reacções químicas ou desenvolvimento biológico [3]. Embora não haja nenhuma linha nítida de demarcação entre os processos primário e secundário, a quantidade da restante água absorvida no bolo após a conclusão da secagem primária é geralmente muito alta para alcançar a desejada estabilidade do produto. Daí a importância de existir uma secagem secundária. Por outras palavras, o segundo estágio de secagem envolve a remoção da água que não congelou.

Num processo de liofilização ideal, apenas água congelada deve ser removida durante a secagem primária, enquanto a água sorvida (ou combinada, mais a frente explicada) deve ser retirada na segunda. Contudo, uma pequena quantidade de água sorvida pode ser removida por dessorção da camada seca do produto, durante a secagem primária e, por isso, pode ocorrer alguma secagem secundária mesmo durante a primeira secagem [19]. Em contraste com a secagem primária, que é um processo dinâmico associado a altas taxas de fluxo de vapor, a secagem secundária é muito menos eficiente e representa 30-40% do tempo total do processo [13]. Relativamente à primeira etapa, existe uma redução de pressão (De 0,1-1 mbar para 0,03 mbar).

Nos processos reais, a fase de secagem secundária é iniciada quando todo o gelo é removido por sublimação (final da etapa de secagem primária). Considera-se, então,

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

que, durante a fase da secagem secundária, a maioria da água que não congela (água ligada) é removida.

Tal como na secagem primária, a quantidade de calor que pode ser fornecido ao produto não pode ser fornecido livremente, porque existem certos constrangimentos que têm de ser respeitados. Os constrangimentos têm a ver com o teor de humidade e com temperatura do produto. Essas duas variáveis influenciam a estabilidade estrutural, bem como a estabilidade do produto, durante e após a secagem [19].

Para a estabilidade estrutural, os mesmos fenómenos, como no caso da fase da secagem primária, têm de ser considerados: colapso, fusão, ou dissolução da matriz sólida podem ocorrer. A estabilidade do produto (ex., bioactividade) é uma função tanto do conteúdo da humidade como da temperatura na amostra, e durante a secagem secundária a concentração de humidade e temperatura na amostra pode variar largamente com a localização e tempo [19].

Isto implica que o potencial para a alteração do produto a ocorrer na amostra irá variar com o tempo e local. O perfil de concentração da humidade está relacionado com o perfil de temperatura na camada seca. Assim, o teor de humidade na amostra não pode ser controlado independentemente. Uma vez que muitos produtos são sensíveis à temperatura, é usual controlar a estabilidade do produto limitando o valor da temperatura, durante o processo de secagem secundária e, antes do final do ciclo, o teor de humidade final é verificado [19].

O fornecimento de calor ao produto é feito, normalmente, por condução, convecção, ou radiação. As temperaturas dos seguintes produtos são geralmente empregadas: (a) entre 10 e 35°C para produtos sensíveis ao calor e (b) 50°C ou mais, para produtos menos sensíveis ao calor [19].

Terminada a secagem secundária, a prática demonstrará qual o teor de humidade aceitável, em função dos diversos produtos a liofilizar, donde se depreende que a determinação desses valores representa um factor importante [10]. Além da humidade residual, o oxigénio desempenha um papel importante na estabilidade dos produtos liofilizados; convém, portanto, ou introduzir um gás inerte nos recipientes ou fechá-los no vácuo [10].

As razões para secar o produto para estes níveis são apetecíveis por várias vantagens: Quando o conteúdo de água é mais elevado do que estes níveis, o produto irá

desnaturar. Quando a humidade residual é inferiores a estes níveis, muitos produtos podem sofrer alterações químicas ou enzimáticas [10].

Para além do teor da humidade residual, a temperatura à qual o material seco é mantido em armazenagem é também um factor crítico na determinação da estabilidade do produto durante a sua armazenagem [19]. O papel que a água cumpre na estabilidade do produto final é bastante complexa, e não parece haver, pelo menos, neste momento, nenhuma regra exacta para prever, com precisão, o comportamento do produto [3]. Como já foi referido, por trabalhar com baixas temperaturas e sob vácuo, este processo é recomendado para materiais termossensíveis, gerando produtos de qualidade superior quando comparados aos obtidos noutras técnicas de secagem. [21].

Existem duas categorias de água numa formulação. De seguida, cada uma delas será discriminada de forma aprofundada.

3.2.2.1. Free water – Água livre

A água livre no produto final é a água absorvida pelo bolo ou adsorvida na superfície do bolo. Esta água pode resultar ou directamente da região intersticial ou a partir do fluxo de vapor de água, que ocorre durante o processo primário de secagem. A humidade residual, como previsto, não será distribuída uniformemente por todo o bolo. Pikal e Shah descobriram que os menores valores de humidade existiam no topo do bolo. Contudo, encontraram que valores ainda menores de humidade existiam perto das paredes dos frascos. A baixa humidade perto das paredes de um frasco é atribuída a algum encolhimento do bolo longe das paredes. Este encolhimento do bolo fornece um caminho para que o vapor de água deixe o frasco.

Contudo, não se pode generalizar este caso. Esta condição ocorre apenas quando há encolhimento do bolo longe das paredes do frasco [3]. No entanto, alguns bolos liofilizados não se separam das paredes de um frasco, mesmo com o frasco numa posição invertida. Para estes, o seu topo pode representar a região de mais baixo teor de humidade [3].

É geralmente aceite, que a presença de quantidades em excesso de humidade residual é responsável pela instabilidade das formulações secas a determinadas temperaturas. Pode-se observar, que a quantidade de humidade residual no bolo pode surgir de outras fontes, durante ou após a conclusão do processo de liofilização [3].

3.2.2.2. Bound water – Água combinada

Está associada à estabilidade de um componente activo ou excipiente. A remoção de tal água iria alterar não apenas a configuração da proteína, mas também a sua funcionalidade química. É, portanto, vital que o processo de liofilização reduza o teor de água livre do produto, mas que não afecte a água ligada, que está associada com a natureza do constituinte activo. [3].

Água de hidratação ou ligada

Está ligada quimicamente com outras substâncias do alimento e é difícil de ser eliminada. Não é utilizável como solvente, não permite o desenvolvimento de microrganismo e retarda reacções químicas [22]. Considerando que a quantidade de água ligada é de cerca de 10-35% do teor de humidade total (65-90% de humidade total pode ser a água livre que foi congelada e, em seguida, removida por sublimação durante a fase de secagem primária), o seu efeito sobre a taxa e tempo de secagem total é muito significativo. A água ligada é removida por aquecimento do produto, sob vácuo [19].

Água supercifial ou absorvida

Esta é uma outra forma de água combinada, e é associada à estabilidade de moléculas de proteína. A presença desta é muitas vezes um factor na determinação da configuração da proteína e, portanto, na sua actividade [3].

3.2.2.3. Relação entre humidade e sólido

As considerações básicas de secagem de materiais biológicos são aquelas que expressam os relacionamentos de humidade e sólido.

Na tentativa de ajustar os modelos para expressar a secagem, os materiais biológicos sofrem classificações por características físicas do sólido. Para alguns autores o material biológico é um material classificado de poroso-higroscópico, e para outros é classificado de material coloidal.

Esta primeira caracterização vinculada ao sólido é realizada para poder inferir sobre as suas propriedades determinantes na água durante a secagem. Portanto, a primeira consideração é a respeito da higroscopicidade do material biológico. Noutras palavras, os materiais a serem submetidos à secagem são classificados como materiais

higroscópicos ou não higroscópicos (hidrofóbicos), sendo que os materiais não higroscópicos são mais fáceis de secar.

Nos materiais biológicos, parte da humidade presente no material parece estar presa (ligada) nas proteínas, nos carboidratos, nas substâncias coloidais e a água está presente na forma de soluções.

Assim, a segunda consideração é de cunho mais científico que a primeira e versa sobre a discussão das propriedades físico-químicas e termodinâmicas das ligações das moléculas de água nas estruturas sólidas dos materiais biológicos. Neste conceito, a base da análise é a verificação se a água está ligada ou não ligada (ligações física e/ou química) nas estruturas dos sólidos.

As águas não ligadas (águas livres) envolvem a energia para a sua evaporação ao nível de calor latente de vaporização, ao passo que as águas ligadas necessitam de maior nível de energia para a sua evaporação. Consequentemente, os materiais hidrofóbicos apresentam águas livres.

Ainda dentro das considerações a respeito das propriedades, a mais importante delas é a actividade da água [23].

3.2.2.4. Actividade da água (aw) e conteúdo de água

Existe uma relação entre o conteúdo de água dos alimentos e a sua capacidade de sofrer alterações, e é justamente nesse factor que a liofilização visa actuar.

Reduzindo o conteúdo de água do alimento e, simultaneamente, concentrando os solutos, diminui-se o risco de alterações. No entanto, quanto maior a humidade final, mais macia é a consistência do produto – qualidade apreciada num produto desidratado.

Contudo, o conteúdo de água de um alimento não é um suficiente para prever a sua estabilidade, a restante composição do produto deve ser levada em conta. Factores como concentração de oxigênio, pH, mobilidade da água, tipo de soluto presente, também devem ser considerados. Percebe-se, observando-se alimentos com igual conteúdo de água, que estes podem sofrer alterações de forma distinta, devido ao facto da água estar ligada com diferentes intensidades às moléculas dos constituintes não aquosos. Quando a água está ligada mais fortemente aos componentes não aquosos, torna-se menos disponível para o crescimento de microrganismos e reacções químicas [2]. Supracitado, nos alimentos, a água existe sob duas formas: água livre e água combinada. Sendo a

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

água total a soma dessas duas parcelas. A água livre está presente nos espaços intergranulares e entre os poros do alimento. Esta é conhecida como actividade de água [24].

A pressão de vapor de água em equilíbrio, P_{eq} , é, para cada alimento, uma medida intensiva da água presente, ou seja, é uma medida da quantidade de água absorvida no produto. A perda ou ganho de água pelo produto alimentar depende do valor de P_{eq} em relação à pressão parcial de vapor de água, P_w [pressão parcial = y(fracção molar) x Pressão total do sistema (ar+vapor)], existente na atmosfera que com ele contacta [18].

No entanto, P_{eq} é uma quantidade sensível a variações de temperatura, pelo que na prática é mais conveniente usar uma quantidade menos dependente da temperatura. Assim, passa a ser utilizada de forma generalizada a actividade da água, a_w , definida como a razão entre a pressão parcial do vapor de água em equilíbrio com o produto e a pressão de vapor de água pura à mesma temperatura [18].

$$a_w = \frac{P_{eq}}{P_w^0}$$

a_w – Actividade da água

P_{eq} – Pressão parcial de vapor em equilíbrio com o produto com dado conteúdo de humidade e temperatura.

P_w^0 – Pressão do vapor de equilíbrio da água pura à mesma temperatura.

A humidade relativa de equilíbrio, HRE, é definida por:

$$HRE = \left(\frac{P_{eq}}{P_{sat}'} \right)_{T,P=1atm} \times 100$$

A pressão parcial do vapor de água em ar saturado à pressão P , P_{sat} , não é a mesma que a pressão de vapor de água líquida pura à mesma temperatura, p_w^0 . A diferença é dada por:

$$\ln P_{sat}(P) - \ln P_w^0(P_w^0) = \frac{(P - P_w^0)V^0}{RT}$$

Em que:

$P_{sat}(P)$ – Pressão parcial de vapor de água em ar saturado à pressão P

$P_w^0(P_w^0)$ – Pressão de vapor de água líquida à mesma temperatura

V^0 - Volume molar de água líquida à temperatura T

R – Constante universal dos gases perfeitos

Mas, às pressões ordinárias a diferença entre estas é desprezável. Assim, para propósitos práticos, P_{sat} , pode ser substituída por P_w^0 .

No equilíbrio, a a_w está relacionada com a humidade relativa da atmosfera que a rodeia pela equação.

$$a_w = \frac{HRE(\%)}{100}$$

3.2.2.5. Isotérmicas de sorção

Os valores de actividade da água característicos de cada produto são habitualmente apresentados sob a forma de isotérmicas de sorção; estas estabelecem a relação de equilíbrio, a uma dada temperatura, entre o conteúdo de humidade do produto e a humidade relativa do ambiente envolvente.

É costume distinguir:

- Isotérmicas de adsorção, obtidas quando o material “completamente” seco é progressivamente hidratado em atmosferas de humidade relativa sucessivamente crescente.
- Isotérmicas de dessorção, obtidas quando o material inicialmente saturado de água é colocado sob humidades relativas sucessivamente decrescentes. [18]

Qualquer alimento com uma certa humidade em contacto com a atmosfera que o rodeia adsorve ou desorve (ganha ou perde) humidade. A quantidade de água que é absorvida ou desorvida depende não só da concentração de água já existente no alimento, como é uma função sensível da natureza e da concentração das substâncias solúveis em água presentes no respectivo produto. Por outro lado, a quantidade e a velocidade de perda ou ganho de água depende também da concentração do vapor de água presente na atmosfera, a qual apresenta grandes variações [18].

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Esta troca de humidade com a atmosfera é extremamente importante em grande número de operações de tecnologia de processamento de alimentos e, nomeadamente, na embalagem, na armazenagem, na desidratação e liofilização [18].

Se analisarmos somente em termos de conteúdo de humidade de equilíbrio fica difícil a percepção da validade desta propriedade (actividade da água) para o controlo da qualidade de materiais biológicos. No entanto, se utilizarmos a definição da actividade de água, percebemos que a pressão de vapor de água representa a disponibilidade da água para o crescimento de microorganismos, além de outras reacções que alteram o produto. O valor de a_w varia de 0 a 1 [23].

A isotérmica de sorção pode ser dividida em três regiões dependendo do modo como a humidade/água presente se “liga” ao sólido. Na figura 3 (mostrada em baixo), a região A corresponde à adsorção de um primeira camada de moléculas de água – monocamada; a região B corresponde à adsorção de camadas adicionais – multicamadas; a região C corresponde a uma condensação de água suficiente para provocar a dissolução dos materiais solúveis presentes. Portanto, o conhecimento destas curvas de sorção é indispensável para determinar o teor de água final necessário para estabilizar um produto [18].

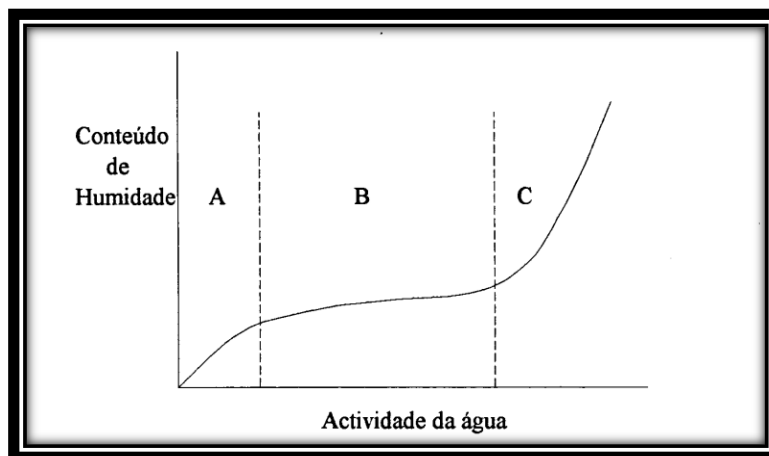


Figura 3 - Representação de uma isotérmica de sorção (adaptado de 18)

Frequentemente, para uma dada humidade relativa a isotérmica de dessorção apresenta, para idêntico valor a_w , um maior conteúdo de humidade que a isotérmica de adsorção, fenómeno designado por histerese (figura 4). A histerese de sorção de humidade tem implicações teóricas e práticas importantes. As implicações teóricas prendem-se com os aspectos gerais de irreversibilidade do processo de sorção e, conseqüentemente, com a

validade das funções termodinâmicas deduzidas para o sistema. As implicações práticas estão relacionadas com os efeitos da histerese na deterioração química e microbiológica [18].

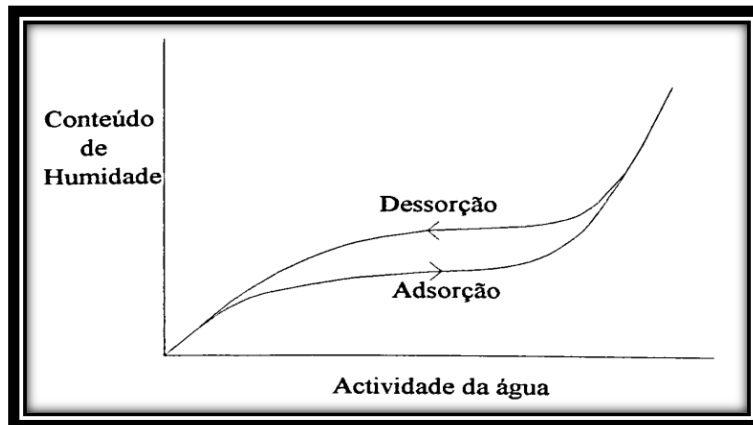


Figura 4 - Representação esquemática da histerese de sorção (adaptado de 18)

Pela facilidade de quantificação da isotérmica, existem muitas equações empíricas que correlacionam os dados experimentais das isotérmicas de sorção de materiais biológicos. Para a maioria das isotérmicas, os polinómios de segundo grau têm demonstrado bons resultados [23].

Apesar das dificuldades apresentadas pelas equações teóricas, algumas considerações termodinâmicas são indispensáveis.

Com o intuito de prever o comportamento das isotérmicas, diversos autores propuseram modelos de ajuste de isothermas de sorção. Estes modelos são úteis no conhecimento das características dos produtos. Na sua maioria, são modelos empíricos [23].

3.2.2.6. Transferência de energia e massa

Como qualquer outro método de secagem, a liofilização é um processo simultâneo, que envolve transmissão de calor e transferência de massas [2]. O que pode ser observado na Fig 5.

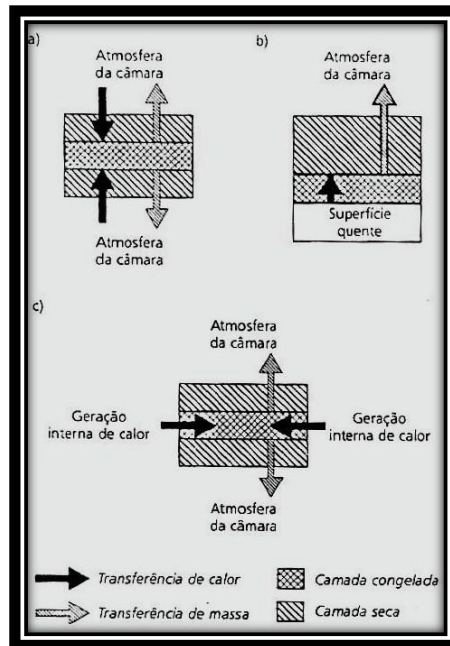


Figura 5 - Transmissão de calor na liofilização (adaptado de 2)

A taxa de secagem dos alimentos depende principalmente da resistência dos mesmos à transferência de calor e da resistência ao fluxo de vapor (transferência de massa) da frente de sublimação (limite entre as camadas seca e congelada) [2].

3.2.2.7. Taxa de transferência de calor

Existem três métodos de transferência de calor. São eles:

a) Transferência de calor pela camada seca

Se o calor é transferido pela camada seca do alimento, essa taxa de transferência de calor depende da espessura e da área superficial do alimento, da condutividade térmica da camada seca e da diferença de temperatura entre a superfície do alimento e a frente de gelo. Então, o factor limitativo da velocidade de secagem é a transferência de calor. A condutividade térmica da camada seca é tão baixa que se compara a de matérias isolantes, logo oferece uma alta resistência ao fluxo de calor. Então, à medida que a secagem avança, essa camada torna-se mais grossa e a resistência da transferência de calor aumenta. Uma diminuição de tamanho ou na espessura do alimento aumenta a taxa de transferência de calor ou um aumento de temperatura, porém, na liofilização a temperatura de superfície é limitada entre 40 e 65 °C, para evitar que ocorra algum tipo de mudança química que poderia reduzir a qualidade do alimento [2].

b) Transferência de calor através da camada congelada

Quando o calor é transferido por condução pela camada congelada do alimento, a taxa de transferência de calor depende da espessura do alimento e da condutividade térmica do gelo. Mesmo o gelo sendo um condutor de calor relativamente bom, o calor necessário para a sublimação é tão elevado, e o gradiente de temperatura muito pequeno, que a velocidade de secagem só será aceitável se o produto tiver pouca espessura. À medida que a secagem avança facilita-se a transferência de calor, em decorrência da redução progressiva da espessura do gelo [2].

c) Aquecimento por micro-ondas

As limitações nas taxas de transferência de calor em operações de liofilização por condução, levaram a que cedo se tentasse proporcionar a geração de calor interno com o uso de energia de micro-ondas [19]. A taxa de transferência de calor não é influenciada pela condutividade térmica do gelo ou do alimento seco, ou pela espessura da camada seca ao empregar o aquecimento por microondas, porque o calor produz-se no interior. Assim, a secagem ocorre muito mais rapidamente. [2]

Apesar destas vantagens aparentes, a aplicação do aquecimento por microondas para liofilização industrial não tem sido bem-sucedida. As principais razões para que esta tecnologia não tenha o sucesso desejado são as seguintes:

- A energia fornecida sob a forma de microondas é muito cara;
- É um processo muito difícil de controlar a nível da temperatura (possível ocorrência de aquecimento não homogêneo);
- Ainda não estão disponíveis equipamentos económicos adequados aos requisitos da liofilização industrial contínua de alimentos e produtos farmacêuticos em larga escala [19].

Esta tecnologia, normalmente, combina-se com uma fonte de calor convencional, e assim o tempo total de secagem reduz-se em 33 a 50 % [2].

4. Sistema de fecho do recipiente

Após o processo, a formulação tem de ser protegida do ambiente. Na maioria dos casos, a formulação contida no recipiente é selada por um sistema de fecho, que aperta a tampa. O fecho da tampa protege, temporariamente, o produto final do ambiente. Após este passo, o produto pode ser removido, de forma segura, do liofilizador, e o fecho é selado com um metal ou capa plástica colorida, com o intuito de providenciar uma selagem permanente do produto [3].

5. Reidratação

A capacidade que os produtos têm em serem rapidamente reidratados, é uma das qualidades mais distintas da liofilização, e é um factor que demonstra a superioridade deste método sobre outros [9].

A aptidão que um produto tem para desidratar-se e depois ser reconstituído com água depende, entre outras coisas, da formação de uma estrutura porosa, livre de barreiras impermeáveis. Um produto pode ser facilmente liofilizado mas, ao ter dificuldade em ser reidratado, perde o seu valor. Para além disto, existem outros obstáculos para a penetração do fluido reidratante, como uma membrana impermeável, bolhas de ar presas, etc [9].

Crê-se que a maior reidratação obtida por este método está correlacionada com a manutenção do poder de ligação entre as moléculas de água e o encolhimento que se verifica noutros métodos de secagem, não se verifica neste caso. Depois de vários estudos, concluiu-se que há uma estreita relação entre o grau de reidratação e a ruptura da estrutura celular, o que demonstra, uma vez mais, a importância da congelação.

No MIT, foi também realizado um minucioso estudo acerca da influência das variáveis no processo de liofilização, utilizando camarão do mar. Em primeiro lugar, verificou-se que a reidratação é melhor a uma temperatura de secagem inferior.

A temperatura de cozimento do camarão também tem preponderância no grau de reidratação. Assim, quando se recorre a uma temperatura superior, será necessário despender menos tempo para um mesmo grau de reidratação. Estes fenómenos podem ser explicados, tendo em conta a maior destruição ou desnaturação das proteínas,

aquando da utilização de temperaturas mais altas. Ou seja, existe uma ligação entre a temperatura de cozimento e o grau de reidratação.

Concluindo, pode-se dizer que as numerosas variáveis que existem no processo de liofilização podem ter efeitos distintos, segundo a natureza do produto. [9].

6. Aplicações

A nível de aplicações do método de liofilização, pode-se constatar que existe uma grande variedade de produtos, onde este pode ser boa aposta.

6.1. Produtos alimentares

As carnes, mariscos e peixes são os produtos mais beneficiados com este processo. Na preparação das carnes, é importante fazer-se um corte perpendicularmente à direcção das fibras musculares, para conseguir uma secagem e reidratação mais rápidas. Para se conseguir atingir uma estabilidade biológica, é necessário secar as carnes abaixo dos 2% de humidade. Contudo, chegar a este ponto pode-se tornar incomportável a nível económico, sendo necessário aplicar agentes dessecantes, como o óxido de cálcio, contido dentro de bolsas de material permeável ao vapor de água, que vão dentro do pacote.

Uma limitação séria nas carnes, prende-se com o facto de que só se pode secar pedaços inferiores a 5 cm, pois, de outra forma, o tempo de secagem seria extremamente grande. O outro inconveniente tem a ver com a textura ligeiramente seca que se verifica no produto final.

As frutas, em particular, os pêssegos, melões, maçãs, morangos, cerejas, etc., adaptam-se muito bem a este processo, sobretudo pela sua estabilidade na armazenagem e fácil reidratação. Assim, pêssegos tratados com dióxido de enxofre ou cloreto de cálcio, antes da secagem, conservam-se em excelentes condições por mais de seis meses a 38°C. A banana constitui uma excepção. Apesar de secar rapidamente, é quase impossível reidratá-la.

Relativamente ao sumo das frutas, os novos métodos como o *spray-drying*, o *foammat dryin*, o *puff-drying*, produzem resultados tão bons quantos os da liofilização, mas com

menor custo. Desta forma, conclui-se que ao nível desta linha de produtos, a liofilização não oferece maiores vantagens.

Os legumes constituem um mercado de grande volume. A nível técnico, a grande maioria destes produtos pode ser facilmente processado com resultados magníficos, sem embargo, o custo da matéria-prima, volume de produção e preços no mercado são, geralmente, os itens que determinam a viabilidade do seu processamento. No caso das ervilhas é necessário perfura-las para facilitar a sua reidratação [9].

O café liofilizado (o produto alimentar liofilizado mais conhecido) tem maior duração e pesa menos que as outras formas de café. A sua procura por parte do mercado tem crescido muito [25].

O processo é usado para produzir, por exemplo, a comida dos astronautas. O uso de produtos liofilizados, é também popular e conveniente para caminheiros e aventureiros porque o peso reduzido permite que se carreguem mais alimento, sendo fácil reconstituí-los com a água disponível. Excepto em casos especiais, como o café liofilizado, os alimentos liofilizados não conseguem competir economicamente com os produtos alimentares congelados ou enlatados [26].

6.2. Indústria da saúde

A liofilização é frequentemente utilizada na indústria farmacêutica, quando estão em causa as questões de estabilidade do ingrediente activo na solução, como as proteínas. As empresas farmacêuticas, recorrentemente, usam a liofilização para estender a vida útil dos produtos, tais como vacinas e outros injectáveis. Ao remover a água do material e selá-lo num frasco, o produto pode ser armazenado, transportado e, mais tarde, ser reconstituído na sua forma original, para que se dê a injeção [1].

Na indústria da saúde, são, também, liofilizados ossos e outros tecidos corporais para uso cirúrgico ou médico [13].

6.3. Produtos veterinários

Os produtos veterinários são, talvez, a segunda causa do uso da liofilização. Estes têm aplicações tanto ao nível de vacinas para animais domésticos como para larga escala, onde se inserem a inoculação de rebanhos de bovinos e ovinos ou de grandes bandos de

aves de capoeira. Estes produtos liofilizados servem, não só, para proteger os animais e o respectivo investimento, como também o consumidor de doenças que podem ser transmitidas pela ingestão de produtos animais [3].

A liofilização também aplicada à taxidermia. É um ramo da biologia que tem por objetivo conservar animais mortos desprovidos de vísceras, carnes e esqueletos, utilizando-se somente a pele do exemplar. Desta forma, é possível montar ou reproduzir animais para exposição ou estudo. O sucesso ou fracasso desta operação, muitas vezes relaciona-se directamente com a boa congelação, e com que temperatura na câmara é realizada a secagem da amostra [1].

Quando congeladas, as várias amostras de taxidermia irão solidificar a temperaturas completamente diferentes. A temperatura de completa solidificação da amostra de taxidermia é designada por temperatura eutética.

Ao determinar a temperatura eutética, as amostras de taxidermia podem ser divididas em dois grupos gerais: aquelas que contêm grandes quantidades de gordura corporal e óleos (a maioria dos peixes, algumas espécies de patos, anfíbios, etc) e aqueles que não (a maioria dos mamíferos, répteis, aves de caça, delicadas flores, etc) [1].

6.4. Outras aplicações

Outras aplicações incluem a liofilização de flores e a preservação de documentos/livros/manuscritos. O sucesso deste processo no ramo das flores tem sido limitado. Apenas, a parte da flor de toda a planta é que responde positivamente à liofilização, mas mesmo assim existe uma pequena variação na cor das pétalas. Na desidratação de plantas, a natureza da planta tem um papel importante. Enquanto, a preservação de flores por liofilização pode representar um grande mercado, o crescimento do mesmo aguarda o desenvolvimento de um processo melhor. O pré-tratamento da flor antes de liofilização quando recém-cortada ou mesmo durante o seu crescimento, pode ser necessário para atingir um produto mais natural e com uma vida útil relativamente longa [3].

A liofilização tem sido importantíssima no resgate de preciosos manuscritos, livros e documentos danificados pela água de inundações ou proveniente dos veículos dos bombeiros, aquando da existência de um incêndio. Enquanto tais serviços não são muitas vezes necessários, o facto de que esta tecnologia tem aplicações que podem ser

benéficas para as gerações posteriores é, sem dúvida, um legado gratificante da mesma [3].

Contudo, a liofilização é menos apropriada em:

1. Materiais oleosos ou ricos em açúcar;
2. Produtos que formam uma superfície impermeável, que impendem a migração do vapor de água da amostra;
3. Células eucarióticas, que são capazes de manter a viabilidade quando congeladas apenas na presença de aditivos, podem ser incompatíveis com o processo de liofilização [13].

7. Equipamentos constituintes do processo de liofilização

Os liofilizadores constituem-se basicamente pelos seguintes elementos: câmara de vácuo, fonte de calor, condensador de vapor de água e bomba de vácuo. Para além destes componentes, o produto tem de ser previamente congelado. [2]

Existem diversos tipos de liofilizadores, diferenciando-se em detrimento do modo como se proporciona calor para a superfície do alimento. Os tipos que utilizam condução e radiação são utilizados comercialmente e, actualmente, também se utiliza a liofilização por micro-onda. [2]

7.1. Câmara do liofilizador

O que se segue é uma breve descrição geral dos componentes essenciais e as suas funções num liofilizador.

A câmara de liofilização tem duas funções principais: (1) fornecer um ambiente seguro para o produto durante todo o processo de liofilização, e (2) fornecer as temperaturas e pressões necessárias para realizar cada etapa do processo. A câmara de secagem é um compartimento de metal, geralmente, construído em aço inoxidável, em que se pode ter acesso através de uma porta articulada.

A porta da câmara ou é feita de um derivado do metal, como aço inoxidável, ou de plástico transparente. Geralmente, o acesso à câmara é feito por meio de uma porta de

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

metal contendo um vidro transparente. A porta está equipada com uma junta de borracha para formar o selo de vácuo com a câmara de secagem.

A câmara de secagem contém prateleiras utilizáveis e uma prateleira inutilizável. As bandejas contendo o produto, seja a granel ou em recipientes de vidro, são carregadas nas prateleiras utilizáveis.

A prateleira inutilizável serve como um escudo de radiação para a prateleira do topo. Todas as prateleiras são ocas, o que permitem o fluxo do fluido térmico. O fluido térmico pode ser arrefecido para congelar o produto, ou aquecido para fornecer a energia necessária para os processos primário e secundário de secagem.

Um sistema hidráulico pode mover verticalmente as prateleiras para fornecer a força necessária para selar os recipientes, onde os produtos estão colocados, antes de se abrir a porta da câmara. A câmara também contém um manómetro de pressão e está equipado com uma cobertura de isolamento sobre toda a sua superfície, para evitar a transferência de calor para as prateleiras e bandejas durante o processo de secagem [3]. g

As câmaras de secagem são construídas em três tipos de configurações básicas distintas:

- Câmara com forma de sino e placa horizontal na base (liofilizador de bancada).
- Câmara rectangular ou cilíndrica;
- Túnel com secção transversal redonda; [27]



Figura 6 - Câmara com forma de sino e placa horizontal na base (liofilizador de bancada) (adaptado de 27)

A 1ª configuração é muito utilizada em laboratórios, contudo não pode ser esterilizada por vapor. A figura 6, apresentada em cima, mostra uma instalação típica dessa configuração, em que as prateleiras são geralmente aquecidas, mas o arrefecimento

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

também pode ser realizado, para além do uso de um mecanismo de fecho de frascos [27].

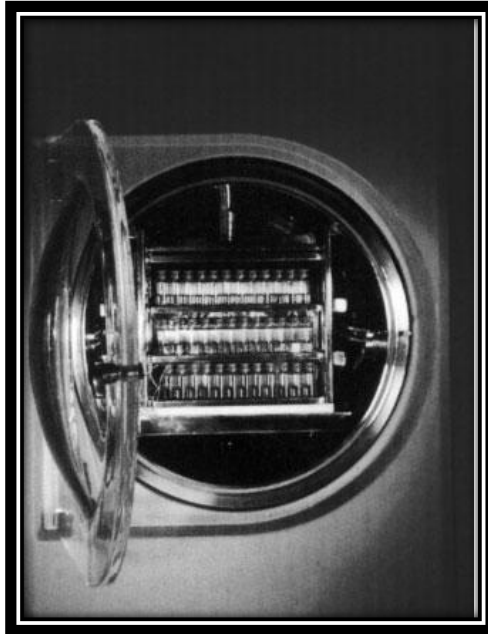


Figura 7 - Câmara de secagem cilíndrica (adaptado de 27)

Na figura 7, é mostrada uma câmara de secagem cilíndrica com uma porta em acrílico e um sistema de fecho hidráulico para os frascos.

Relativamente à figura 8, é mostrada uma câmara de produção rectangular, esterilizável por vapor e projectada para o carregamento e descarregamento automático. As prateleiras são carregadas com frascos através de uma pequena porta, que pode ser fechada por um sistema hidráulico [27].

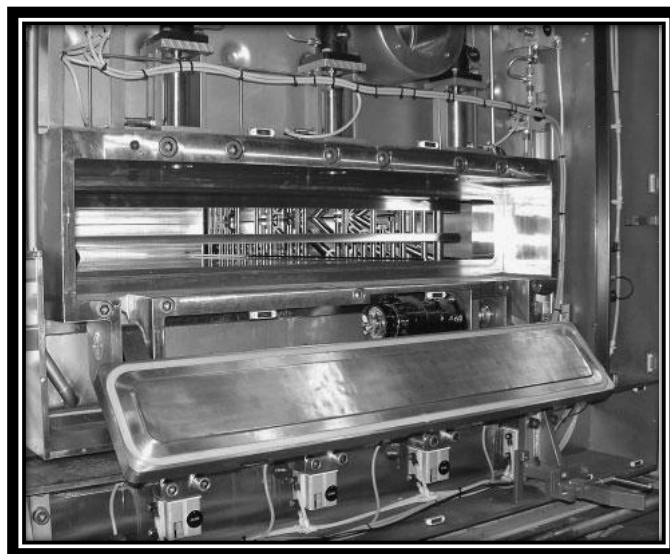


Figura 8 - Câmara de produção rectangular (adaptado de 27)

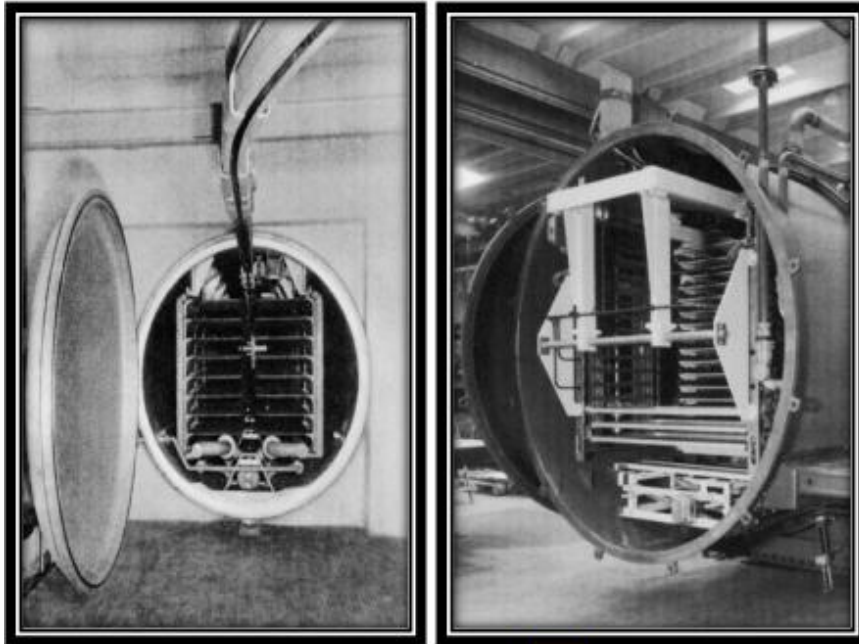


Figura 9 - Túnel com secção transversal redonda (Adaptado de [27])

Os túneis (figura 9) são usados como câmaras de secagem para produtos de luxo, produtos alimentares ou outros produtos preparados em larga escala. Nos dias de hoje são utilizados dois sistemas distintos. No primeiro (A), ilustrado na figura 10, o produto, disposto em bandejas, é colocado em carros pendurados num carril aplicado no topo. Estes são carregados, em intervalos, por meio de um fecho de vácuo num extremidade do túnel e descarregados, de forma semelhante, na outra. Os carros podem ser rapidamente movidos entre as prateleiras aquecidas e depois descarregados com igual rapidez ou, podem ser movidos continuamente ao longo de todo o túnel.

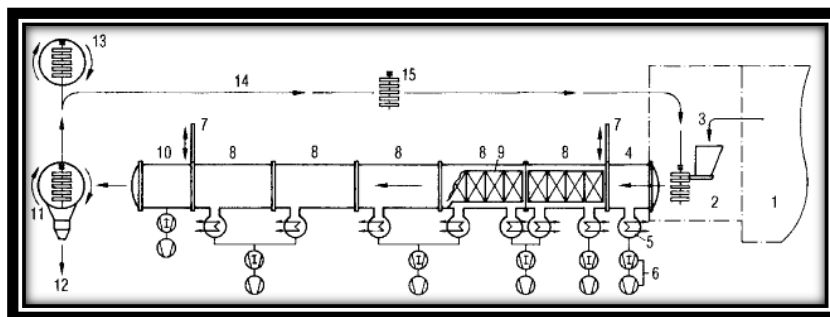


Figura 10 - Método A de carregamento do túnel (adaptado de 27)

1- Sala de preparação; 2 - Zona de carregamento; 3 - Carregamento de bandejas e carrinhos; 4 - Fecho de entrada; 5 - Condensador de gelo; 6 - Bomba de vácuo de dois estágios; 7 - Válvula de guilhotina entre o fecho e o túnel; 8 - Quatro túneis de secagem; 9 - Carrinhos com bandejas; 10 - Fecho de saída; 12 - Descarregamento das bandejas; Saída dos produtos secos; 12 - Lavagem dos carrinhos e bandejas; 14 - Retorno das bandejas; 15 - Carrinhos com bandejas vazias

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

A capacidade total de um túnel pode ser aumentada, à medida que o volume de negócio cresce. Grandes unidades comerciais de café foram construídas desta forma [27].

No outro método (B) – figura 11 - bandejas maiores são empurradas através dos espaços entre as placas de aquecimento. Neste sistema, cada bandeja passa por fecho de entrada (1), num elevador (2), que move-a até um certo nível e empurra-a para a zona de secagem. A última bandeja é empurrada pela bandeja de entrada para o elevador de saída (6) que, por sua vez, encaminha a bandeja para a saída do túnel (7). [28] [27]

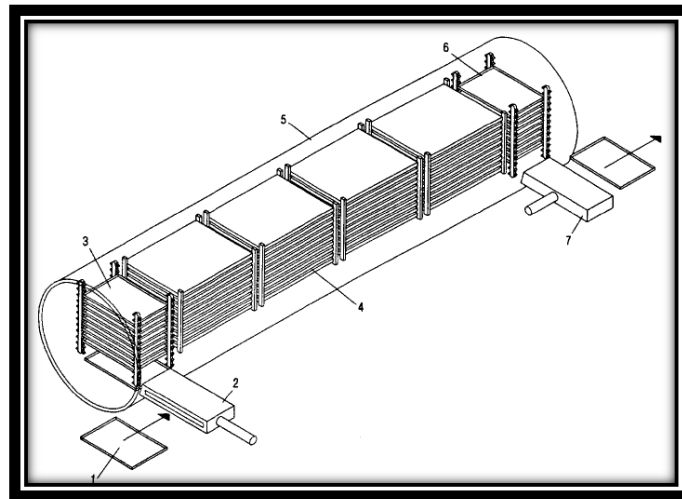


Figura 11 - Método B de carregamento do túnel (adaptado de 27)

1 – Bandeja; 2 – Fecho de entrada; 3 – Elevador para as bandejas; 4 – Zona de aquecimento; 5 – Parede do túnel; 6 – Elevador para as bandejas; 7 – Fecho de saída.

Todas as câmaras devem ser fáceis de limpar, isto é, as superfícies devem ser lisas e todos os cantos arredondados, estanque e sem resistência significativa ao fluxo de vapor de água. Se for possível, garrafas ou frascos são colocados directamente nas prateleiras, quando não há bandejas entre os frascos e prateleiras. O coeficiente de transferência de calor para bandejas com fundos maquinados pode ser duas vezes superior às bandejas com o fundo irregular.

Para produtos de luxo granulados e comida, dois tipos de bandejas (ilustradas na figura 12) são usadas: (a) bandejas grandes, retangulares ou quadradas, com paredes baixas (por exemplo, $400 \times 500 \times 30$ mm) ou (b) bandejas estriadas (por exemplo, $500 \times 160 \times 50$ mm) [27].

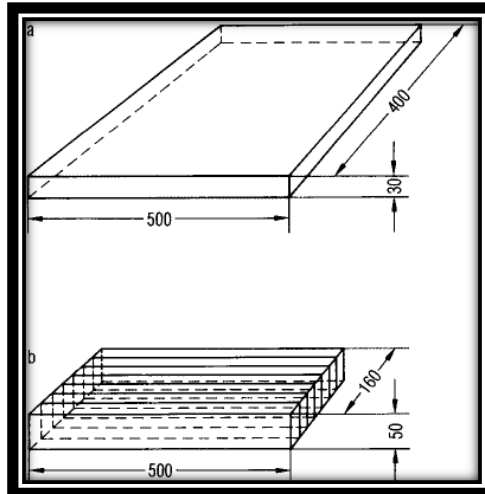


Figura 12 - Tipos de bandeja de liofilização (adaptado de 27)

Bandejas do tipo (a) são empurradas ao longo da instalação, entre as prateleiras aquecidas, sem contacto. As bandejas estriadas (b) são feitas de alumínio extrudido moldado com um fundo maquinado. As distâncias entre as estrias podem ser modificadas para atender às dimensões do granulado, e têm como objectivo facilitar o fluxo de vapor do produto para a câmara.

As bandejas estriadas são mais caras que as lisas, contudo, a taxa de sublimação do gelo das bandejas estriadas é 3,5 vezes maior que a das lisas [27].

Bandejas para aplicações especiais

Quase todos os produtos farmacêuticos devem ser processados sob restritas condições assépticas, e devem ser protegidos de contaminantes externos, através de bandejas especiais (figura 13). Para além disso, alguns produtos são tóxicos, como é o caso de fármacos usados na terapia do cancro, e não devem ser libertados no meio ambiente [27].

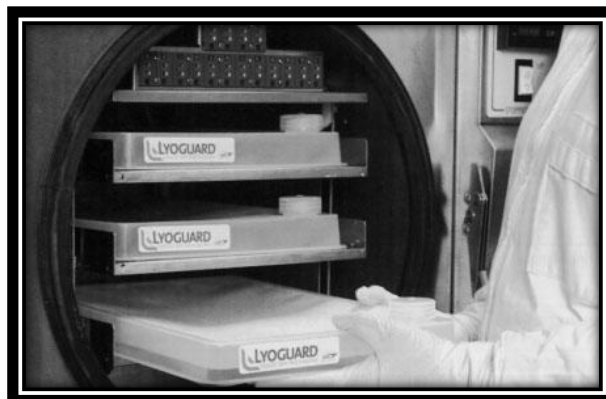


Figura 13 - Bandejas para aplicações especiais (adaptado de 27)

7.2. Liofilizador contínuo

Os anos recentes têm mostrado um crescente interesse em instalações de liofilização que operam com um fluxo contínuo de material através do processo. É rentável, em particular, em indústrias que trabalham com um único produto normalizado. Estes equipamentos dão continuidade no processamento, do princípio ao fim, e condições operacionais constantes que são facilmente controladas. Exigem menos operação manual e menos supervisão.

Um incentivo especial vem da perspectiva de equilibrar a carga imposta ao sistema de condensação do vapor de água e ao sistema de vácuo. Num processo descontínuo, a taxa de transferência do vapor de água a partir de um género alimentar é bastante elevada no início da secagem e torna-se menor à medida que a secagem do produto prossegue. Neste caso, o condensador deve ser projectado para lidar com a máxima remoção de vapor de água que, como já foi referido, acontece no início da secagem [19].

7.3. Multi-estágios

Numa instalação em multi-estágios, a carga dos vários sistemas é muito variada através do ciclo de secagem. O fluxo de massa e as operações de manuseio do produto serão também descontínuos, devido às características do processo.

Em grande medida, esta desvantagem pode ser eliminada ao propor-se uma instalação construída com câmaras programadas para operar em ciclos de secagem sobrepostos.

Cada uma das câmaras é servida pelo mesmo sistema central para o aquecimento, condensação e vácuo. Mas, o processo é controlado individualmente para cada câmara a partir de um painel de controlo separado, que tem por objetivo minimizar o tempo de secagem e maximizar a produção da instalação. Isto torna-a flexível e proporciona a produção simultânea de diferentes produtos. Normalmente usam-se quatro ou mais câmaras [19].

7.4. Vacuum-Spray Freeze Dryers

Desenvolvido especialmente para produtos como extrato de café, infusão de chá e leite. O produto é atomizado no topo de uma torre cilíndrica. O líquido é solidificado em pequenas partículas, onde a refrigeração é feita por uma serpentina que envolve a câmara.

O produto desce ao fundo da torre onde é transportado por um tapete de aço-inox que passa pelos aquecedores, completando o processo de secagem.

A instalação opera num vácuo de aproximadamente 67 Pa e as partículas congeladas, obtidas pela atomização no vácuo, têm um diâmetro de pequenas dimensões [28].

7.5. Sistemas frigoríficos

São de interesse prático para as necessidades da liofilização, as máquinas de compressão construídas com bombas alternativas ou rotativas.

Nas máquinas de compressão utiliza-se o calor de evaporação dum líquido e o calor derivado da expansão do seu vapor. Todo o mecanismo tende para que o fenómeno considerado se possa desenvolver de forma contínua, com elevadas produções de frio, a preços economicamente convenientes. Nas máquinas frigoríficas, o frio é produzido pela evaporação dum líquido e pela expansão dos seus vapores. O conjunto mecânico tem, por fim, regular o desenvolvimento deste fenómeno em relação aos serviços requeridos e, em seguida, recuperar o gás expandido e repô-lo em condições de utilização.

Quanto mais frio está o refrigerante tanto maior será a quantidade de calor absorvido na evaporação e na expansão, isto é, maior será a quantidade de frio produzido. De referir que a congelação pode fazer-se em armários frigoríficos ou dentro do próprio aparelho de liofilização [10].

7.5.1. Compressor

Este equipamento será o responsável pelo movimento do fluido frigorigéneo ao longo do circuito frigorífico, entrando o fluido vindo do evaporador na fase gasosa, onde é comprimido até à pressão alta do circuito (pressão do condensador) e aumentando também a sua temperatura devido não só à própria compressão, mas também devido atrito existente entre os componentes interiores do compressor.

A lubrificação do compressor é feita por chapinhagem do óleo existente no cárter do compressor. Devido a este tipo de lubrificação, uma certa quantidade de óleo é transferida para o circuito de frio, sendo posteriormente necessário removê-lo [29].

7.5.2. Condensador

Este componente é responsável pela troca de calor, entre o fluido frigorífero e o ar (ou água noutros casos), existindo algumas características que se devem ter em conta para o correcto funcionamento do sistema. A superfície necessária deve ser suficientemente grande para permitir a transferência do calor sensível e latente do fluido para o meio receptor. Antigamente, os permutadores não tinham arrefecimento forçado, o que implicava a existência de uma grande superfície de tubo para compensar o seu baixo rendimento. Actualmente é utilizado um ventilador a jusante, para facilitar a passagem do fluido receptor de calor pelas alhetas existentes em torno das tubagens presentes no condensador [29].

7.5.3. Evaporador

Este elemento é responsável pela troca de calor, entre o ar e o fluido frigorífero, provocando a ebulição do mesmo devido a absorção do calor do local a refrigerar. Tal como no caso do condensador, a superfície de permuta e a localização do ventilador são factores importantes que influenciam o funcionamento do ciclo [29].

7.5.4. Válvula de expansão

Tal como qualquer outro dispositivo de controlo de fluxo de refrigerante, a válvula de expansão termostática tem por objectivo regular a entrada do refrigerante (no estado líquido) no evaporador, pela tubagem que faz a ligação deste com o condensador. Assim, proporciona um diferencial de pressão entre os lados de alta e baixa pressão do sistema, ou seja, realiza uma redução da pressão do fluido refrigerante, de modo a que o refrigerante vaporize à pressão baixa desejada no evaporador e que se mantenha no condensador a uma pressão elevada [29].

7.5.5. Separador de óleo

Este componente tem como função efectuar uma reutilização do óleo que entra dentro do circuito quando o fluido frigorífero passa pelo compressor, a presença deste óleo no condensador irá dificultar a troca de calor com o exterior e consequentemente uma redução de rendimento do circuito caso não seja removido. A sua remoção é feita através do separador que recebe o fluido com gotículas de óleo, este, devido ao diferencial de densidade, vai ter tendência para permanecer no fundo do depósito, sendo repostado no cárter quando se nota um nível muito alto no mesmo. A velocidade do fluido

frigorigéneo, no interior das tubagens, tem necessariamente de ser elevada para facilitar o arrastamento de óleo [29].

7.5.6. Óleo do compressor

O seu ponto de congelação deve ser inferior à temperatura mais baixa dada pela instalação. A volatilidade deve ser fraca. O óleo deve estar desidratado, pois a presença de água daria finos cristais de gelo nos evaporadores, o que diminuiria muito sensivelmente o rendimento da instalação. A presença de humidade no óleo, dá origem a alterações, principalmente quando há cobre no circuito [29].

7.5.7. Pressostatos para o controlo

Em qualquer instante, permitem controlar as condições de funcionamento do grupo compressor. De seguida, são descritas as funções dos pressostatos de baixa e alta pressão [10].

- Pressostato de alta pressão

Instalado no lado de alta pressão (do compressor), está ligado à tomada de pressão de descarga. A sua função é proteger o compressor contra a alta pressão de descarga, em situações adversas como, por exemplo: condensador sujo, ventilador do condensador avariado, ambiente muito quente, entre outros [30].

- Pressostato de baixa pressão

Instalado no lado de baixa pressão, está ligado à tomada de pressão da aspiração. A sua função principal é controlar a paragem e arranque do compressor. Outra das suas funções é proteger o compressor contra a baixa pressão de aspiração, como por exemplo, descarga da carga de fluido refrigerante, ajuste incorrecto da válvula de expansão, entre outros [30].

7.5.8. Depósito de líquido

Depois do condensador, localiza-se o depósito de fluido. Este tem como função a armazenagem do fluido condensado, de modo a fornecê-lo ao evaporador sempre que a válvula de expansão o permita. É importante verificar com alguma frequência o nível de fluido existente no depósito [29].

7.5.9. Visor de líquido

Destina-se à detecção de dois problemas associados a qualquer tipo de instalação frigorífica: detecção de humidade no circuito (quando se verifica a presença de humidade o anel incluído no visor, de cor normalmente azul, tende a mudar para uma cor rosada) e vapor no circuito. A existência de vapor no circuito de alta pressão pode verificar-se extremamente destrutivo, visto que no caso de passar uma bolha na válvula de expansão, surge uma elevada expansão dessa devido ao diferencial de pressão, o que pode provocar uma elevada expansão, danificando alguns componentes da instalação [29].

7.5.10. Filtro exsicador

Este componente tem como principal função a remoção de humidade existente no interior das tubagens. Alguns problemas que podem surgir são:

- No caso de haver muita humidade, pode surgir a acumulação de gelo na válvula de expansão e, conseqüentemente, a obstrução da agulha da mesma, não permitindo a passagem de líquido para o evaporador. Devido à grande velocidade do fluido frigorígeno na válvula de expansão, essa humidade é arrastada até aos estrangulamentos e curvas do evaporador, formando depósitos de gelo, diminuindo assim, a transferência de calor no evaporador.

No caso de compressores com um motor eléctrico incorporado, devem-se levar ao máximo as preocupações com a presença de humidade, podendo dar origem a corrosões e a lamas quando há a mistura do óleo com a humidade [29].

A condução dos grupos frigoríficos é, na verdade, simples porquanto se trata, necessariamente, de maquinismo de funcionamento automático. A única intervenção útil, ainda que ocasional, é a vigilância de pressão existente nos circuitos, a montante e a jusante do compressor, com os manómetros de baixa pressão na aspiração e alta pressão na compressão. [10]

7.6. Condensador de vapor de água

Os volumes de vapor de água são grandes demais para serem bombeados por bombas de vácuo mecânicas na faixa de pressão de liofilização: 1 kg de gelo em 0,4 mbar representa um volume de 2.800 m³ ou a 0,04 mbar que representa 25.000 m³.

Nas instalações de hoje, o vapor de água é, portanto, condensado sobre superfícies frias, que consistem em alhetas ou, principalmente, em serpentinas, que apresentam temperaturas com valores entre os -50°C e -60°C, para a secagem primária, e, para a secagem secundária, inferiores a -60°C [27].

Os condensadores arrefecedores de vapor devem cumprir cinco requisitos essenciais:

- A superfície tem que ser grande o suficiente para sublimar todo o vapor;
- A geometria da ligação entre a câmara e o condensador deve ser concebida para o transporte de grandes volumes de vapor de água;
- A diferença de temperatura do refrigerante entre a entrada e saída da serpentina deve ser pequena, para garantir uma condensação uniforme em toda a serpentina. Para grandes superfícies, é necessário o uso de várias serpentinas em paralelo, em que cada qual deve ter um controlo da temperatura.
- O fluxo de vapor de água deve-se desviar o mínimo possível antes da primeira superfície condensadora. A superfície tem que assegurar que o vapor de água é completamente congelado. Isso só pode ser alcançado se o vapor passar sobre várias superfícies em série [27].

A principal função da superfície fria é eliminar o vapor de água, proveniente da câmara de secagem antes de entrar no sistema de bombeamento de vácuo. Para que as alhetas da superfície fria sejam efectivas, a sua temperatura de operação deve ser, no mínimo, 20° C inferior à temperatura do produto, durante o processo primário de secagem. Ao contrário das prateleiras, que são refrigeradas por um fluido térmico, as superfícies do condensador são, geralmente, refrigeradas pela expansão directa de um fluido frigorígeno. Usa-se na maior dos casos, um condensador externo. No caso dos condensadores internos, as suas superfícies estão alojadas na câmara de secagem [3]. Por fim, para retirar o gelo que se acumulou em torno das superfícies do condensador, é injectado na câmara vapor a uma temperatura muito elevada (cerca de 95°C). A água, já no estado líquido, é drenada para que depois se realize um novo ciclo de secagem.

7.7. Fluido frigorígeno

O refrigerante para o condensador de vapor é, normalmente, injectado directamente nas serpentes e alhetas, enquanto as prateleiras são na sua maioria arrefecidas e aquecidas por um fluido térmico. Dessa forma, as temperaturas do condensador são normalmente mais baixas do que das prateleiras [27].

Nas fases da congelação do produto e condensação do vapor de água (proveniente do produto congelado), este é o componente do circuito que vai permitir o transporte do calor entre o evaporador e o condensador, que alternadamente vaporiza ou condensa quando absorve ou cede calor, respectivamente [31].

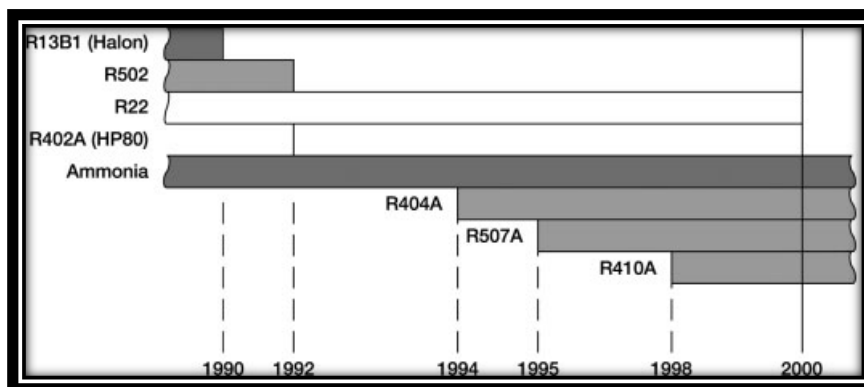


Figura 14 - Gama de aplicações de refrigerantes, tendo em conta as normas legais (adaptado de 27)

Devido aos problemas causados pela destruição da camada do ozono e do efeito de estufa e de acordo com o Protocolo de Montreal de 1986 - um acordo internacional – os refrigerantes que contribuem para a destruição da camada do ozono não podem ser mais produzidos. Os refrigerantes mais afectados pelo problema do CFC / ozono são os que contêm cloro, flúor e hidrocarbonetos. As baixas temperaturas exigidas nos processos de liofilização costumavam ser alcançadas com refrigerantes que continham CFCs [27].

7.8. Sistema de vácuo

O sistema de bombeamento de vácuo, em conjunto com o sistema de condensação, fornece as pressões necessárias para guiar o primeiro e segundo processo de secagem. Reduz a pressão do ar na câmara e condensador para a pressão parcial do ar necessária (entre 0,01 e 0.1mbar) [2 e 6].

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Apesar de se recorrem a bombas mecânicas de vácuo lubrificadas a óleo, estão disponíveis sistemas que não precisam de lubrificação a óleo. A bomba de vácuo comprime os gases não-condensáveis, que passam pela câmara de condensação, e liberta-os directamente para a atmosfera.

Normalmente, as bombas usadas são de alta pressão; mas ainda que perfeitas, e mesmo trabalhando com rendimentos teóricos de 100%, nunca é possível alcançar o vácuo absoluto. Os valores do vácuo classificam-se em baixo vácuo, médio vácuo, alto vácuo e altíssimo vácuo, e pode-se, desde já, indicar que, em função desse vácuo, assim varia a temperatura da evaporação da água.

No baixo vácuo varia entre 100°C e $-17,3^{\circ}\text{C}$; no médio vácuo varia entre $-17,3^{\circ}$ e $-58,5$; no alto vácuo varia entre $-58,5^{\circ}\text{C}$ e -100°C ; no altíssimo vácuo $<100^{\circ}\text{C}$ [10].

É mais eficiente utilizar uma bomba de apoio combinada com um ou dois ventiladores Roots. Tal sistema de bombeamento é preferível para a liofilização em comparação com uma grande bomba de dois estágios sozinha. O conhecido super-compressor Roots (figura 15) tem a vantagem de absorver grande quantidade de vapor de água, além de não conter óleo e ser praticamente insensível à passagem de partículas sólidas de pequenas dimensões. [10 e 27]

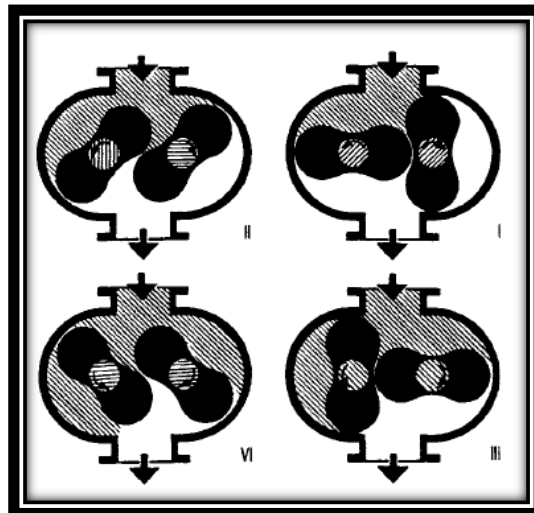


Figura 15 - Princípio de funcionamento de uma bomba Roots de um estágio (adaptado de 27)

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

De seguida, são apresentadas duas imagens, sendo a primeira representativa dos vários componentes do Liofilizador, e a outra do tempo de operação do mesmo.

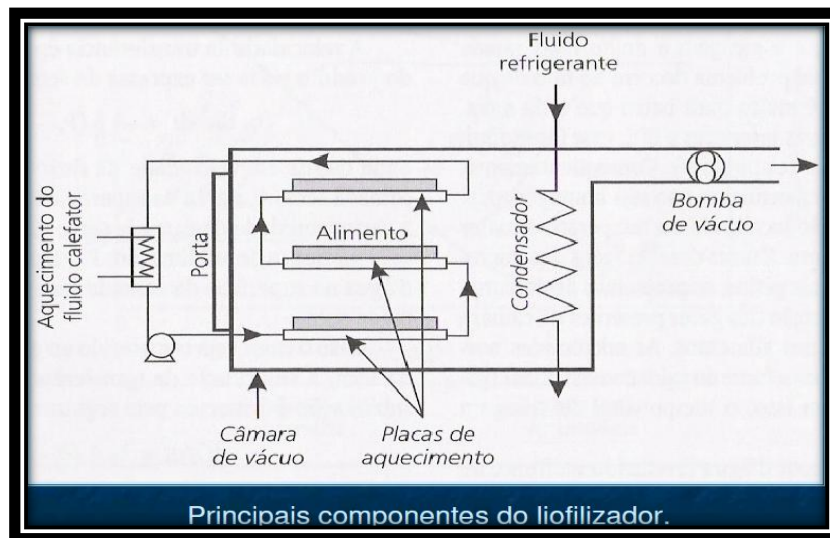


Figura 16 - Principais componentes do liofilizador (adaptado de 2)

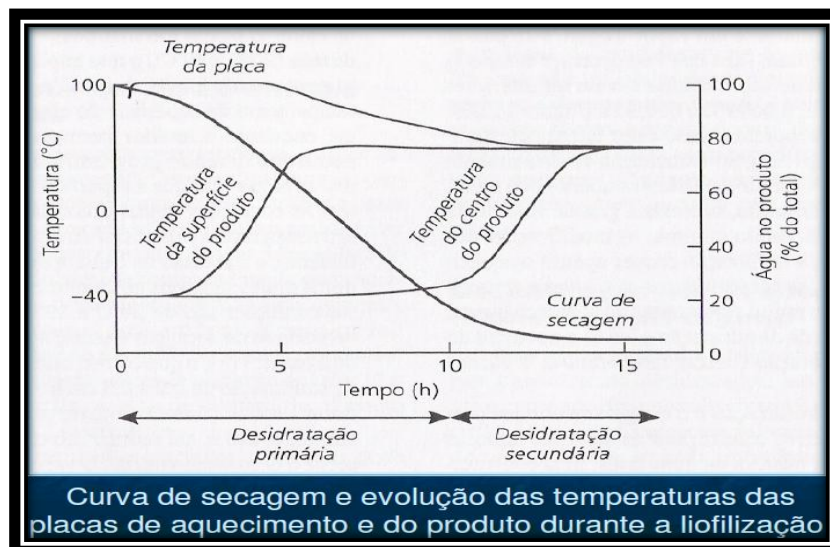


Figura 17 - Curva de secagem e evolução das temperaturas das placas de aquecimento e do produto durante a liofilização (adaptado de 2)

8. Instalação frigorífica

8.1. R-404A

Os fabricantes de equipamentos de frio têm usado, nos últimos tempos, este refrigerante em detrimento do R502. O R-404A é uma mistura de 3 gases refrigerantes liquefeitos do tipo HFC (Hidrofluorcarbono) que não causa destruição da camada de Ozono. Tem como características principais, a sua baixa toxicidade e não inflamabilidade em presença de ar atmosférico. Este é especialmente indicado para aplicações de baixa temperatura e de compressão simples para refrigeração comercial, industrial e transporte. Com o R404A há a possibilidade de, não só usarem-se compressores de pequeno deslocamento, como também de prolongar a vida destes devido à sua temperatura de descarga baixa. Por isto, pode-se afirmar que a sua aplicação é correcta em qualquer tipo de sistema com temperatura de evaporação de -45°C até $+15^{\circ}\text{C}$. [32]

Massa molar:	97,6 g/mol	
Ponto de ebulição a 1013 mbar:	Temperatura:	226,75K ($-46,4^{\circ}\text{C}$)
	Calor latente de ebulição:	200 kJ/kg
Ponto crítico:	Temperatura:	345,15 K ($72,0^{\circ}\text{C}$)
	Pressão:	37,2 bar
	Densidade:	0,484 kg/dm ³
Fase Líquida a 25 °C:	Densidade:	1,04 kg/dm ³
Vapor Saturado:	Densidade:	5,41 kg/m ³
Calor específico a 25 °C:	Estado Líquido:	1,64 kJ/(kg.K)
	Estado Gasoso a 1013 mbar:	0,88 kJ/(kg.K)
Limite de inflamabilidade:	No ar, temperatura ambiente :	Nenhum
ODP (Potencial destruição de Ozono):	0	

Figura 18 - Características do fluido frigorígeno R-404A (adaptado de 32)

8.2. R-134a

Com a proibição da utilização do fluido R-12, surgiram novos frigorígenos. Entre eles destaca-se o R134a, que é considerado o substituto do R-12, já que apresenta características químicas semelhantes com o segundo. Em geral, este refrigerante é menos eficiente, em termos de desempenho, que o R-12 e requer componentes de dimensão superior. É um gás refrigerante do tipo HFC (Hidrofluorcarbono) que não causa destruição da camada de Ozono. Tem baixa toxicidade, não é inflamável na presença de ar atmosférico em temperatura inferior a 100°C e à pressão atmosférica.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Não é corrosivo, é compatível com a maioria dos materiais. Os seus vapores têm um odor levemente adocicado [32].

Símbolo químico:	CF ₃ CH ₂ F	
Massa molar:	102,0 g/mol	
Ponto de ebulição a 1013 mbar:	Temperatura:	247,05 K (-26,1 °C)
	Calor latente de ebulição:	215,9 kJ/kg
Ponto crítico:	Temperatura:	374,15 K (101 °C)
	Pressão:	40,7 bar
	Densidade:	0,512 kg/dm ³
Fase Líquida a 25°C:	Densidade:	1,206 kg/dm ³
Vapor Saturado:	Densidade:	5,28 kg/m ³
Calor específico a 25°C:	Estado Líquido:	1,46 kJ/(kg.K)
	Estado Gasoso a 1013 mbar:	0,858 kJ/(kg.K)
Limite de inflamabilidade:	No ar, temperatura ambiente :	Nenhum
ODP (Potencial destruição de Ozono):		0
Temperatura de auto-ignição:	No ar	770 °C

Figura 19 - Características do fluido refrigerante R-134a (adaptado de 32)

8.3. Isolamento térmico

O calor é uma forma de energia que é transferida entre dois sistemas devido, exclusivamente a uma diferença de temperaturas. O sentido em que se dá a transferência de energia é sempre do sistema que está a temperatura mais alta para o sistema que está a menor temperatura [20]. Neste caso, os dois sistemas são: o ar interior da instalação frigorífica e o ar ambiente exterior. Para limitar (retardar) a transferência dessa energia (fluxo de calor), é necessário isolar a região a refrigerar com um isolamento eficaz. Quanto melhor for esse isolamento, menor será a quantidade de energia a extrair para se obter a refrigeração necessária [31].

As quatro fontes principais de calor que se devem ter em conta para o cálculo da carga térmica de uma câmara frigorífica, são:

- Transferência de calor proveniente do ambiente exterior através das paredes, piso e tecto;
- Passagem de calor para o interior da câmara pelas aberturas de portas;
- Calor (sensível e latente) libertado pelo produto;
- Outras fontes de calor como motores, pessoas, iluminação, empilhadoras, etc [33].

8.3.1. Paredes e Tecto

Antigamente, os isolantes térmicos do tipo alveolar mais utilizados eram: o aglomerado de cortiça, o poliestireno moldado por expansão ou por extrusão, o poliuretano, e o policloreto de vinilo. Também, as lãs de vidro ou minerais eram utilizadas [31]. Nos dias que correm, a aplicação de fibra de vidro e da cortiça caiu em desuso, sendo o poliuretano o material alveolar mais aplicado, já que apresenta diversas características técnicas importantes num bom isolante. São elas:

- Condutividade térmica muito baixa;
- Resistência à compressão elevada, apesar do seu peso específico baixo;
- Impermeabilidade óptima;
- Inodoro;
- Em caso de incêndio, o isolante protege de forma eficaz, visto ter uma boa resistência à propagação de chama [34].

Na escolha do material isolante devem-se ter em conta diversos factores, para a sua posterior aplicação. Podem-se citar alguns, tais como o económico, resistência a microrganismos e a insectos, riscos de incêndios, poeiras, vapores indesejáveis, partículas nocivas para a pele dos trabalhadores, retenção de odores, resistência à decomposição e resistência à absorção de água.

Há dois métodos de isolamento, que se diferenciam no tipo e na maneira que são instalados:

- Isolamento colocado no local;
- Isolamento pré-fabricado e integrado [34].

As paredes externas e internas, são constituídas por painéis com espumas rígidas do isolante poliuretano, com peso específico mínimo de 45 kg/m^3 e espessuras de 100 mm a 150 mm para câmaras de refrigerados e congelados, respectivamente. A espuma rígida é prensada entre duas placas metálicas, lisas, lacadas e tratadas contra a corrosão (galvanizadas), constituindo os painéis “sandwich”. Nos dias de hoje, o único método usado é do isolamento pré-fabricado e integrado. Estes têm as seguintes funções:

- Barreira de vapor;
- Isolamento térmico;

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

- Protecção mecânica de ambas as faces do painel.

Qualquer espaço refrigerado torna-se uma fonte de vapor em virtude da diferença de pressões de vapor entre o ar externo e o ar interno da câmara. Assim, não se projecta uma câmara frigorífica sem uma barreira de vapor. A humidade que penetrar no isolamento irá diminuir a eficiência térmica, aumentando a perda de energia, e pode danificar o isolamento. Sem uma eficiente barreira de vapor, a vida útil da câmara é reduzida [34].

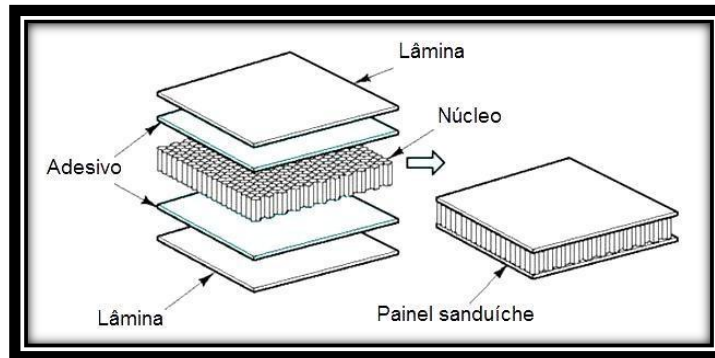


Figura 20 - Constituição de um painel sanduíche (adaptado de 35)

Assim, não há a necessidade de impermeabilizar as paredes, antes de se colocar o isolamento, visto que estes painéis já têm essa função. O sistema de união entre painéis obtém-se por união macho-fêmea mediante um encaixe. Dependendo do uso a que está destinado o local, ou quando existe algum requisito particular, é possível aplicar uma junta na obra.

Para assegurar a estanqueidade do vapor de água, recorre-se a uma junta de silicone, entre os painéis, como se pode verificar pela figura 21. Se o isolamento está dentro da estrutura, o isolamento do tecto é suspenso a partir das asnas da cobertura [34]. O tipo de isolamento usado no tecto é o mesmo utilizado nas paredes. A união entre os painéis do tecto é idêntica à da dos painéis [36].

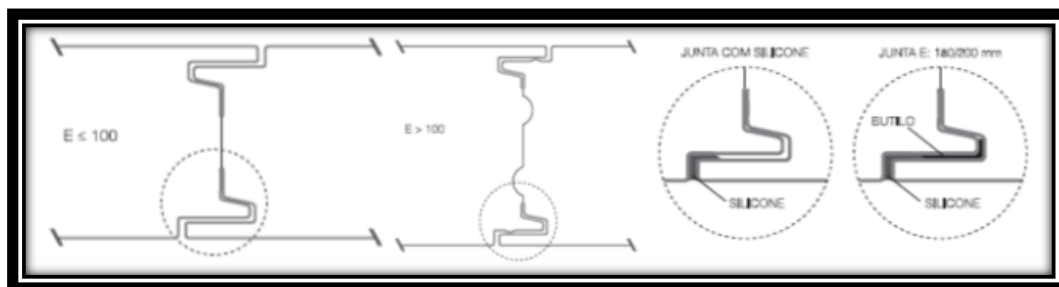


Figura 21 - União entre o poliuretano (adaptado de 36)

Antigamente, quando o isolamento era colocado no próprio local, era usado uma camada de impermeabilizante que constituía uma barreira à penetração de vapor de água existente no ar. Sem esta camada de impermeabilizante, o vapor ao atravessar a parede condensava nos poros do isolante e danificava-o, reduzindo fortemente a sua capacidade de isolamento. No caso de câmaras de conservação de congelados a formação de cristais de gelo junto à face interior do painel conduzia à sua destruição [31].

As paredes interiores de toda a instalação, em especial as câmaras de congelação, devem conter rodapés e muretes, de modo a proporcionar, entre outras:

- Protecção higiénica de painéis de parede;
- Protecção contra a infiltração de água nos painéis de parede;
- A não existência de espaços e cavidades que podem conter bactérias;
- Protecção mecânica contra meios de movimentação ligeiros (carrinhos, porta-paletes, ...) [37].

8.3.2. Piso

Devido à existência de uma câmara de congelação nesta instalação, há a necessidade de tomar precauções para evitar o congelamento do solo.

Os métodos mais comuns de protecção do solo contra a congelação da água existente nele são:

- Canalização de ar (natural ou forçada) – sistema mais usual;
- Resistência eléctrica;
- Tubos com água glicolada. (site da foto do piso) [34].

8.3.2.1. Canalização do ar

Neste método, obriga-se a que o ar circule por baixo do isolamento do solo conseguindo-se uma temperatura superior a 0°C, evitando-se a congelação do solo e, conseqüentemente, o seu dano. Este arejamento será de abobadilha, tijolo ou tubo. Em qualquer dos casos, estes desembocarão em dois colectores ou caleiras que, por sua vez, terão saída e entrada de ar por meio de chaminés. Um dos colectores terá ligação à rede geral para que a drenagem de água que se possa condensar nas paredes do colector. Outra forma de realizar este arejamento é instalar ventiladores (evitando-se o uso de chaminés) para forçar a circulação de ar e em zonas muito frias juntam-se resistências

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

eléctricas controladas por termóstato, que asseguram que a temperatura do ar nunca seja inferior a 0°C.

A constituição do pavimento (figura 22) com canalização do ar é a seguinte:

1. Abobadilha oca, ladrilho ou tijolo, tubos, etc ...;
2. Betão armado;
3. Barreira de vapor;
4. Placas de isolamento em aglomerado negro de cortiça entrepostas.
5. Impermeabilizante;
6. Betão armado;
7. Junta de dilatação
8. Chaminé
9. Colector

O piso (antiderrapante) tem que ter um acabamento superficial liso, impermeável e de fácil higienização e com um pequeno declive de forma a simplificar a limpeza da câmara (1,0% em direção às canaletas), quando se torna necessário, e para escoar a água recolhida no tabuleiro colector do evaporador [34].

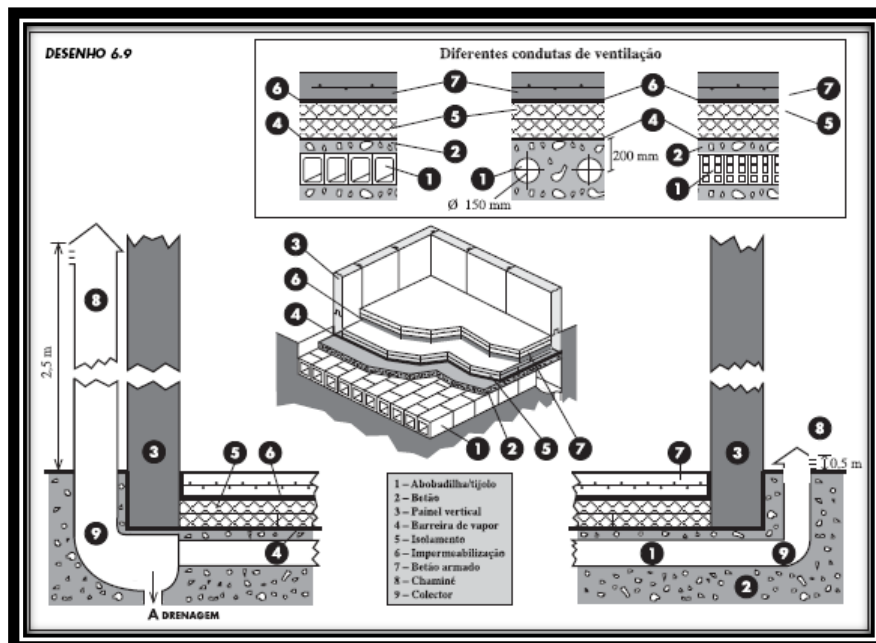


Figura 22 - Pavimento constituinte da câmara de congelados e túnel de túnel de congelamento (adaptado de 36)

8.3.3. Portas

É um elemento essencial nas câmaras frigoríficas, especialmente nas de congelação. Aquando da abertura destas, há sempre passagem de ar exterior para o interior da câmara, ou seja, há sempre transferência de energia (calor) para o seu interior. Para o cálculo da carga térmica, terá que se ter em conta essa penetração de ar, já que representa uma carga térmica adicional [33]. A infiltração de ar exterior (que contém vapor de água, além de outros constituintes), em demasia, acarreta um bloqueio dos evaporadores, devido a formação de gelo em seu redor, o que reduz a capacidade do sistema de refrigeração, e conseqüentemente, aumenta o consumo de energia eléctrica. Portanto, há a necessidade de instalar portas que possa garantir uma elevada estanqueidade do local [34].

Nesta instalação utilizam-se portas deslizantes manuais com 100 ou 150 mm de isolamento poliuretano (2m X 2,40m), forradas a chapa galvanizada, que deslizam sobre uns carris, que se encontram na parte superior das mesmas. A estanqueidade entre o aro e a porta é assegurada por borracha dupla em todo o seu perímetro, incluindo a face que arrasta no pavimento [38]. Em complemento, devido à formação de gelo na zona de contacto da vedação, usam-se resistências eléctricas, de forma a eliminar o gelo, e usam-se cortinas de ar (lamelas de plástico), para minimizar a entrada de calor. Na entrada e saída da instalação, são instaladas portas do tipo seccional industrial ajustáveis ao tamanho do portão traseiro dos camiões.

8.3.4. Iluminação

A iluminação das câmaras frigoríficas deve resistir à humidade, ser estanque à água e deve estar protegida por armadura. A iluminação normal deverá oscilar entre 60 e 100 lux e podemos considerar uma carga térmica de cerca de 6 W/m². A iluminação tem que ser instalada em todas as secções desta instalação e são do tipo fluorescente (a carga térmica libertada é o dobro para o caso das incandescentes) [39].

9. Layout da instalação

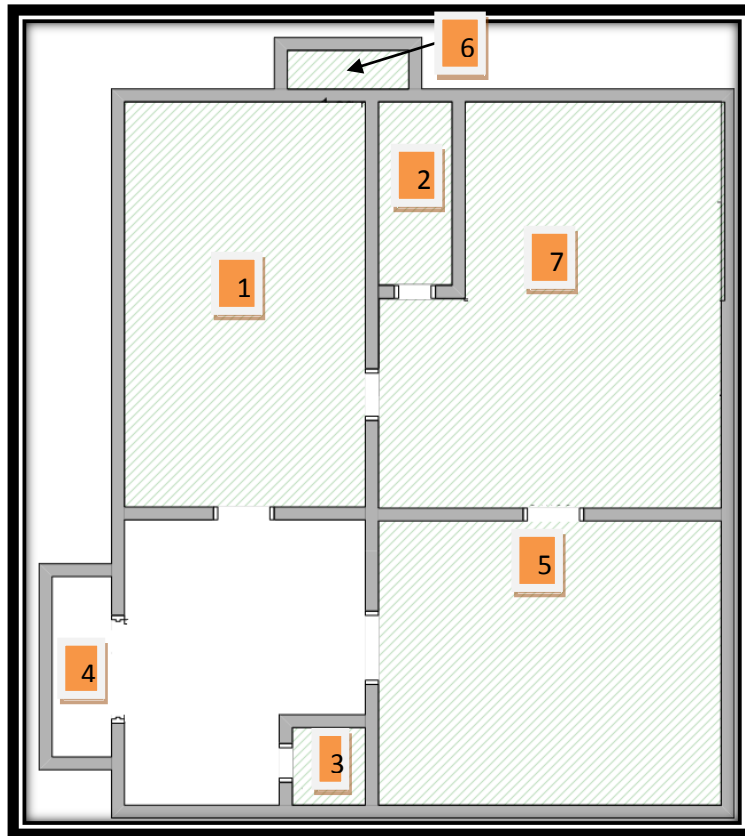


Figura 23 - Planta da instalação frigorífica

Esta instalação é constituída por diversos “espaços” com condições próprias. São eles:

- Uma câmara de conservação de congelados (1);
- Uma sala para preparação da matéria-prima (7);
- Uma sala de embalagem (5);
- Um túnel de congelação (2);
- Um cais de recepção/expedição (4);
- Uma sala de máquinas (6);
- Uma câmara de conservação de refrigerados (3).

Os camarões (matéria prima) chegam à instalação, pelo cais de recepção, provenientes dos “barcos-fábrica”, onde são previamente congelados ou refrigerados. Durante a recepção dos camarões, através do cais de recepção (que tem uma porta com as dimensões ajustadas ao tamanho do portão traseiro do camião), são feitas análises químicas e sensoriais, como também a verificação da temperatura para garantir a recepção de matéria-prima adequada ao processo. Os camarões são então lavados e

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

desbacterizados. Em seguida, os camarões são seleccionados por tamanho, classificados e armazenados na câmara de conservação de congelados, que se encontra a uma temperatura de -25°C , ou na câmara de conservação de refrigerados, que se encontra a uma temperatura de 1°C , dependendo do estado de conservação.

Após permanecer na câmara de congelados ou refrigerados, o camarão segue para as bancadas de processamento onde serão descabeçados, formando os diversos tipos de camarão descascado (ou *filé*), sendo os congelados depois encaminhados para o túnel de congelação (os refrigerados seguem directamente para a sala de embalagem, sem passarem pelo túnel). As máquinas para filetagem, devido à grande variedade de camarão (formas e tamanhos), devem dispor de utensílios ajustáveis, os quais são regulados por sistemas mecânicos automáticos. Estas máquinas são instaladas nesta sala refrigerada e climatizada a $+15^{\circ}\text{C}$. Após a congelação no túnel de ar forçado à temperatura de -35°C , o camarão é embalado em linha de processamento automático, sendo as embalagens encaminhadas para a câmara de conservação de congelados (com uma temperatura de -25°C). No caso dos camarões refrigerados, estes vão para a câmara de conservação de refrigerados. Seguidamente, após um período de armazenagem, são dirigidas para o cais de expedição. Por ser uma instalação de pequenas dimensões, utiliza-se apenas um cais, para a recepção e expedição do produto em causa.

Congelar alimentos significa baixar a temperatura abaixo do ponto de congelação, de maneira a que a maior parte da água contida no alimento se transforme em gelo. O ponto de eutético depende da concentração de diferentes solutos nos líquidos dos tecidos. A congelação é utilizada para conservar melhor o pescado, aumentando a sua vida útil. Desta forma, está pronta a comercialização e distribuição destes produtos. A qualidade e sabor são os factores de maior importância na apresentação do produto, que deverá contar com um bom sistema de distribuição e atendimento ao consumidor. Quanto menor for a temperatura de uma câmara, menor é a possibilidade de haver deterioração dos produtos, pelo que maior será o tempo de conservação.

Nesta instalação existe ainda uma sala de máquinas que compreende os compressores, depósitos de líquido e separadores de óleo. É o “coração” da instalação e está instalada no exterior.

9.1. Informações sobre a instalação

Local da Instalação:

- Sines
- Temperatura exterior – 34°C
- HR exterior – 23%

Uma câmara de conservação de congelados:

- Temperatura: -25°C
- Dimensões: 5 x 10 x 4 m
- Temperatura de entrada do produto: - 12°C
- Humidade Relativa: 90%

Uma câmara de conservação de refrigerados:

- Temperatura: 1°C
- Dimensões: 4 x 3 x 3,5 m
- Temperatura de entrada do produto: 10°C
- Humidade Relativa: 90%

Túnel de congelação

- Temperatura: -35°C
- Dimensões: 3 x 2 x 2,5 m
- Temperatura de entrada do produto: 5°C
- Humidade Relativa: 90%
- Entrada por ciclo: 500 kg
- Duração do ciclo: 3h

4) Zona de Preparação

5) Zona de embalamento

6) Sala de Máquinas

9.2. Esquemas unifilares da instalação:

Nesta instalação existem três circuitos distintos, em que um alimenta a “câmara de conservação de congelados”, o outro “túnel de congelação” e o terceiro a “câmara de conservação de refrigerados”

9.2.1. Câmara de conservação de congelados

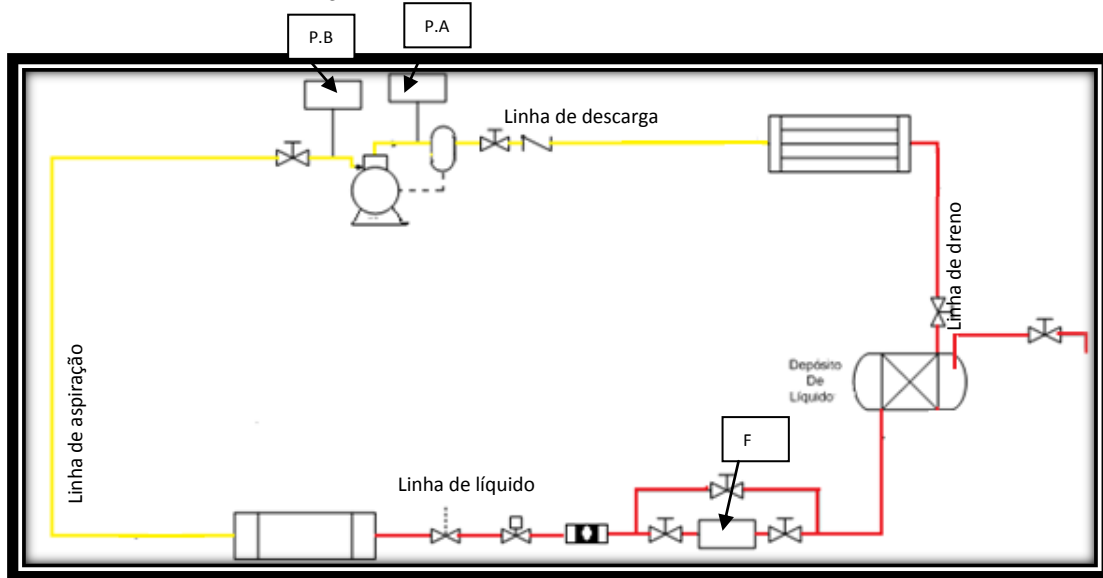


Figura 24 - Esquema unifilar do circuito do “câmara de conservação de congelados”

- Refrigerante no estado gasoso
- Refrigerante no estado líquido

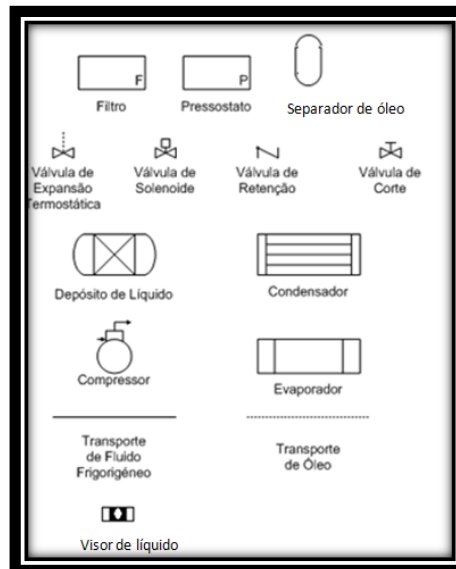


Figura 25 - Equipamentos do esquema frigorífico

9.2.2. Túnel de congelação

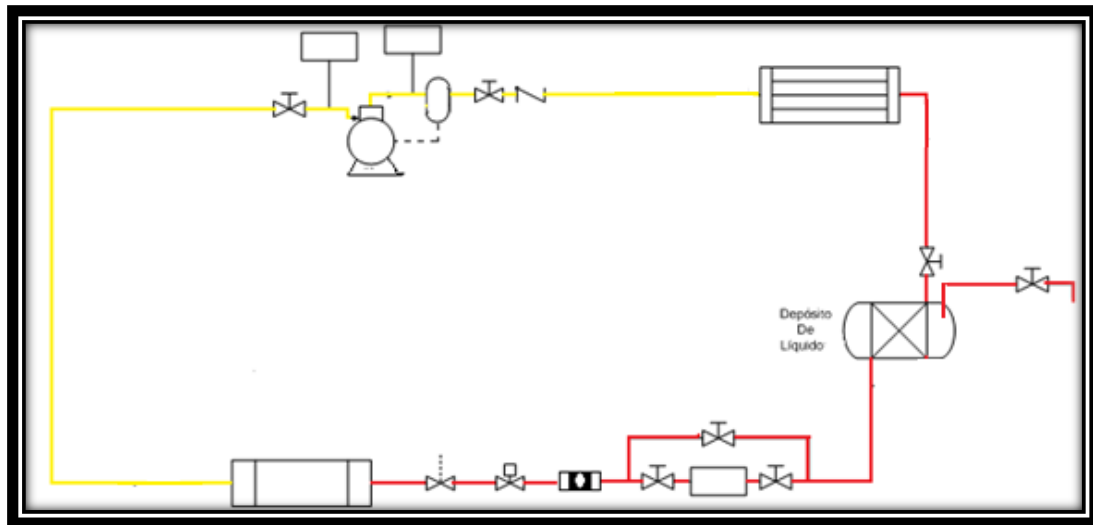


Figura 26 - Esquema unifilar do circuito do "túnel de congelação"

Nota: O esquema unifilar do túnel de congelação é igual ao da câmara de conservação de congelados. A única diferença entre os dois sistemas reside no facto do túnel de congelação necessitar de um compressor de dois estágios.

9.2.3. Câmara de conservação de congelados

No caso da refrigeração, usa-se o fluido frigorigéneo R-134a, ao invés do R404A utilizado na câmara de conservação de congelados e túnel, pois este último é mais recomendado para uso em aplicações de baixa temperatura. Contudo, os componentes que constituem este circuito são iguais aos restantes dois sistemas. Devido às dimensões reduzidas desta câmara, a potência para a refrigerar é bastante baixa, levando a que, na altura da escolha de material para constituir o circuito, se opte por um grupo compressor.

10. Cálculo das cargas térmicas

10.1. Procedimentos de cálculo

De forma a simplificar a compreensão dos métodos utilizados para calcular as cargas térmicas, é apresentado, em baixo, um conjunto de esquemas que representam os sucessivos procedimentos para o cálculo das cargas:

10.1.1. Cálculo das cargas totais

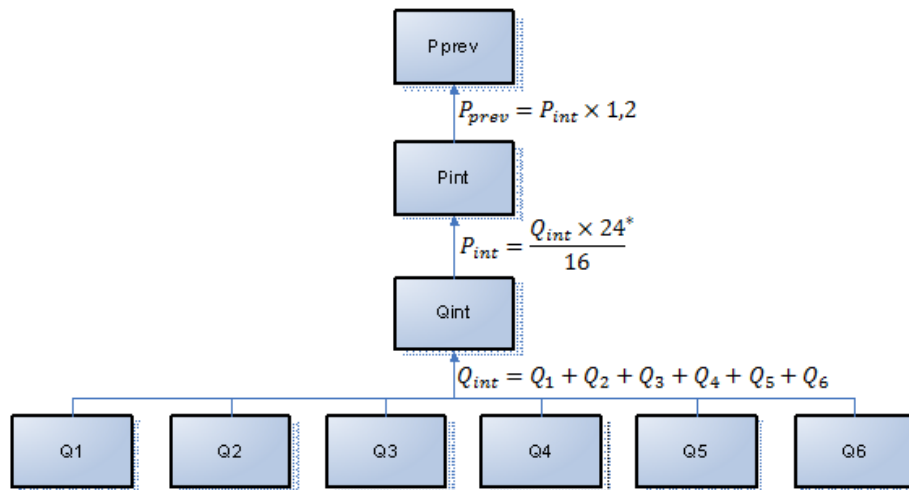


Figura 27 - Cálculo das cargas totais (fluxograma 1) (adaptado de 39)

Notas:

- Com todos estes dados, ou seja, com o valor de todos os “Qs”, temos condições de determinar a carga térmica intermédia que os evaporadores deverão eliminar para manter as condições de projecto [39]. É dada pela seguinte forma:

$$Q_{int} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$$

- Os compressores deverão funcionar 16 horas para as câmaras de congelados e 18 a 20 horas para as câmaras de refrigerados

Para uma câmara de congelados teríamos:

$$P_{int} = \frac{Q_{int} \times 24}{16}$$

Para uma câmara de refrigerados teríamos:

$$P_{int} = \frac{Q_{int} \times 24}{18}$$

- A selecção dos evaporadores realiza-se a partir do cálculo da potência frigorífica previsional, acrescentando 20% à potência frigorífica intermediária. Com esta percentagem está-se a ter em conta a carga adicional introduzida pelos motores ventiladores e resistência dos sistemas de descongelação dos próprios evaporadores [39].

$$P_{previsonal} = 1,2 \times P_{int}$$

10.1.2. Cargas térmicas de paredes tecto e chão – Q1:

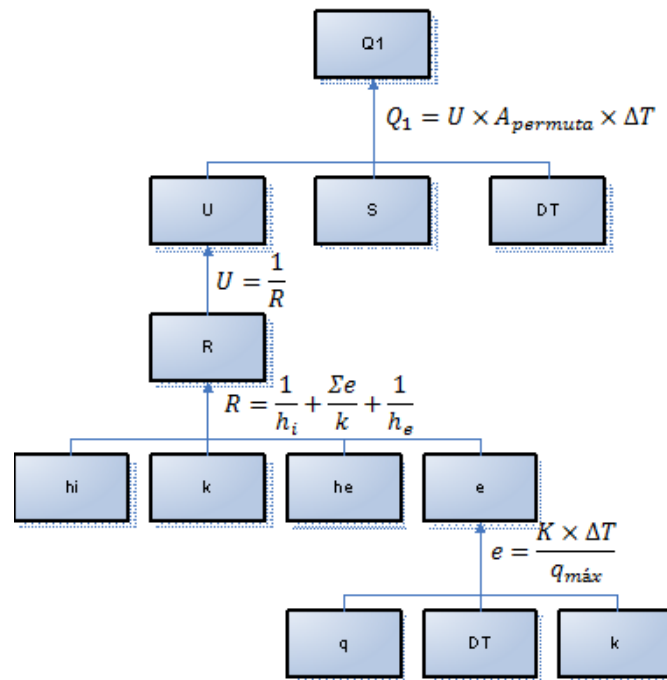


Figura 28 - Cálculo de Q1 (fluxograma 2) (adaptado de 39)

Q_1 - Carga térmica através das paredes, tecto e pavimento (W);

U - Coeficiente de transmissão de calor da parede considerada ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

$A_{permuta}$ – Superfície da parede considerada (m^2);

ΔT - Diferença de temperatura entre as faces da parede considerada ($^\circ C$);

h_i - Coeficiente de convecção na superfície interna ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

h_e - Coeficiente de convecção da superfície externa ($W/m^2 \cdot ^\circ C$);

e - Espessura da parede (m);

k - Coeficiente de condutibilidade térmica da parede ($W/m \cdot ^\circ C$);

$\frac{1}{R_i}$ - Resistência térmica de convecção na superfície interna ($m^2 \cdot ^\circ C/W$);

$\frac{\sum e}{k}$ - Somatório das resistências térmicas de condução das diferentes camadas de materiais que constituem a parede ($m^2 \cdot ^\circ C/W$), onde e representa a espessura da parede (m) e k representa a condutividade térmica da parede ($W/m \cdot ^\circ C$);

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

$\frac{1}{h_e}$ - Resistência térmica de convecção na superfície externa ($m^2 \cdot ^\circ C/W$).

Nota: Para o caso do chão, não irá entrar para o cálculo o coeficiente de convecção na superfície externa (h_e).

Para o caso das espessuras de parede, é importante mencionar que se generalizou a espessura máxima calculada para cada divisão. Posteriormente, essa espessura é comparada com as normalizadas no mercado, sendo por segurança escolhida aquela que for imediatamente superior.

Espessuras normalizadas: (mm)
50
80
100
120
150
175
200
250

Quadro 1 - Espessuras normalizadas (adaptado de 34)

10.1.3. Carga térmica por renovação de ar – Q2:

A renovação de ar consiste na substituição de uma parte do ar da câmara frigorífica por ar exterior que deverá ser arrefecido desde a temperatura exterior até à temperatura interior.

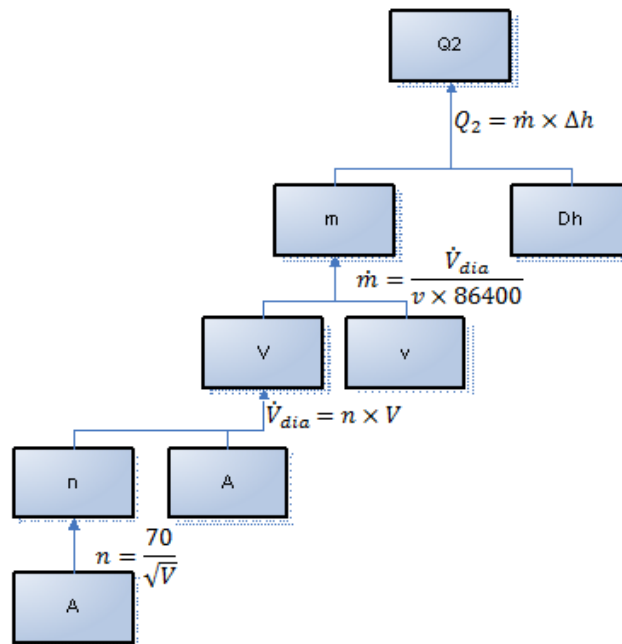


Figura 29 - Cálculo de Q2 (fluxograma 3) (adaptado de 39)

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Q_2 - Carga térmica devido à renovação de ar (W)

\dot{m} - Caudal mássico de ar exterior que entra na câmara (kg/s)

Δh - Diferença de entalpias entre o ar exterior e ar interior (J/kg)

\dot{V}_{dia} - Caudal volumétrico diário de ar exterior (m³/dia) – Representado no esquema pela letra V

v - Volume específico do ar exterior (m³/kg)

n - Taxa de renovação de ar exterior

V - Volume interior da câmara frigorífica (m³) - Representado no esquema pela letra A

10.1.4. Carga térmica devido à abertura de portas – Q3:

Para câmaras frigoríficas de pequenas dimensões é suficiente o cálculo da renovação de ar. Contudo, para câmaras de grandes dimensões, por vezes com várias portas, é necessário ser-se mais rigorosos.

Supõe-se que nessas câmaras só raramente haverá abertura de várias portas em simultâneo. Assim, o cálculo será realizado apenas para uma porta.

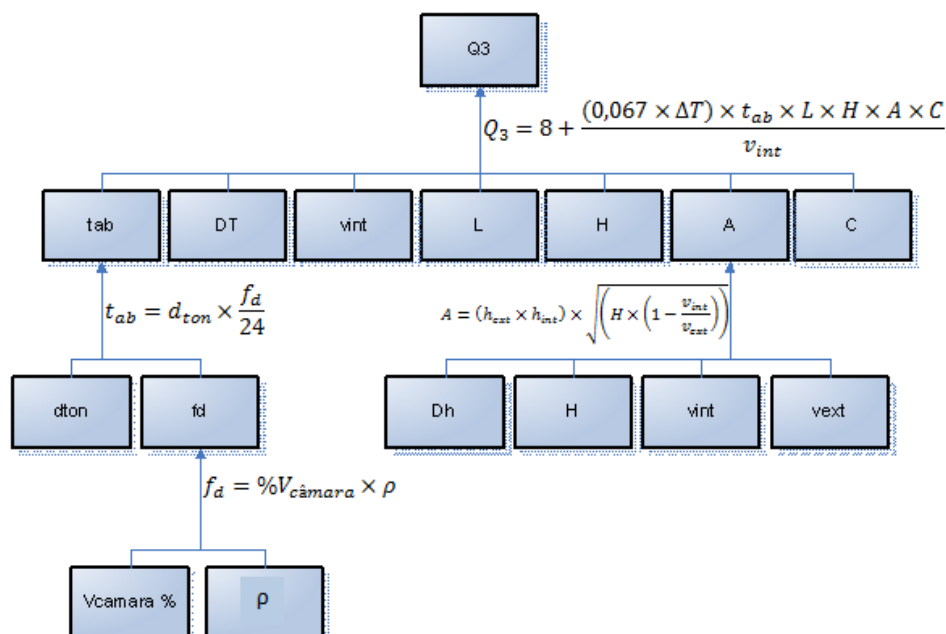


Figura 30 - Cálculo de Q3 (fluxograma 4) (adaptado de 39)

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Q_3 - Carga térmica devido à abertura de portas (W)

ΔT - Diferença de temperatura entre as duas faces da porta (°C)

L - Largura da porta (m)

H - Altura da porta (m)

C - Coeficiente minorante devido à presença de cortina de ar ou lamelas

h_{ext} - Entalpia do ar exterior (kJ/kg)

h_{int} - Entalpia do ar interior (kJ/kg)

v_{int} - Volume específico do ar interior (m³/kg)

v_{ext} - Volume específico do ar exterior (m³/kg)

t_{ab} - Tempo de abertura da porta (min/hora)

d_{ton} - Duração média da abertura das portas em minutos para permitir a passagem de uma tonelada de produto (min/ton)

f_d - Fluxo diário de produto (ton)

Tipo de Porta	Tipo de Produto	dt (mn/ton.)
Porta de abertura manual	Carcaças de animais suspensas	15
	Produtos paletizados	6
Porta de abertura automática	Carcaças de animais suspensas	1
	Produtos paletizados	0.8

Quadro 2 - Duração média de abertura das portas em minutos/ton de produto de acordo com o tipo de porta e produto (adaptado de 39)

10.1.5. Carga térmica devida à iluminação da câmara – Q4

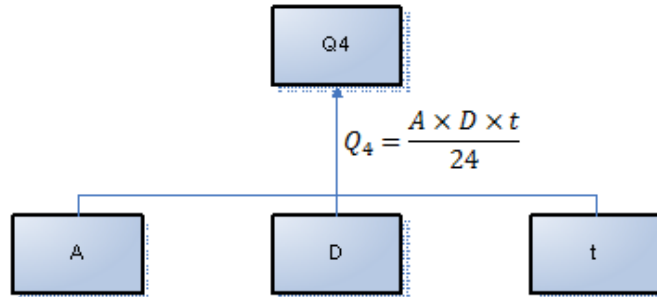


Figura 31 - Cálculo de Q4 (fluxograma 5) (adaptado de 39)

A iluminação normal deverá oscilar entre 60 e 100 lux e foi considerada uma carga térmica de 6 W/m^2 .

Q_4 – Carga térmica devida à iluminação;

A – Área da câmara em m^2 ;

D – Densidade de iluminação em W/m^2 ;

t – Tempo de funcionamento das lâmpadas (h/dia).

10.1.6. Carga térmica devido ao pessoal de estiva – Q5

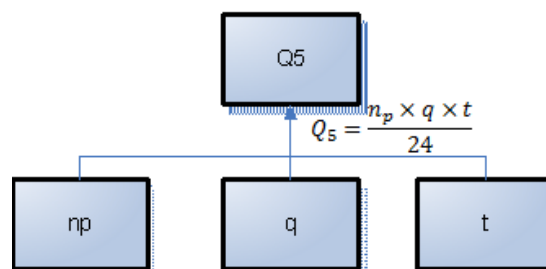


Figura 32 - Cálculo de Q5 (fluxograma 6) (adaptado de 39)

Q_5 - Carga térmica devido ao pessoal de estiva (W)

n_p – Número de pessoas na câmara

q – Calor libertado por cada pessoa (W)

t – Tempo de permanência na câmara (h/j)

10.1.7. Cargas térmicas dependentes dos produtos armazenados – Q6

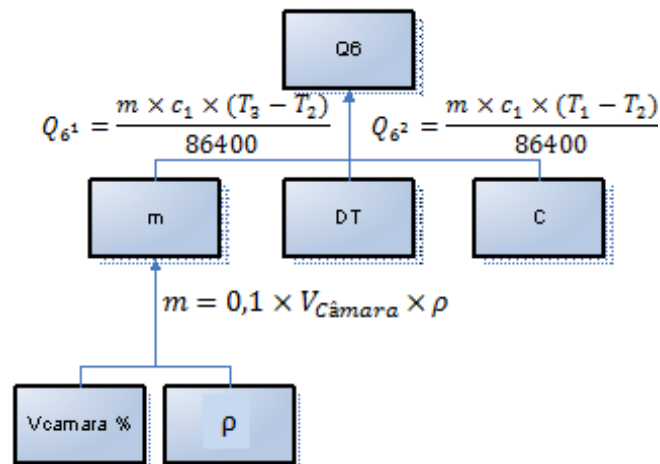


Figura 33 - Cálculo de Q6 (fluxograma 7) (adaptado de 39)

- Se os produtos forem armazenados no estado congelado a expressão é:
 - Q_{6^1} - Carga térmica interna dependente do produto armazenado (W)
 - m - Massa do produto introduzido (kg/dia)
 - c_2 - Calor específico abaixo da temperatura de congelação (J/kg. °C)
 - T_2 - Temperatura de congelação (°C)
 - T_3 - Temperatura final do produto a armazenar no estado congelado (°C)
- Se os produtos forem armazenados no estado refrigerado a expressão é:
 - Q_{6^2} - Carga térmica interna dependente do produto armazenado (W)
 - c_1 - Calor específico acima da temperatura de congelação (J/kg. °C)
 - T_1 - Temperatura inicial do produto a armazenar (°C)

10.1.8. Cargas térmicas no túnel de congelação – Q7

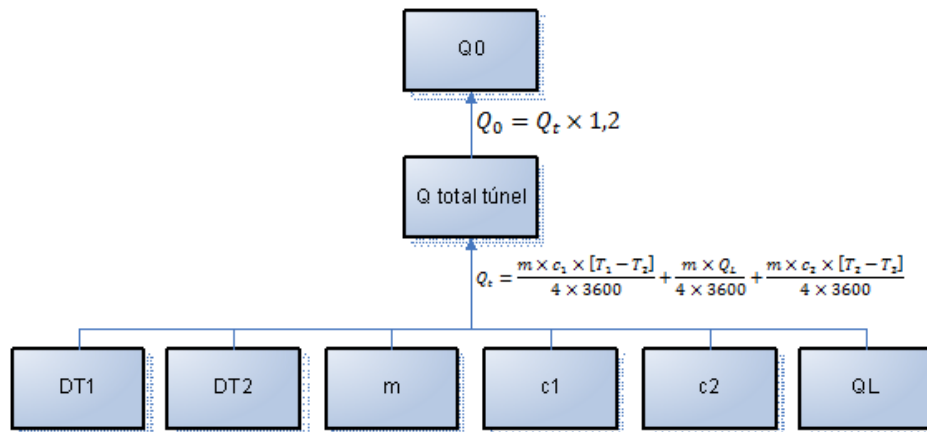


Figura 34 - Cálculo de Q7 (fluxograma 8) (adaptado de 39)

m - Massa do produto introduzido por ciclo (kg)

c_1 – Calor específico acima da temperatura de congelação (J/kg. °C)

c_2 – Calor específico abaixo da temperatura de congelação (J/kg. °C)

T_2 – Temperatura de congelação (°C)

T_3 – Temperatura final do produto a armazenar no estado congelado (°C)

Q_L – Calor latente de congelação (J/kg)

T_1 – Temperatura inicial do produto a armazenar (°C)

10.2. Resultados obtidos

10.2.1. Câmara de congelados

Dados Conhecidos:		
Câmara de conservação de congelados:		
Dimensões	5x10x4	m
Volume de entrada diária:	5	%
Funcionamento de Iluminação:	2	horas
Número de pessoas	2	
Duração da estadia das pessoas:	2	horas
Temperatura:	-25	°C
Temperatura de entrada do produto:	-12	°C
Humidade Relativa:	90	%
k poliuretano	0,02	W/m.°C
hint	15	W/m ² .°C
hext	30	W/m ² .°C
k cortiça	0,04	W/m.°C
q câmara de congelados	8	W/m ²
Temperatura do corredor	20	°C
Temperatura exterior	34	°C
Temperatura do pavimento	20	°C
Número de evaporadores no local	1	
Calor específico abaixo da temperatura de congelação	2000	J/kg.°C

Quadro 3 - Dados iniciais da câmara de conservação de congelados

Cálculos auxiliares		
Volume da Câmara	200	m ³
Taxa de renovação de ar	4,9	
Caudal volúmico/dia	989,95	m ³ /dia
Volume específico exterior	0,88	m ³ /kg
Caudal m	0,01	(kg/s)

Quadro 4 - Cálculos auxiliares

Quadro 5 - Cargas térmicas através de paredes, tecto e pavimento

Câmara de conservação de congelados:					
Cargas térmicas através de paredes tecto e pavimento					
	Área	Espessura	Resistência	U	Q1
Parede interna1	20	0,15	7,600	0,132	105,26 W
Parede interna2	20	0,15	7,600	0,132	105,26 W
Parede externa1	40	0,15	7,600	0,132	310,53 W
Parede externa2	40	0,15	7,600	0,132	310,53 W
Tecto	50	0,15	7,600	0,132	388,16 W
Pavimento	50	0,25	6,320	0,158	354,33 W
				Total Q1	1574,1 W

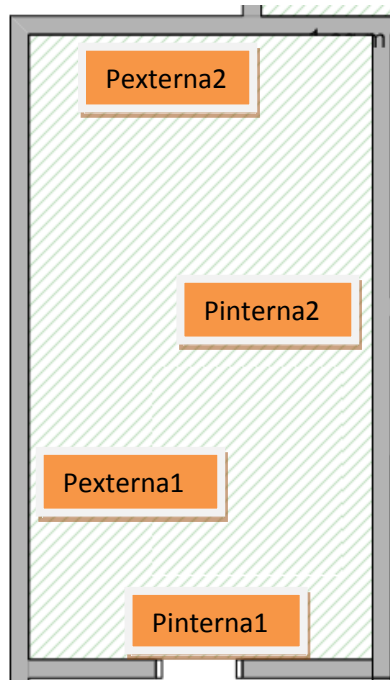


Figura 35 - Planta da “câmara de conservação de congelados”

Cargas térmicas devidas à renovação de ar	Q2	1021	W
Carga térmica devida à iluminação da câmara	Q4	200	W
Carga térmica devida ao pessoal de estiva	Q5	70	W
Cargas térmicas dependentes dos produtos armazenados	Q6	162	W

Quadro 6 - Cargas térmicas Q2, Q4, Q5 e Q6

Carga térmica de abertura de portas:		
DT	45	°C
tab	9	min/hora
v int	0,7	m ³ /kg
v corredor	0,84	m ³ /kg
h int	-24,92	kJ/kg
h ext	38,5	kJ/kg
L	2	m
H	2,4	m
C	0,25	
A	40,11	
Q3	1314,07	W

Quadro 7 - Carga térmica de abertura de portas

Carga térmica total na câmara de conservação de congelados		
Qint	4341	W
Pint	6512	W
Pprev	7814	W

Quadro 8 - Carga térmica total na câmara de conservação de congelados

10.2.2. Túnel de congelação

Dados Conhecidos:		
Túnel de Congelação		
Temperatura inicial do produto	5	°C
Temperatura de congelação	-2	°C
Temperatura final do produto	-18	°C
Massa introduzida por ciclo	500	kg
Calor específico acima da temperatura de congelação	4000	J/kg. °C
Calor específico abaixo da temperatura de congelação	2000	J/kg. °C
Calor latente de congelação	280000	J/kg
Número de evaporadores	1	

Quadro 9 - Dados conhecidos do túnel de congelação

Carga térmica total Túnel de Congelação		
Q total túnel	15741	W
Q0	18889	W

Quadro 10 - Carga térmica total do túnel de congelação

11. Selecção de equipamentos

11.1. Explicação de critérios de escolha

Para que o leitor consiga compreender a forma como foram escolhidos os mais variados equipamentos, explica-se, em baixo, os métodos aplicados:

11.1.1 Evaporadores

Para a selecção de evaporadores, utiliza-se os catálogos disponibilizados pelo fabricante *Centauro*. De acordo com a humidade relativa existente no interior do espaço a refrigerar, determina-se DT_m (diferença média aritmética de temperaturas), através da seguinte tabela.

DT_m	5°C	6°C	7°C	8°C	10°C
H.R	90%	85%	80%	75 a 80%	70%

Quadro 11 - Correspondência entre a DT_m e H.R. (humidade relativa) da câmara (adaptado de 40)

A expressão dada pelo catálogo da *Centauro*, para a determinação do modelo de evaporador, é a seguinte:

$$1) Q_{0m} = Q_{sm} \times RC_m \times FC$$

$$Q_{0m} = P_{previsional}$$

Q_{sm} – Capacidade para selecção em DT_m (KW);

RC_m – Factor de correcção devido à formação de gelo;

FC – Factor de correcção pendente do tipo de líquido refrigerante utilizado.

Ao determinar-se o factor de correcção, RC_m , seleccionado FC pelo catálogo de evaporadores da *Centauro*, calculado Q_{0m} (capacidade corrigida) pelo $P_{previsional}$ do evaporador e, sendo este o valor a introduzir no dito programa, pode-se definir o Q_{sm} (capacidade para selecção em DT_m) [40].

11.1.2. Compressor

Para a escolha do modelo adequado do compressor, para alimentar o circuito, recorre-se aos catálogos do fabricante *BITZER*. Para a selecção deste, é necessário ter em conta o valor da carga térmica a retirar, o tipo de fluido, o tipo de compressor a usar e as temperaturas de evaporação e condensação.

11.1.3. Condensador

As expressões fornecidas pela *Centauro* para escolher o modelo do condensador são as seguintes:

$$2) \frac{CTR}{THR} = Q_o \times FR$$

$$3) Q_c = Q_n \times K1 \times K2 \times K3 \times K4$$

$\frac{CTR}{THR}$ – Calor total de rejeição ou Q_c (kW);

Q_o – Capacidade frigorífica do compressor (kW);

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

F_R – Factor de correcção dependente do tipo de compressor;

Q_C – Capacidade corrigida do condensador;

Q_n – Capacidade nominal do condensador;

K_1 – Factor de correcção devido ao tipo de líquido refrigerante utilizado;

K_2 – Factor de correcção devido à temperatura do ar à entrada;

K_3 – Factor de correcção devido à altitude;

K_4 – Factor de correcção devido ao material das alhetas.

Após a obtenção da *capacidade corrigida do condensador* (Q_C), pela fórmula (2) selecciona-se o modelo de condensador, de acordo com a *capacidade nominal do condensador* (Q_n) calculado em (3). O *factor de correcção dependente do tipo de compressor* (F_R) é estabelecido na tabela 12 e os K 's na tabela 13.

Factor "FR" - "FR" Factor															
Temp. evaporação Evaporating Temp. [°C]	TEMPERATURA CONDENSAÇÃO / CONDENSING TEMPERATURE														
	+35			+40			+45			+50			+55		
	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.
5	1,26	1,20	1,22	1,30	1,23	1,26	1,35	1,27	1,31	1,41	1,32	1,37	1,48	1,38	1,44
0	1,31	1,23	1,26	1,35	1,27	1,30	1,40	1,31	1,35	1,47	1,36	1,42	1,55	1,43	1,49
-5	1,36	1,26	1,30	1,41	1,30	1,34	1,47	1,35	1,40	1,55	1,41	1,47	1,64	1,48	1,55
-10	1,43	1,30	1,34	1,49	1,35	1,39	1,56	1,40	1,45	1,65	1,46	1,52	1,76	1,55	1,61
-15	1,52	1,34	1,39	1,59	1,39	1,44	1,67	1,45	1,51	1,77	1,52	1,59	1,90	1,62	1,68
-20	1,64	1,39	1,44	1,71	1,44	1,50	1,80	1,51	1,57	1,91	1,60	1,66	2,01	--	--
-25	1,68	1,44	1,50	1,76	1,51	1,56	1,86	1,58	1,64	1,98	1,68	1,73	2,11	--	--
-30	1,75	1,51	1,57	1,84	1,58	1,64	1,95	1,67	1,72	2,08	1,79	1,82	2,21	--	--
-35	1,83	1,58	1,65	1,92	1,67	1,73	2,04	1,79	1,82	2,18	1,94	1,93	2,32	--	--

Herm - Hermético / Hermetic Sem - Semi Hermético - Semi Hermetic

Quadro 12 - Factor de correcção "FR" (adaptado de 40)

Refrigerante Refrigerant	R404A			R22			R134A			R407C																	
K1	1			0.96			0.93			0.87																	
Ar entrada [°C] Inlet Air	15			20			25			30			35			40											
K2	1.06			1.05			1.03			1.02			1			0.98											
Altitude [m]	0			300			600			900			1200			1500			1800			2100			2400		
K3	1			0.99			0.96			0.94			0.92			0.9			0.88			0.85			0.84		
Material alheta Fin material	Alumínio Aluminium						Alumínio revestido Coated aluminium						Cobre Copper														
K4	1						0.97						1.03														

Quadro 13 - Factor de correcção "K's" (adaptado de 40)

11.1.4. Depósito líquido

Para o dimensionamento do depósito líquido, e sua posterior selecção, considera-se o seu volume cerca de 1,5 vezes maior que volume interno total dos evaporadores do circuito considerado.

11.1.5. Separador de óleo

Este componente teve como factor de decisão, para a sua escolha, o caudal de fluido.

11.1.6. Dimensionamento de tubagens

De forma a seleccionar as tubagens é necessário ter em conta as seguintes velocidades de fluido:

Tipo de linha	Velocidade recomendada (m/s):
Aspiração	10 a 12
Descarga	6 a 8
Líquido	0,5 a 1
Dreno	0,5 a 1

Quadro 14 - Velocidade recomendada do fluido vs tipo de linha (adaptado de 41)

Aplicando as velocidades recomendadas, a potência de refrigeração, temperaturas de evaporação e condensação, obtém-se os diâmetros de tubos através do diagrama da Dupont.

Linha	$\Delta P/m$ (kPa/m)	ΔP total (bar)
Aspiração	0,075	0,060
Descarga	0,20	0,180
Líquido	0,25	0,320
Dreno	0,25	0,320

Quadro 15 - Perdas de carga por metro e total de acordo com o tipo de linha (adaptado de 41)

Assim, após selecção dos diâmetros das tubagens, chega-se ao valor das perdas de carga por metro de tubagem. Estas calculam-se em função da carga térmica a retirar do espaço em causa, diâmetro da tubagem e temperatura de evaporação e condensação.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Caso as perdas de carga por metro de tubagem e as perdas totais estiverem dentro dos limites estabelecidos da tabela de cima, o diâmetro obtido pelos ábacos do fabricante *Dupont* está correcto. Caso contrário, onde se verifiquem perdas de pressão não admissíveis para um determinado tipo de tubagem, deve-se reduzir a velocidade, obtendo por consequência diâmetros superiores.

Tubo	Coefficiente de segurança
Aspiração	15%
Descarga	15%
Líquido	40%
Dreno	15%

Quadro 16 - Coeficiente de segurança estabelecido para os equipamentos de frio vs tipo de linha (adaptado de 41)

De forma a contabilizar a perda de carga introduzida por cada equipamento, adiciona-se a cada tipo de tubo um coeficiente de acordo com a tabela acima indicada.

11.1.7. Válvula de expansão

É seleccionada em função da carga térmica de cada evaporador do espaço a refrigerar. O diâmetro da tubagem da linha de líquido é também um factor determinativo.

11.1.8. Válvula solenóide

Constituída por uma bobina, que quando sujeita a uma corrente eléctrica, cria um campo magnético, que abre ou fecha a válvula. É escolhida de acordo com o diâmetro existente na linha de líquido e também pelo seu diâmetro. Os termostatos controlam a abertura e fecho destas válvulas.

11.1.9. Filtro exsiccador

Uma vez mais, selecciona-se este equipamento através do diâmetro da tubagem onde é instalado (linha de líquido).

11.1.10. Visor de líquido

Para o escolher tem que se levar em conta a gama de pressões e temperaturas deste. Só após ter-se verificado as ditas gama, é que se averigua o seu diâmetro, de modo a ter a mesma dimensão que o correspondente da linha de líquido.

11.1.11. Pressostato de baixa pressão

Tem como factores de decisão a gama de temperaturas, gama de pressões que este suporta e o diâmetro da tubagem de aspiração.

11.1.12. Pressostato de alta pressão

Tem, tal como o pressostato de baixa pressão, os mesmos parâmetros de decisão.

11.1.13. Válvula de retenção

Este foi eleito de acordo com o diâmetro da linha de descarga e pela gama de pressões existentes na mesma.

11.1.14. Válvula de corte

Estas são instaladas em todas as linhas de cada circuito (dreno, descarga, aspiração e líquido) e são escolhidas com base na dimensão do diâmetro da linha correspondente onde é instalada e, também, pela gama de temperaturas e pressões suportáveis.

11.1.15. Termóstato

Este componente que é instalado dentro do local a refrigerar tem por base, para a sua selecção, os limites máximo e mínimo que atinge.

11.2. Particularizando as situações:

Neste capítulo, são escolhidos apenas os componentes dos circuitos que consomem energia eléctrica, ou seja, os que somente tem peso nos custos. Os equipamentos em causa são: compressor, evaporador e condensador. Apesar da válvula de solenoide consumir electricidade, o seu peso no consumo, e portanto na factura, relativamente aos outros três, é insignificante. Dessa forma, a escolha da válvula adequada não é preponderante para o caso.

11.2.1. O circuito da câmara de congelação:

Este circuito abrange a câmara de congelação, que têm uma humidade relativa de 90%, e utiliza o fluido R404A.

11.2.1.1. *Evaporador*

Considerou-se um evaporador para o circuito.

De acordo com a fórmula (1), para a determinação do modelo do evaporador, o valor de Q_{sm} foi de 17 kW. No **ANEXO 1** encontra-se o modelo escolhido e as suas características.

11.2.1.2. *Compressor*

No **ANEXO 2** segue o modelo da *Bitzer* escolhido e as suas características [42].

Nota: Realizou-se uma interpolação entre 40°C e 50°C, para determinar a potência do modelo do compressor, uma vez que o sistema apresenta uma temperatura de condensação de +45°C.

11.2.1.3. *Condensador*

No **ANEXO 3** segue o modelo escolhido da *Centauro*, as suas características e a forma como foi escolhido.

Nota: De modo a facilitar o trabalho, e apesar de termos uma temperatura exterior de +34°C, considerou-se, para o K2, o valor de 1, ou seja, o K correspondente a temperatura de +35°C.

11.2.2. O circuito do túnel de congelação:

Este circuito, como o nome sugere, abrange apenas e somente o túnel de congelação, que apresenta uma humidade relativa de 90%, e também utiliza o fluido R404A.

11.2.2.1. Evaporador

Considerou-se um evaporador para o circuito.

No **ANEXO 4** segue o modelo escolhido da *Centauro*, as suas características e a forma como foi escolhido.

Nota:

Para seleccionar o modelo do evaporador, em vez de se ter utilizado o valor de Q_{sm} , recorreu-se ao valor de Q_{s1} .

$$Q_{01} = Q_{s1} \times FC \times FG \times RC_1$$

O factor de correcção “RC1” foi obtido pela tabela em anexo, em que se entra com o valor da temperatura seca de entrada no evaporador (“Tse”). O valor dessa situa-se nos 34°C, e não nos 35°C (temperatura da câmara), pois existe libertação de calor dos alimentos existentes no interior do túnel, aquando da passagem do ar insuflado pelo evaporador, que liberta o mesmo a uma temperatura de -36/-37°C.

O valor de Q_{s1} obtido foi de 41 kW.

Para além destes critérios, também se teve em conta as dimensões deste componente, uma vez que o túnel, em questão, tem dimensões reduzidas.

11.2.2.2. Compressor

No **ANEXO 5** segue o modelo da *Bitzer* escolhido e as suas características [42].

11.2.2.3. Condensador

No **ANEXO 6** segue o modelo escolhido da *Centauro*, as suas características e a forma como foi escolhido.

Nota: Neste caso, tendo em conta que na tabela para a determinação do factor *FR* não existe o valor da temperatura de evaporação que se pretende, utiliza-se -35°C. Contudo,

para se compensar este facto, recorre-se a uma temperatura de condensação superior, ou seja, + 50°C.

11.2.3. O circuito da câmara de refrigeração :

Como foi referido, neste circuito é escolhido um grupo compressor, para além de um evaporador. É usado o fluido refrigerante R-134a e a carga térmica total na câmara cifra-se nos 3 kW.

11.2.3.1. Grupo compressor

No **ANEXO 7** segue o modelo da *Bitzer* escolhido e as suas características [42].

Nota: Foi necessário fazer uma interpolação entre os 32°C e os 43°C, pois a temperatura ambiente, em questão, situa-se nos 34°C.

11.2.3.2. Evaporador

Considerou-se um evaporador para o circuito.

No **ANEXO 8** segue o modelo escolhido da *Centauro*, as suas características e a forma como foi escolhido.

12. Consumo Eléctrico

Uma vez que os compressores desta instalação funcionam 16 horas por dia, no máximo, então não se pode considerar o consumo de energia eléctrica durante 8 horas diárias. No caso do compressor do túnel de congelação, este funciona em dois ciclos de 3 horas diárias, levando a que durante 18 horas não há gastos a nível da electricidade. Retirou-se a informação da potência absorvida de cada equipamento eléctrico da instalação, ou seja, dos compressores e ventiladores do evaporador e condensador (a válvula de solenoide, apesar de consumir electricidade, devido à sua potencia tão pequena, foi desprezada nos cálculos do consumo energético).

O valor da potência absorvida por parte dos equipamentos consumidores de energia eléctrica, é retirado das tabelas de onde foi seleccionado o modelo em causa.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

- Ventiladores dos evaporadores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 1500 W (2 ventiladores);
 - Circuito do túnel de congelação – 7400 W (2 ventiladores);
 - Circuito da câmara de conservação de refrigerados – 240 W (2 ventiladores)

- Compressores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 6,14 kW (valor obtido por interpolação);
 - Circuito do túnel de congelação – 25,11 kW (valor obtido directamente da tabela do modelo da *BITZER*)
 - Circuito da câmara de conservação de refrigerados (grupo compressor) – 1,31 kW (valor obtido por interpolação).

- Ventiladores dos condensadores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 320 W (2 ventiladores);
 - Circuito do túnel de congelação – 1560 W (2 ventiladores).

Consultando o *site* da *EDP*, retira-se os valores das tarifas de “Média Tensão” para “longas utilizações” (1º e 3º períodos).

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Encargos de potência	Termo	EUR/kW.mês	EUR/kW.dia*
Tarifa de longas utilizações	Horas de ponta	8,983	0,2945
	Contratada	1,397	0,0458
Tarifa de médias utilizações	Horas de ponta	9,064	0,2972
	Contratada	1,271	0,0417
Tarifa de curtas utilizações	Horas de ponta	13,977	0,4582
	Contratada	0,495	0,0162
Preço da energia ativa			
	Período trimestral	Período horário	EUR/kWh
Tarifa de longas utilizações	I e IV	Horas de ponta	0,1191
		Horas de cheias	0,0911
		Horas de vazio normal	0,0579
		Horas de super vazio	0,0541
	II e III	Horas de ponta	0,1229
		Horas de cheias	0,0937
		Horas de vazio normal	0,0602
		Horas de super vazio	0,0560
Tarifa de médias utilizações	I e IV	Horas de ponta	0,1253
		Horas de cheias	0,0945
		Horas de vazio normal	0,0589
		Horas de super vazio	0,0552
	II e III	Horas de ponta	0,1321
		Horas de cheias	0,0950
		Horas de vazio normal	0,0623
		Horas de super vazio	0,0578
Tarifa de curtas utilizações	I e IV	Horas de ponta	0,1981
		Horas de cheias	0,1037
		Horas de vazio normal	0,0664
		Horas de super vazio	0,0621
	II e III	Horas de ponta	0,1985
		Horas de cheias	0,1034
		Horas de vazio normal	0,0666
		Horas de super vazio	0,0622

Figura 36 - Tarifa transitória de venda a clientes finais em MT (adaptado de 43)

Ao obter os valores das tarifas, é necessário verificar os horários do período de Verão, para o “ciclo diário transitório”.

Ciclo diário transitório		
	horário de Inverno	horário de Verão
ponta	das 09:30 às 11:30	das 10:30 às 12:30
	das 19:00 às 21:00	das 20:00 às 22:00
cheias	das 08:00 às 09:30	das 09:00 às 10:30
	das 11:30 às 19:00	das 12:30 às 20:00
	das 21:00 às 22:00	das 22:00 às 23:00
vazio normal	das 22:00 às 02:00	das 23:00 às 02:00
	das 06:00 às 08:00	das 06:00 às 09:00
supervazio	das 02:00 às 06:00	das 02:00 às 06:00

Figura 37 - Horário do ciclo diário transitório (adaptado de 43)

De seguida, são exibidas as tabelas relativas ao consumo energético diário da instalação (câmaras de refrigerados, congelados e túnel de congelação).

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Como foi referido, os compressores funcionam, no máximo, durante 16 horas, para as câmaras de conservação de produto. Desse modo, estabeleceu-se que, das 23h00 às 7h00, não há consumo de energia eléctrica, como se pode verificar na tabela. O horário foi designado desta maneira, pois durante a noite não existem movimentações nas câmaras, ou seja, não há incremento de carga térmica no interior das mesmas.

Período horário	Horas		Tarifa (€/kWh)	Compressor C.C. (kWh)	Custo (€)	Grupo Compressor C.R. (kWh)	Custo (€)	Vent.Evaporador C.C. (kWh)	Custo (€)	Vent.Evaporador C.R. (kW/h)	Custo (€)	Vent.condensador C.C. (kWh)	Custo (€)
Vazio	00h00	1h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vazio	1h00	2h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SuperVazio	2h00	3h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SuperVazio	3h00	4h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SuperVazio	4h00	5h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SuperVazio	5h00	6h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vazio	6h00	7h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vazio	7h00	8h00	0,0602	6,14	0,37	1,31	0,08	1,50	0,09	0,24	0,01	0,32	0,02
Vazio	8h00	9h00	0,0602	6,14	0,37	1,31	0,08	1,50	0,09	0,24	0,01	0,32	0,02
Cheias	9h00	10h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	10h00	11h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Ponta	11h00	12h00	0,1229	6,14	0,75	1,31	0,16	1,50	0,18	0,24	0,03	0,32	0,04
Ponta	12h00	13h00	0,1229	6,14	0,75	1,31	0,16	1,50	0,18	0,24	0,03	0,32	0,04
Cheias	13h00	14h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	14h00	15h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	15h00	16h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	16h00	17h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	17h00	18h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	18h00	19h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Cheias	19h00	20h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Ponta	20h00	21h00	0,1229	6,14	0,75	1,31	0,16	1,50	0,18	0,24	0,03	0,32	0,04
Ponta	21h00	22h00	0,1229	6,14	0,75	1,31	0,16	1,50	0,18	0,24	0,03	0,32	0,04
Cheias	22h00	23h00	0,0937	6,14	0,58	1,31	0,12	1,50	0,14	0,24	0,02	0,32	0,03
Vazio	23h00	00h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL				98,24	9,51	20,96	2,03	24,00	2,32	3,84	0,37	5,12	0,50

Quadro 17 - Consumo eléctrico para as câmaras de refrigerados e congelados

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

No túnel de congelação, existem dois períodos de funcionamento de três horas cada. Das 9h00 às 12h00 e das 15h00 às 18h00.

Período horário	Horas		Tarifa (€/kWh)	Compressor T.C. (kWh)	Custo (€)	Vent.Evaporador T.C (kWh)	Custo (€)	Vent.Condensador T.C. (kWh)	Custo (€)
Vazio	00h00	1h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Vazio	1h00	2h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
SuperVazio	2h00	3h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0	0,00
SuperVazio	3h00	4h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0	0,00
SuperVazio	4h00	5h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0	0,00
SuperVazio	5h00	6h00	0,056	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Vazio	6h00	7h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Vazio	7h00	8h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Vazio	8h00	9h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	9h00	10h00	0,0937	25,11	2,35	7,4	0,69	1,56	0,15
Cheias	10h00	11h00	0,0937	25,11	2,35	7,4	0,69	1,56	0,15
Ponta	11h00	12h00	0,1229	25,11	3,09	7,4	0,91	1,56	0,19
Ponta	12h00	13h00	0,1229	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	13h00	14h00	0,0937	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	14h00	15h00	0,0937	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	15h00	16h00	0,0937	25,11	2,35	7,4	0,69	1,56	0,15
Cheias	16h00	17h00	0,0937	25,11	2,35	7,4	0,69	1,56	0,15
Cheias	17h00	18h00	0,0937	25,11	2,35	7,4	0,69	1,56	0,15
Cheias	18h00	19h00	0,0937	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	19h00	20h00	0,0937	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ponta	20h00	21h00	0,1229	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Ponta	21h00	22h00	0,1229	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Cheias	22h00	23h00	0,0937	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Vazio	23h00	00h00	0,0602	0	0,00	0	0,00	0	0,00
TOTAL				150,66	14,85	44,4	4,38	9,36	0,92

Quadro 18 - Consumo eléctrico do túnel de congelação

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Calculado o consumo de cada equipamento, pode-se calcular o consumo energético diário da instalação e, conseqüentemente, o consumo mensal (*Encargos de Energia Activa*). No consumo mensal é preciso ter em conta o custo dos *encargos de potência* (*Horas de Ponta e Potência Contratada*) e, finalmente, de um *termo fixo*.

Preço da potência em horas de ponta (€)	24,77
Preço da Potência contratada (€)	89,41
Encargos de Potência	114,18

Quadro 19 - Encargos de Potência

FACTURAÇÃO MENSAL		
1	Termo tarifário fixo	48,06
2	Encargos de Potência	114,18
3	Encargos de Energia Activa	1046,40
	Valor total - IVA excluído	1208,64

	I.V.A. (23%)	277,99
	Valor total da Factura	1486,62

Quadro 20 - Facturação mensal

Verifica-se que o custo mensal de energia eléctrica desta instalação é de **1210 Euros** (**1490, com I.V.A. incluído**).

13. Investimento

Através das tabelas seguintes, verifica-se o investimento inicial realizado para a construção da instalação. Ao longo desta, relativamente à espessura dos painéis “sandwich”, podem-se constatar três valores diferentes, 60 mm, 100 mm e 150 mm, para as salas de preparação e embalagem, câmaras de refrigerados e túnel de congelação (mesma espessura para a câmara de congelados), respectivamente e, obviamente, com custos associados diferenciados. A nível do betão armado, este é utilizado em toda a instalação, incluindo no cais. Tal como foi explicado anteriormente, os pavimentos específicos da câmara de congelados e túnel de congelação têm na sua composição o betão armado.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Painéis sandwich	Paredes+tecto	279,2	20	5584

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Betão	Pavimento	144	150	21600

Quadro 21 - Investimento na área de preparação e embalagem

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Painéis sandwich	Paredes+tecto	73,7	25	1842,5
	Pavimento	12	15	180
			TOTAL	2022,5

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Betão	Pavimento	12	150	1800

Quadro 22 - Investimento na câmara de refrigerados

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Painéis sandwich	Paredes+tecto	183,9	30	5517
	Pavimento	6	15	90
			TOTAL	5607

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Betão	Pavimento	56	150	8400

Quadro 23 - Investimento na câmara de congelados e túnel de congelação

	Local	Área	Custo (€) /m2	Custo final (€)
Betão	Pavimento	24	150	3600
	Pavimento	51,25	150	7687,5

Quadro 24 - Investimento no cais e corredor

TOTAL “betão armado” (€)	13213,5	TOTAL “painéis sandwich” (€)	43087,5
↓		↓	
TOTAL (€)		56301	

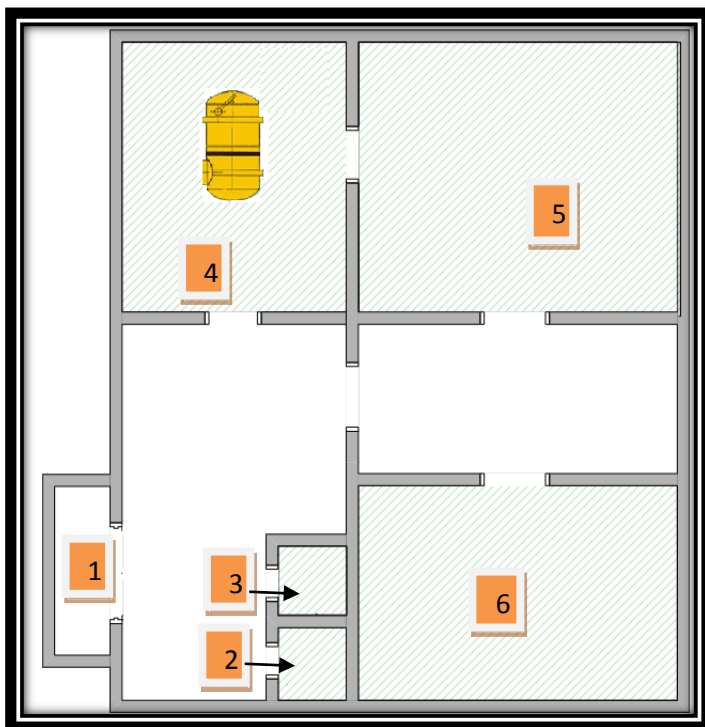
Quadro 25 - Total da importância investida

Nota: O valor do custo por m² dos painéis “sandwich” e do betão foi obtido através do orientador Prof. António Manuel Matos Guerra.

14. Instalação de liofilização

De acordo com a produção diária estabelecida no túnel de congelação da instalação frigorífica dimensionada em cima, é feita a selecção do liofilizador adequado. Neste capítulo, também é feito um estudo económico respeitante ao liofilizador escolhido, para que no fim seja possível comparar a sua viabilidade económica entre os dois processos de conservação do produto.

Foi definido que, ao longo de um dia de laboração da instalação, o túnel funciona em dois ciclos de três horas cada, e tem uma capacidade de 500 kg/ciclo, ou seja, 1000 kg/dia. Assim, tendo em conta o tempo que um liofilizador leva a processar o produto (cerca de 18h diárias) e a carga diária do túnel de congelação, seleccionou-se o seguinte equipamento: Modelo LG F 50 CS, da marca *Terroni* [44]. No **ANEXO 9** podem-se verificar as características técnicas deste modelo.



- 1- Cais de recepção/expedição
- 2- Câmara de congelados
- 3- Câmara de refrigerados
- 4- Sala do liofilizador
- 5- Sala de embalagem
- 6- Armazém de seco

Figura 38 - Planta da instalação de liofilização

O camarão, já congelado ou refrigerado (dependendo da forma como foi processado no navio), ao ser recepcionado através do cais de entrada (1), é introduzido na câmara de congelados ou de refrigerados (de pequenas dimensões), com o intuito de o manter nas condições desejadas até ser liofilizado, na sala (4). Após esta operação, o produto tratado é encaminhado para a sala de embalagem (5), sendo posteriormente colocado no armazém de seco (6).

15. Conclusão

Para que seja possível comparar a viabilidade económica entre as duas instalações, é necessário obter o valor do consumo energético de ambas. No caso do liofilizador, como se pode constatar, através do quadro presente em anexo, a potência total consumida por este modelo é de 210 kW.

Já para a instalação frigorífica, é obrigatório contabilizar a potência absorvida de cada um dos equipamentos presentes na mesma. Existem 3 compressores e 10 ventiladores (de evaporadores e condensadores).

- Ventiladores dos evaporadores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 1500 W (2 ventiladores);
 - Circuito do túnel de congelação – 7400 W (2 ventiladores);
 - Circuito da câmara de conservação de refrigerados – 240 W (2 ventiladores)
- Ventiladores dos condensadores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 320 W (2 ventiladores);
 - Circuito do túnel de congelação – 1560 W (2 ventiladores).

Potência total absorvida pelos ventiladores: 22,04 kW

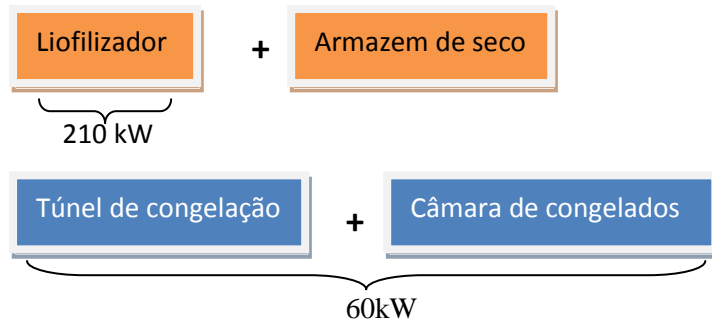
- Compressores
 - Circuito da câmara de conservação de congelados – 6,14 kW
 - Circuito do túnel de congelação – 25,11 kW
 - Circuito da câmara de conservação de refrigerados (grupo compressor) – 1,31 kW.

Potência total absorvida pelos compressores: 32,6 kW

Total: $32,6 + 22,04 = 54,6$ kW

Ao incluir-se os valores dos gastos energéticos da iluminação, este valor pode ser arredondado para os **60 kW**.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis



Como se observa, a potência absorvida por parte da instalação liofilizadora é 3,5 vezes superior à instalação frigorífica. O armazém de seco, por apenas absorver energia da rede através da iluminação e pouco mais, não está incluído nos gastos energéticos da instalação de liofilização. De igual forma, pelo simples facto das câmaras de congelados e refrigerados apresentarem pequenas dimensões, despreza-se o consumo energético das mesmas.

Fazendo a comparação agora ao nível de custos, tem-se:



$$1486 (\text{€}) \times 12 (\text{meses}) = 17800 \text{ €}$$



$$17800 (\text{€}) \times 3,5 = 62000 \text{ €}$$

Desta forma, tem-se uma diferença de 42500 € (62000 – 17800).

Pode-se concluir, logo à partida, que, a nível de gastos energéticos, a solução da liofilização está em desvantagem. Esta é a realidade dos factos.

Infelizmente, países de terceiro mundo, nomeadamente, aqueles que foram assolados pelas guerras, necessitam desta tecnologia dispendiosa. Uma vez que cadeia de frio nestes locais está fora de questão, é preciso que as populações – anormalmente pobres – sejam abastecidas com alimentos que não sejam congelados ou frescos. A liofilização é, então, a solução adoptada pelos governos destes países, pois graças a esta tecnologia, os alimentos mantêm as suas propriedades quase na totalidade, à temperatura ambiente. O

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

exército, pelas razões óbvias, durante as guerras/exercícios recorre a produtos processados desta maneira. Igualmente, a NASA recorre ao uso destes alimentos.

Portugal, felizmente, está fora do panorama dos ditos países de terceiro mundo. Sendo assim, no nosso país, pelo menos a nível da alimentação, recorre-se maioritariamente à congelação/refrigeração, pois estão criadas todas as condições para a implementação desta tecnologia de conservação de alimentos.

Infelizmente, e apesar do esforço, pela tal ausência de empresas que processam alimentos através da liofilização, não foi possível obter informações relativas a custos, investimentos, manutenção, etc.

Sabe-se que os equipamentos utilizados (bomba de vácuo, nomeadamente) são mais dispendiosos do que os usados na refrigeração, o que representa, desde logo, um investimento acrescido na criação duma instalação destas. A liofilização também é dispendiosa devido aos longos tempos de secagem envolvidos, o que tem impedido a aplicação da técnica de secagem a materiais a granel.

Contudo, a nível de investimento realizado na construção da instalação e na quantidade de pessoal presente, existem vantagens. Relativamente ao primeiro, uma vez que não são precisos grandes isolamentos térmicos para as paredes, chão e tecto, o custo será mais reduzido. Quanto ao pessoal, para que se realize o processamento de qualquer produto é necessário somente uma pessoa para operar a máquina e outra para supervisionar, controlar as operações de fornecimento, entre outras tarefas. A liofilização também leva vantagem no que toca ao acondicionamento dos produtos, pois ao contrário da refrigeração, não exige o recurso a ventiladores (de compressores, condensadores e evaporadores) e, portanto, não há gastos acrescidos de energia eléctrica, havendo apenas e só o consumo relativo à iluminação.

Para agravar o que já foi escrito, Portugal, em particular, atravessa uma profunda crise que parece afectar tudo e todos, o que nada em ajuda para que se avance para a implementação e construção duma empresa que recorra à liofilização. Por todas as razões apontadas, no nosso país, a refrigeração continua e continuará a ser a tecnologia de processamento de produtos mais utilizada, pelo menos, a nível alimentar.

16. Referências bibliográficas

- [1] Mnerie, Dumitru- *Lyophilization. Czech Republic: Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích Czech Republic, April - May 2008*, págs. 4,5, 21, 22.
- [2] Garcia, Laura Pereira - *Liofilização aplicada a alimentos*. Pelotas: Departamento de Ciência dos Alimentos – Universidade Federal de Pelotas, 2009. Trabalho académico de Bacharelato, págs. 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18,22, 23, 29, 33,
- [3] Jennings, Thomas A., “Lyophilization – Introduction and Basic Principles”, *Informa healthcar*, págs. 4, 11, 12, 13, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 355, 356, 357, 359.
- [4] Ramírez-Navas, Juan Sebastián, *Liofilización de Alimentos*, Universidad del Valle, págs. 1, 2, 25, 26
- [5] <http://lazer.hsw.uol.com.br/secagem-por-congelamento2.htm>, em 18/04/2012
- [6] Rodrigues, Ivo - *Engenharia Alimentar Processamento Geral de Alimentos, Liofilização*. ESAC, 2008, pág. 3.
- [7] <http://www.jornallivre.com.br/204326/quais-sao-os-metodos-para-conservar-os-alimentos.html>, em18 /04/2012
- [8] <http://pt.scribd.com/doc/24321650/Liofilizacao-primeira-aula>, págs. 1,2, em 20/04/2012
- [9]Barreto, H. F., *Liofilización un método de secado de alimentos*, págs. 1, 3, 13, 15, 16.
- [10]Rodrigo, António Pires – *A Liofilização e a resistividade aplicadas à tecnologia farmacêutica* . Lisboa: Faculdade de farmácia da Universidade de Lisboa, 1968. Tese de candidatura ao título de professor agregado, págs. 24, 27, 28, 30, 44, 45, 46, 55, 60, 61 64, 80

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

[11] Costa, Edmara Chaves, et al. - *Princípios da Estocagem e Preservação de Amostras Microbiológicas*. Ceará: Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias, Laboratório de Virologia, Universidade Estadual do Ceará, 2009, pág. 8

[12] http://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/1895/1/Tese_formatada_Definitiva.pdf, pág. 44, em 05/05/2012

[13] Day, John G. & Stacey, Glyn N., “Cryopreservation and Freeze-Drying Protocols”, Humana Press, págs. 27, 33, 34, 36, 38, 39, 43, 43, 44, 45, 47

[14] Schersch, Kathrin Brigitte - *Effect of Collapse on Pharmaceutical Protein Lyophilizates*. Munchen: Fakultät für Chemie und Pharmazie der - Ludwig-Maximilians-Universität München, 2009. Tese de Doutorado, págs. 19, 20, 25, 26, 28, 29

[15] *A Guide to Freeze-Drying for the Laboratory*, Labconco, págs. 4,5

[16] Bursac, Ranko, et al. - *A Practical Method for Resolving the Nucleation Problem in Lyophilization*, Vendor Voice, pág. 68.

[17] Leite, Juliana Tófano de Campos, et al., “Transições de Fases em Alimentos: Influência no Processamento e na Armazenagem”, Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.7, n.1, pág. 1-4.

[18] Pimenta, Maria Manuel Fernandes da Fonseca Sá – *Interpretação do Comportamento e Estabilidade dos Alimentos considerados como Sistemas Poliméricos Naturais Plastificados pela Água*. Porto: Departamento de Engenharia Química – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, 1997. Tese de Doutorado, págs. 44, 45, 46, 47, 87, 88.

[19] S. Mujumbar, Arun, *Handbook of Industrial Drying, Second Edition*, CRC Press, parte 11, págs 4, 5, 6, 12, 13.

[20] Marreiros, Maria Susana D.S., *Termodinâmica 1*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2002/2003, págs. 28, 50.

- [21] Souza, Vinícius Carvalho – *Efeito da Liofilização e Desidratação em Leito de Espuma Sobre a Qualidade do Pó de Polpa de Cupuaçu*. Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, 2011, pág. 22
- [22] <http://www.trabalhosfeitos.com/ensaios/Agua-Nos-Alimentos/135052.htm>, em 20/05/2012
- [23] Park, Kil Jin, et al. - *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Março de 2007. Trabalho acadêmico, págs. 45, 49.
- [24] Celestino, Sonia Maria Costa - *Princípio de secagem de alimentos*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados, 1ª Ed., 2010, pág. 12.
- [25] <http://markcafe.com.br/o-cafe/tipos-de-cafe/1126-cafeliofilizado>, em 27/05/2012
- [26] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Liofiliza%C3%A7%C3%A3o>, em 27 /05/2012
- [27] Oetjen, Georg-Wilhelm & Haseley, Peter, *Freeze-Drying, Second Edition*, Wiley-VCH, págs. 175-184, 190, 191, 205, 207.
- [28] <http://pt.scribd.com/doc/57443908/Liofilizacaomeu>, págs. 58, 62, em 02/06/2012
- [29] Ribeiro, Pedro Folque & Marques, João - *Unidade de Preparação de Pescado*. Lisboa: Trabalho prático da Unidade Curricular de Refrigeração, 2010, págs. 7 a 13.
- [30]] <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABNb0AE/manual-instalacao-operacao-compressores-condensadoras-elgin>, em 05/06/2012
- [31] Creus, J., “Tratado Prático de Refrigeração Automática”, Dinalivro. 13,14, 206, 207, 214
- [32]] Site da empresa Linde: <http://www.linde.com/>, em 06/06/2012

- [33] Site: <http://www.ambientegegado.com.br/v21/>, em 10/06/2012
- [34] Site da empresa *York*: <http://www.york.com/>, em 10/06/2012
- [35] Almeida, Maria Inês Avó de - *Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção*. Lisboa: Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2009. Tese de Mestrado, pág. 7.
- [36] Site da empresa *KIDE*: <http://www.kide.com/po/home/home.asp>, em 14/06/2012
- [37] Site da empresa *Polysto*: <http://www.polysto.com/EN/Home.aspx>, em 14/06/2012
- [38] Site da empresa *CF portas isotérmicas*: <http://cfportasisotermicas.com/>, em 15/06/2012
- [39] Guerra, Matos, Apontamentos da Unidade Curricular de Refrigeração, págs. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9.
- [40] Site da empresa *Centauro*: <http://www.centauro.pt/>, em 22/06/2012
- [41] Site da empresa *Dupont*: <http://www2.dupont.com/home/en-us/index.html>, em 22/06/2012
- [42] Site da empresa *BITZER*: <http://www.bitzer.de/eng/Intro>, em 22/06/2012
- [43] Site da empresa *EDP*: <http://www.edp.pt/pt/Pages/homepage.aspx>, em 29/06/2012
- [43] Site da empresa *Terroni*: <http://www.terroni.com.br/>, em 11/07/2012

ANEXOS

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

ANEXO 1 - Modelo do evaporador do circuito da câmara de congelados escolhido e forma como foi seleccionado.

Factor de correcção “ RC_m ”:

FACTORES DE CORRECÇÃO " RC_m " (DT_m)								DD
CORRECTION FACTORS " RC_m " (DT_m)								
T_c	DT_m	10	9	8	7	6	5	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---	---	---	---
+5		1.352	1.217	1.082	0.947	0.813	0.707	0.588
+2		1.250	1.125	1.000	0.893	0.772	0.665	0.539
0		1.188	1.069	0.950	0.830	0.710	0.609	0.490
-15		1.018	0.918	0.830	0.730	0.640	0.539	0.434
-20		0.963	0.867	0.770	0.660	0.583	0.490	0.393
-25		0.950	0.854	0.764	0.649	0.567	0.476	0.385
-34		---	---	---	---	0.561	0.471	0.381

Factor “FC”:

De acordo com o catálogo, “para R404A, FC=1”.

Modelo seleccionado: DD/ E 7089/P

Gama Range	Modelo Model	R404A, Pe Nominal [kW] - ENV 328													
		Superfície Surface	Volume Internal Volume	Q_{s_n}		Nr	Ventiladores / Fans					1.35 x SC1 $DT_1=10^{\circ}C$ $T_{se}=10^{\circ}C$ $TE=0^{\circ}C$	1.15 x SC2 $DT_1=8^{\circ}C$ $T_{se}=0^{\circ}C$ $TE=8^{\circ}C$	1.05 x SC3 $DT_1=7^{\circ}C$ $T_{se}=-18^{\circ}C$ $TE=25^{\circ}C$	1.0 x SC4 $DT_1=6^{\circ}C$ $T_{se}=-25^{\circ}C$ $TE=31^{\circ}C$
				$DT_m=8^{\circ}C$ $T_c=+2^{\circ}C$ $TE=6^{\circ}C$	$DT_m=10^{\circ}C$ $T_c=+4^{\circ}C$ $TE=6^{\circ}C$		\varnothing	Pe	Corr.	Caudal ar Air Volume	Projeção Air throw				
[m ²]	[dm ³]	[kW]	[kW]	[mm]	[W]	[A]	[m ³ /h]	[m]	[V]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]		
708	7.60	3.25	1.35	1.36	1	300	120	0.55	1450	12	~230	1.39	0.95	0.76	0.62
709	9.10	3.90	1.74	1.76	1	300	120	0.55	1400	12	~230	1.80	1.23	0.98	0.80
712	12.10	5.20	2.48	2.51	1	300	120	0.55	1300	10	~230	2.56	1.75	1.40	1.14
715	15.10	5.77	3.18	3.21	2	300	240	1.10	2900	12	~230	3.28	2.24	1.79	1.46
718	18.20	6.92	4.31	4.35	2	300	240	1.10	2800	10	~230	4.45	3.03	2.42	1.98
724	24.30	9.23	4.98	5.03	2	300	240	1.10	2600	12	~230	5.15	3.51	2.80	2.29
727	27.30	9.95	6.12	6.18	3	300	360	1.65	4200	10	~230	6.32	4.30	3.44	2.81
736	36.40	13.26	7.47	7.54	3	300	360	1.65	3900	12	~230	7.71	5.25	4.20	3.43
737	36.40	12.97	8.14	8.22	4	300	480	2.20	5600	10	~230	8.41	5.73	4.58	3.74
743	43.80	15.13	8.98	9.06	4	300	480	2.20	5170	10	~230	9.27	6.31	5.05	4.12
744	50.10	17.30	9.82	9.91	4	300	480	2.20	5000	10	~230	10.14	6.91	5.52	4.51
746	45.60	15.20	10.65	10.75	5	300	600	2.75	7000	12	~230	10.99	7.49	5.99	4.89
761	60.70	21.32	13.13	13.25	5	300	600	2.75	6500	10	~230	13.56	9.24	7.38	6.03
7020	19.75	7.78	4.52	4.57	1	400	320	0.63	3200	16	3-400	4.68	3.19	2.55	2.08
7026	26.30	10.37	5.65	5.71	1	400	320	0.63	3000	14	3-400	5.85	3.98	3.18	2.60
7027	26.20	9.55	6.53	6.59	2	400	640	1.26	7200	14	3-400	6.74	4.59	3.67	3.00
7033	33.89	11.94	7.84	7.91	2	400	640	1.26	6800	14	3-400	8.09	5.51	4.41	3.60
7040	40.67	14.33	9.04	9.12	2	400	640	1.26	6400	14	3-400	9.33	6.36	5.08	4.15
7053	52.60	19.10	10.87	10.97	2	400	640	1.26	6000	14	3-400	11.22	7.64	6.11	4.99
7058	49.05	17.4	12.07	12.18	3	400	960	1.89	10200	16	3-400	12.46	8.49	6.78	5.54
7059	59.20	20.88	14.50	14.64	3	400	960	1.89	9600	16	3-400	14.97	10.20	8.15	6.66
7060	60.20	21.84	14.72	14.86	2	450	1300	2.60	9000	20	3-400	15.20	10.36	8.28	6.76
7079	79.00	27.84	16.76	16.92	3	400	960	1.89	9000	14	3-400	17.31	11.80	9.43	7.70
7089	87.50	31.13	19.16	19.34	2	500	1500	3.00	11160	22	3-400	19.79	13.48	10.77	8.80
7090	90.30	31.82	20.84	21.05	3	450	1950	3.90	13500	20	3-400	21.54	14.68	11.73	9.58
7110	109.30	38.91	21.85	22.42	2	500	1500	3.00	10620	20	3-400	22.93	15.63	12.49	10.20
7114	118.30	39.94	26.62	26.86	3	500	2250	4.50	17000	22	3-400	27.48	18.72	14.96	12.22
7120	120.30	41.80	28.09	28.37	4	450	2600	5.20	18000	20	3-400	29.03	19.78	15.80	12.90
7132	131.20	45.64	29.08	29.34	3	500	2250	4.50	16740	22	3-400	30.02	20.45	16.34	13.40
7165	164.00	57.05	33.89	34.20	3	500	2250	4.50	15840	20	3-400	34.98	23.84	19.05	15.60
7176	175.00	60.16	39.18	39.54	4	500	3000	6.00	22320	22	3-400	40.45	27.56	22.02	18.00
7220	218.70	75.19	43.97	44.37	4	500	3000	6.00	21420	20	3-400	45.39	30.93	24.72	20.20

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

ANEXO 2 - Modelo do compressor do circuito da câmara de congelados escolhido e suas características.

Modelo seleccionado: 4PCS-15.2Y

		R404A ■ R507A											
		Leistungswerte 50 Hz [⊕] bezogen auf Sauggastemperatur 20°C, ohne Flüssigkeits-Unterkühlung				Performance data 50 Hz [⊕] relating to 20°C suction gas tempera- ture, without liquid subcooling				Données de puissance 50 Hz [⊕] à une température de gaz aspiré de 20°C se référant, sans sous-refroidissement de liquide			
Verdichter Typ Compressor type Compresseur type	Verfl. Temp. Cond. temp. Temp. de cond. °C	Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique											
		Q_o [Watt]											
		Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée											
		P_e [kW]											
		Verdampfungstemperatur °C				Evaporating temperature °C				Température d'évaporation °C			
		7,5	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
4VCS-10.2Y	30	Q	42750	30200	32950	27250	22400	18240	14610	11490	8810	6530	4580
		P	7,14	7,13	7,01	6,76	6,41	5,96	5,45	4,88	4,27	3,64	3,00
	40	Q	36100	33100	27600	22850	18680	15070	11950	9260	6960	5000	3650
		P	6,67	6,54	6,18	5,70	5,14	4,50	3,90	3,27	2,64	2,00	1,40
	50	Q	29550	27050	22500	18490	15020	12010	9410	7180	5290	3890	2850
		P	9,97	9,71	9,13	8,44	7,68	6,87	6,01	5,13	4,26	3,39	2,57
4TCS-8.2Y	30	Q				33050	27250	22200	17890	14170	10900	8300	6040
		P				8,74	8,17	7,55	6,87	6,16	5,41	4,64	3,86
	40	Q				27750	22900	18480	14760	11560	8830	6520	4580
		P				9,86	9,05	8,20	7,34	6,46	5,57	4,66	3,74
	50	Q				18350	14790	11710	9070	6800	4880	3560	2600
		P				5,74	5,17	4,55	3,93	3,31	2,69	2,07	1,45
4TCS-12.2Y	30	Q	51500	47200	39450	32750	26900	21900	17550	13830	10650	7960	5700
		P	8,63	8,63	8,49	8,22	7,81	7,29	6,68	6,00	5,26	4,48	3,68
	40	Q	43500	39850	33300	27550	22600	18260	14530	11320	8500	6270	4320
		P	10,66	10,47	9,99	9,40	8,72	7,96	7,15	6,29	5,40	4,51	3,62
	50	Q	36400	32400	27050	22350	18290	14650	11560	8890	6690	4850	3520
		P	12,28	11,93	11,17	10,33	9,42	8,45	7,45	6,42	5,39	4,36	3,36
4PCS-10.2Y	30	Q				38300	31600	25750	20700	16390	12690	9550	6910
		P				10,07	9,37	8,64	7,87	7,06	6,22	5,34	4,43
	40	Q				32900	26500	21500	17130	13400	10220	7520	5240
		P				11,39	10,45	9,47	8,45	7,41	6,35	5,30	4,25
	50	Q				21500	17290	13650	10650	7890	5840	4360	3160
		P				6,26	5,64	5,04	4,42	3,80	3,18	2,56	1,94
4PCS-15.2Y	30	Q	61500	56400	47100	39050	32100	26000	20900	16320	12400	9240	6500
		P	10,23	10,19	9,96	9,58	9,06	8,43	7,70	6,90	6,04	5,14	4,23
	40	Q	52200	47850	39950	33050	27050	21850	17360	13490	10190	7390	5320
		P	12,41	12,14	11,51	10,79	9,99	9,11	8,18	7,19	6,17	5,13	4,07
	50	Q	42600	39000	32500	26750	21800	17430	13680	10460	7710	5380	3420
		P	14,27	13,78	12,78	11,73	10,66	9,55	8,43	7,28	6,11	4,94	3,75

ANEXO 3 - Modelo do condensador do circuito da câmara de congelados escolhido e forma como foi seleccionado

Factor "FR"

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Factor "FR" - "FR" Factor															
Temp. evaporação Evaporating Temp. [°C]	TEMPERATURA CONDENSAÇÃO / CONDENSING TEMPERATURE														
	+35			+40			+45			+50			+55		
	Herm	Aber.	Sem.	Herm	Aber.	Sem.	Herm	Aber.	Sem.	Herm	Aber.	Sem.	Herm	Aber.	Sem.
	Open			Open			Open			Open			Open		
5	1,26	1,20	1,22	1,30	1,23	1,26	1,35	1,27	1,31	1,41	1,32	1,37	1,48	1,38	1,44
0	1,31	1,23	1,26	1,35	1,27	1,30	1,40	1,31	1,35	1,47	1,36	1,42	1,55	1,43	1,49
-5	1,36	1,26	1,30	1,41	1,30	1,34	1,47	1,35	1,40	1,55	1,41	1,47	1,64	1,48	1,55
-10	1,43	1,30	1,34	1,49	1,35	1,39	1,56	1,40	1,45	1,65	1,46	1,52	1,76	1,55	1,61
-15	1,52	1,34	1,39	1,59	1,39	1,44	1,67	1,45	1,51	1,77	1,52	1,59	1,90	1,62	1,68
-20	1,64	1,39	1,44	1,71	1,44	1,50	1,80	1,51	1,57	1,91	1,60	1,66	2,01	--	--
-25	1,68	1,44	1,50	1,76	1,51	1,56	1,86	1,58	1,64	1,98	1,68	1,73	2,11	--	--
-30	1,75	1,51	1,57	1,84	1,58	1,64	1,95	1,67	1,72	2,08	1,79	1,82	2,21	--	--
-35	1,83	1,58	1,65	1,92	1,67	1,73	2,04	1,79	1,82	2,18	1,94	1,93	2,32	--	--

Herm - Hermético / Hermetic Sem- Semi Hérmético - Semi Hermetic

“K’s”

Refrigerante Refrigerant	R404A			R22			R134A			R407C		
K1	1			0.96			0.93			0.87		
Ar entrada [°C] Inlet Air	15		20		25		30		35		40	
K2	1.06		1.05		1.03		1.02		1		0.98	
Altitude [m]	0		300		600		900		1200		1500	
K3	1		0.99		0.96		0.94		0.92		0.9	
Material alheta Fin material	Aluminio Aluminium			Aluminio revestido Coated aluminium			Cobre Copper					
K4	1			0.97			1.03					

Modelo seleccionado: ACM 3215

Modelo Mode Tubo 3/8 3/8 Tube	Capacidade Duty DT 15°C	Superficie Surface	Volume Interno Internal Volume	Caudal de ar Air flow	Ventiladores 4 polos - 1300 rpm				MPS	Ruido* Sound level
					Nr	Ø	Pe	Corrente Total Total current		
ACM 123	3.01	4.89	0.79	1870	1	315	105	0.54	230-1-50	39
ACM 124	3.75	7.33	1.18	1650	1	315	105	0.54	230-1-50	39
ACM 144	3.98	6.88	1.10	2550	1	350	130	0.58	230-1-50	44
ACM 145	5.06	10.31	1.66	2340	1	350	130	0.58	230-1-50	44
ACM 167	6.99	13.24	2.13	3180	1	400	160	0.71	230-1-50	49
ACM 168	7.99	17.66	2.84	2970	1	400	160	0.71	230-1-50	49
ACM 189	9.51	17.42	2.80	4270	1	450	200	0.48	400-3-50	53
ACM 1810	10.87	23.23	3.73	4000	1	450	200	0.48	400-3-50	53
ACM 2013	13.30	19.74	3.17	8650	1	500	780	1.35	400-3-50	53
ACM 2015	17.44	29.61	4.76	8160	1	500	780	1.35	400-3-50	53
ACM 2019	20.82	49.35	7.93	7370	1	500	780	1.35	400-3-50	53
ACM 246	6.07	9.78	1.57	3740	2	315	210	1.08	230-1-50	42
ACM 247	7.62	14.67	2.36	3300	2	315	210	1.08	230-1-50	42
ACM 248	8.27	19.56	3.14	2900	2	315	210	1.08	230-1-50	42
ACM 289	8.46	13.75	2.21	5100	2	350	260	1.16	230-1-50	47
ACM 3212	11.01	17.66	2.84	6920	2	400	320	1.42	230-1-50	52
ACM 3215	14.28	26.49	4.26	6360	2	400	320	1.42	230-1-50	52
ACM 3216	16.47	35.32	5.67	5940	2	400	320	1.42	230-1-50	52
ACM 3619	19.13	38.84	5.60	8540	2	450	400	0.96	400-3-50	56
ACM 3621	21.97	46.45	7.46	8000	2	450	400	0.96	400-3-50	56

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

ANEXO 4 - Modelo do evaporador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.

Factor de correcção “RC₁”:

FACTORES DE CORRECÇÃO * RC ₁ * (DT _i) CORRECTION FACTORS * RC ₁ * (DT _i)							BSU 15.8 x 7.9 mm	
T _{se}	DT _i	10	9	8	7	6	5	4
+10		1.023	0.921	0.818	0.716	0.614	0.512	0.410
+4		1.000	0.900	0.800	0.700	0.600	0.500	0.400
+2		0.947	0.852	0.758	0.663	0.568	0.474	0.379
0		0.871	0.784	0.697	0.61	0.523	0.436	0.348
-4		0.848	0.763	0.678	0.594	0.509	0.424	0.339
-10		0.826	0.743	0.661	0.578	0.496	0.413	0.330
-18		0.795	0.716	0.636	0.557	0.477	0.398	0.318
-20		0.788	0.709	0.630	0.552	0.473	0.394	0.315
-25		0.758	0.682	0.606	0.531	0.455	0.379	0.303
-34		---	---	---	0.525	0.450	0.375	0.300
-40		---	---	---	0.521	0.445	0.371	0.296

Factor “FC”:

De acordo com o catálogo, “para R404A, FC=1”.

Factor “FG”:

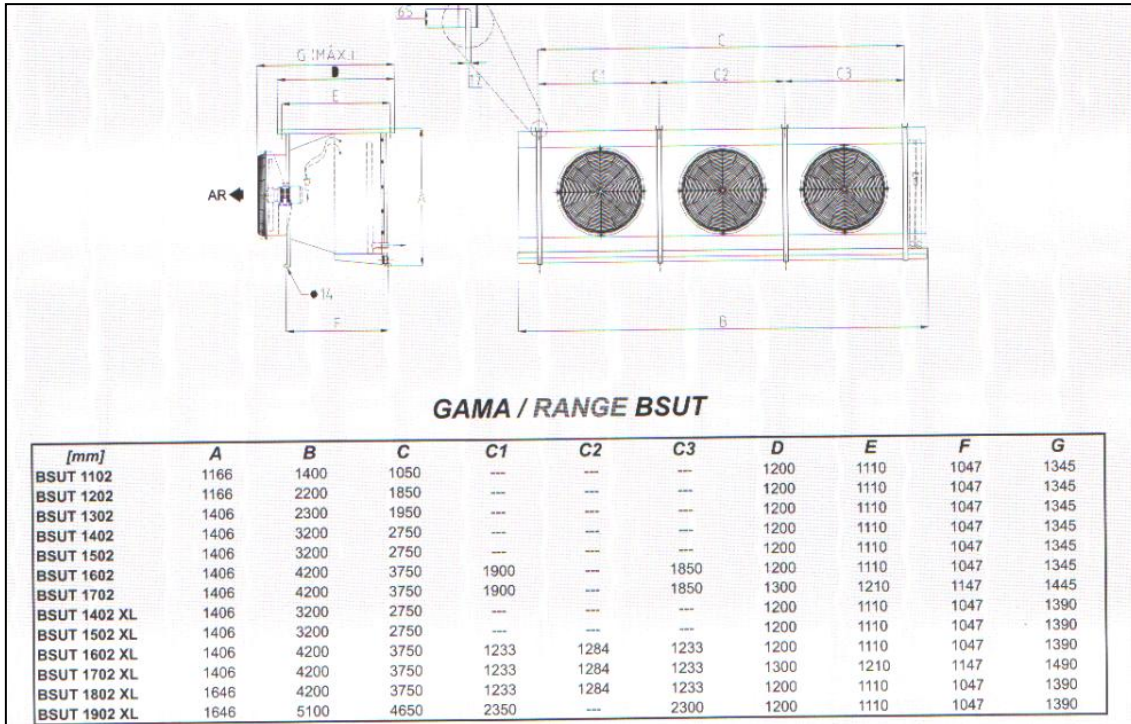
FG			
Ciclo / Cycle T [Horas/ Hour]	T<6	6<T<8	8<T<10
Arrefecimento/ Chilling	1	0.95	0.90
Congelamento / Freezing	1	0.90	0.85

Modelo escolhido: BSUT 1302

Modelo Model	Superf. Surface [m ²]	Qs DT _a =8°C Tc=2°C TE=6°C [kW]	Qs DT _i =10°C Tse=4°C TE=6°C [kW]	Ventiladores / Fans					R404A, Pc Nominal -ENV 328			
				Nr	∅ [mm]	Pe [W]	Corrente Current [A]	Pressão Estática Avaib. Press. [Pa]	Caudal ar Air Volume [m ³ /h]	1.15 x SC2 DT _a =8°C Tse=0°C TE=8°C [kW]	1.05 x SC3 DT _a =7°C Tse=-18°C TE=-25°C [kW]	1.0 x SC4 DT _a =6°C Tse=-25°C TE=-31°C [kW]
BSUT 1102	88.70	19.45	18.30	1	700	2800	4.96	128.00	11500	12.76	10.19	8.33
BSUT 1202	158.70	37.31	35.11	2	700	5600	9.92	115.00	23000	24.47	19.56	15.98
BSUT 1302	209.40	52.16	49.08	2	700	7400	13.46	89.00	34000	34.21	27.34	22.33
BSUT 1402	297.60	62.68	58.98	3	700	8400	14.88	149.00	34500	41.11	32.85	26.84
BSUT 1402 XL	297.60	62.68	58.98	2	800	9600	19.44	190.00	34500	41.11	32.85	26.84
BSUT 1502	297.60	76.20	71.71	3	700	11100	20.19	80.00	51000	49.98	39.94	32.63
BSUT 1502 XL	297.60	76.20	71.71	2	800	12600	23.00	150.00	51000	49.98	39.94	32.63
BSUT 1602	407.80	92.50	87.04	4	700	11200	19.84	77.00	54000	60.67	48.48	39.60
BSUT 1602 XL	407.80	92.50	87.04	3	800	14400	29.16	162.00	54000	60.67	48.48	39.60
BSUT 1702	501.40	119.18	112.14	4	700	14800	26.92	85.00	64000	78.16	62.46	51.02
BSUT 1702 XL	501.40	119.18	112.14	3	800	18900	34.50	135.00	64000	78.16	62.46	51.02
BSUT 1802 XL	489.30	123.90	116.59	3	800	18900	34.50	106.00	81000	81.26	64.94	53.06
BSUT 1902 XL	608.30	156.88	147.63	4	800	25200	46.00	104.00	108000	102.90	82.23	67.17

Dimensões:

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis



ANEXO 5 - Modelo do compressor do circuito do túnel de congelação escolhido e suas características

Modelo seleccionado: S66J-32.2Y

Verdichter Type		Verfl. Temp	Kälteleistung Cooling capacity Puissance frigorifique Q_0 [Watt]														Leistungsaufnahme Power consumption Puissance absorbée P_e [kW]															
Compressor type		Cond. temp.																														
Compresseur type		Temp. de cond. °C	Verdampfungstemperatur °C							Evaporating temperature °C							Température d'évaporation °C															
		°C	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70
S6F-30.2Y	30		43400	37400	31750	26500	21700	17420	13690	10540	7920	5800	22,53	20,65	18,78	16,94	15,15	13,42	11,77	10,20	8,74	7,40	23,85	21,86	19,89	17,94	16,04	14,21	12,45	10,78	9,23	7,80
	35		42500	36600	31050	25900	21200	17030	13420	10340	7780	5680	23,85	21,86	19,89	17,94	16,04	14,21	12,45	10,78	9,23	7,80	25,20	23,10	21,01	18,96	16,95	15,00	13,14	11,37	9,72	
	40		41500	35700	30300	25300	20700	16680	13170	10150	7590	25,20	23,10	21,01	18,96	16,95	15,00	13,14	11,37	9,72	26,59	24,37	22,16	19,98	17,86	15,80	13,83	11,96				
	45		40450	34800	29550	24700	20300	16360	12930	9920	28,07	25,69	23,33	21,01	18,75	16,57	14,49	29,64	27,06	24,51	22,03	19,63	17,32									
	50		39500	34000	28850	24100	19870	16060	12650																							
55		38800	33250	28200	23600	19490	15740																									
S66J-32.2Y	30		55200	47500	40300	33600	27500	22050	17320	13300	9980	7330	28,25	25,87	23,52	21,21	18,97	16,81	14,75	12,80	10,98	9,31	30,09	27,49	24,95	22,49	20,11	17,82	15,64	13,56	11,60	9,77
	35		54200	46600	39750	32900	26900	21600	16980	13060	9810	7160	32,00	29,16	26,43	23,80	21,27	18,84	16,52	14,31	12,20	33,89	30,84	27,91	25,11	22,43	19,85	17,38	15,02			
	40		53000	45650	38700	32200	26350	21150	16670	12820	9570	33,89	30,84	27,91	25,11	22,43	19,85	17,38	15,02	35,67	32,45	29,36	26,40	23,56	20,83	18,20						
	45		51900	44700	37850	31550	25850	20800	16370	12540																						
	50		51000	43750	37050	30900	25350	20400	16050																							
55		43000	36300	30300	24900	20050																										

ANEXO 6 - Modelo do condensador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Factor “FR”

Factor "FR" - "FR" Factor															
Temp. evaporação Evaporating Temp. [°C]	TEMPERATURA CONDENSAÇÃO / CONDENSING TEMPERATURE														
	+35			+40			+45			+50			+55		
	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.	Herm	Aber. Open	Sem.
5	1,26	1,20	1,22	1,30	1,23	1,26	1,35	1,27	1,31	1,41	1,32	1,37	1,48	1,38	1,44
0	1,31	1,23	1,26	1,35	1,27	1,30	1,40	1,31	1,35	1,47	1,36	1,42	1,55	1,43	1,49
-5	1,36	1,26	1,30	1,41	1,30	1,34	1,47	1,35	1,40	1,55	1,41	1,47	1,64	1,48	1,55
-10	1,43	1,30	1,34	1,49	1,35	1,39	1,56	1,40	1,45	1,65	1,46	1,52	1,76	1,55	1,61
-15	1,52	1,34	1,39	1,59	1,39	1,44	1,67	1,45	1,51	1,77	1,52	1,59	1,90	1,62	1,68
-20	1,64	1,39	1,44	1,71	1,44	1,50	1,80	1,51	1,57	1,91	1,60	1,66	2,01	--	--
-25	1,68	1,44	1,50	1,76	1,51	1,56	1,86	1,58	1,64	1,98	1,68	1,73	2,11	--	--
-30	1,75	1,51	1,57	1,84	1,58	1,64	1,95	1,67	1,72	2,08	1,79	1,82	2,21	--	--
-35	1,83	1,58	1,65	1,92	1,67	1,73	2,04	1,79	1,82	2,18	1,94	1,93	2,32	--	--

Herm - Hermético / Hermetic Sem- Semi Hermético - Semi Hermetic

“K’s”

Refrigerante Refrigerant	R404A			R22			R134A			R407C	
K1	1			0.96			0.93			0.87	
Ar entrada [°C] Inlet Air	15		20		25		30		35		40
K2	1.06		1.05		1.03		1.02		1		0.98
Altitude [m]	0	300		600		900		1200		1500	
K3	1	0.99	0.96	0.94	0.92	0.9	0.88	0.85	0.84		
Material alheta Fin material	Aluminio Aluminium			Aluminio revestido Coated aluminium				Cobre Copper			
K4	1			0.97				1.03			

Modelo seleccionado: ACM 4039

Modelo Model	Capacidade Duty DT 15°C	Superfície Surface	Volume Interno Internal Volume	Caudal de ar Air flow	Ventiladores 4 polos – 1300 rpm				MPS	Ruído* Sound level
					Nr	Ø	Pe	Corrente Total Total current		
Tubo 1/2 1/2 Tube	[kW]	[m ²]	[dm ³]	[m ³ /h]		[mm]	[W]	[A]		[dB(A)]
ACM 3623	23.00	56.34	6.99	8500	2	450	400	0.96	400-3-50	56
ACM 3627	26.20	75.11	9.32	7950	2	450	400	0.96	400-3-50	56
ACM 4031	30.10	61.82	7.67	17100	2	500	1560	2.70	400-3-50	56
ACM 4039	39.20	92.73	11.51	16100	2	500	1560	2.70	400-3-50	56
ACM 4046	45.90	123.60	15.35	15300	2	500	1560	2.70	400-3-50	56
ACM 4050	49.90	154.60	19.19	14400	2	500	1560	2.70	400-3-50	56
ACM 6069	68.70	185.50	23.03	22950	3	500	2340	4.05	400-3-50	58
ACM 6075	74.90	231.80	28.79	21600	3	500	2340	4.05	400-3-50	58

ANEXO 7 - Modelo do grupo compressor do circuito do túnel de congelação escolhido e suas características.

Modelo seleccionado: LH44/2F-2.2Y

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Typ		Umgeb.-Temp.	Kälteleistung						Leistungsaufnahme		
Type		Ambient temp.	Cooling capacity						Power consumption		
Type		Temp. ambiante	Puissance frigorifique						Puissance absorbée		
		°C	Verdampfungstemperatur °C			Evaporation temperature °C			Température d'évaporation °C		
			10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
LH32/2KC-05.2Y	27	Q	2720	2280	1880	1530	1270	935	695	490	320
		P	0.71	0.65	0.59	0.53	0.47	0.42	0.37	0.32	0.27
	32	Q	2570	2150	1770	1430	1130	860	630	435	270
LH32/2JC-07.2Y	27	Q	3120	2620	2170	1760	1390	1070	790	545	335
		P	1.00	0.92	0.84	0.75	0.67	0.59	0.50	0.42	0.33
	32	Q	2730	2290	1890	1520	1190	895	640	415	275
LH33/2GC-2.2Y	27	Q	5050	4300	3620	3000	2450	1960	1530	1160	845
		P	1.34	1.24	1.14	1.05	0.96	0.88	0.79	0.70	0.60
	32	Q	4770	4060	3410	2830	2300	1830	1430	1070	770
LH44/2GC-2.2Y	27	Q	5100	4310	3590	2950	2390	1900	1470	1100	795
		P	1.33	1.24	1.15	1.06	0.98	0.89	0.80	0.71	0.60
	32	Q	4470	3760	3130	2560	2060	1620	1230	900	620
LH44/2FC-2.2Y	27	Q	6470	5520	4640	3860	3150	2520	1970	1500	1090
		P	1.59	1.46	1.34	1.22	1.11	1.00	0.89	0.77	0.66
	32	Q	6060	5160	4340	3590	2920	2320	1810	1360	980
LH44/2FC-2.2Y	27	Q	5190	4410	3690	3040	2460	1940	1480	1090	755
		P	1.90	1.73	1.58	1.42	1.27	1.11	0.96	0.81	0.65

ANEXO 8 - Modelo do evaporador do circuito do túnel de congelação escolhido e forma como foi seleccionado.

Factor de correcção “RC_m”:

Factores de correcção "RC _m " (DT _m)							MT
Correction factors "RC _m " (DT _m)							
DT _m	10	9	8	7	6	5	4
8	1.460	1.325	1.165	1.045	0.899	0.795	0.681
7	1.399	1.266	1.119	0.993	0.854	0.752	0.637
5	1.298	1.168	1.039	0.909	0.781	0.679	0.564
2	1.200	1.080	1.000	0.857	0.741	0.638	0.517
0	1.140	1.026	0.912	0.797	0.682	0.585	0.470
-2	1.111	1.001	0.909	0.794	0.680	0.582	0.466

Factor “FC”:

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

Factores de correcção "FC" Correction factors "FC"				R134a
TE (°C)	5	0	-5	-10
FC	1	0.98	0.98	0.95

Modelo seleccionado: MT/E 424/P

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

DADOS TÉCNICOS - TECHNICAL DATA																
Gama Range	Modelo Model	Superfície Surface	Volume Internal Volume	R404A, Pc Nominal [kW] - ENY 328		Ventiladores / Fans							1.35 x SC1 DT _i =10°C Tse=10°C TE=0°C	1.15 x SC2 DT _i =8°C Tse=0°C TE=8°C	1.05 x SC3 DT _i =7°C Tse=-18°C TE=-25°C	1.0 x SC4 DT _i =-6°C Tse=-25°C TE=-31°C
				Q _{s1} DT _e =-8°C TE=-6°C	Q _{s2} DT _e =-10°C TE=-6°C	Nr	Ø [mm]	Pe [W]	Corr. Curr. [A]	Caudal ar Air Volume [m³/h]	Projeção Air throw [m]	Tipo corr. Curr. type 50 Hz [V]				
				[kW]	[kW]											
MT - 4.2 mm*	412	12.10	3.25	2.70	2.56	1	300	120	0.55	1300	11	-230	2.62	1.78		
	415	14.50	3.90	2.86	2.71	1	300	120	0.55	1200	9	-230	2.77	1.89		
	417	17.77	4.33	3.48	3.29	1	300	120	0.55	1540	9	-230	3.37	2.29		
	419	24.64	6.06	4.02	3.80	1	300	120	0.55	1400	9	-230	3.89	2.65		
	420	19.71	4.62	4.93	4.66	2	300	240	1.10	2800	11	-230	4.77	3.25		
	424	24.20	5.77	5.56	5.25	2	300	240	1.10	2600	11	-230	5.37	3.66		
	429	29.00	6.92	5.87	5.54	2	300	240	1.10	2400	9	-230	5.67	3.86		
	430	29.85	6.63	6.83	6.46	3	300	360	1.65	4200	11	-230	6.61	4.5		
	436	36.20	8.29	8.41	7.95	3	300	360	1.65	3900	11	-230	8.14	5.54		
	443	43.50	9.95	8.89	8.40	3	300	360	1.65	3600	9	-230	8.59	5.85		
	444	40.00	8.65	9.74	9.21	4	300	480	2.20	5600	11	-230	9.42	6.42		
	448	48.30	10.81	11.27	10.64	4	300	480	2.20	5200	11	-230	10.89	7.42		
	458	58.00	12.97	11.59	10.96	4	300	480	2.20	4800	9	-230	11.21	7.64		
	461	60.40	13.33	13.97	13.20	5	300	600	2.75	6500	11	-230	13.50	9.20		
	4032	31.40	7.78	6.98	6.60	1	400	320	0.63	3100	14	3-400	6.75	4.60		
	4042	42.00	10.37	8.10	7.66	1	400	320	0.63	2900	12	3-400	7.83	5.34		
	4043	42.70	9.55	11.24	10.62	2	400	640	1.26	7000	12	3-400	10.86	7.4		
	4063	64.60	14.33	14.27	13.49	2	400	640	1.26	6200	12	3-400	13.8	9.4		
	4084	83.70	19.10	16.35	15.44	2	400	640	1.26	5800	12	3-400	15.80	10.76		
	4079	78.50	17.40	18.89	17.85	3	400	960	1.89	9300	15	3-400	18.26	12.44		
	4096	95.70	21.84	20.95	19.80	2	450	1300	2.60	8000	18	3-400	20.25	13.80		
	4125	125.60	27.84	24.76	23.40	3	400	960	1.89	8700	12	3-400	23.93	16.31		
	4138	139.10	31.13	29.38	27.77	2	500	1500	3.00	10620	20	3-400	28.41	19.35		
	4144	143.50	31.82	31.59	29.85	3	450	1950	3.90	12000	18	3-400	30.53	20.80		
	4192	191.40	41.80	42.22	39.90	4	450	2600	5.20	16000	18	3-400	40.81	27.81		
	4210	208.70	45.64	44.06	41.63	3	500	2250	4.50	15930	20	3-400	42.59	29.01		
	4242	250.70	52.64	54.57	51.58	4	500	3000	6.00	21880	20	3-400	52.77	35.95		
	4279	278.00	60.16	58.65	55.42	4	500	3000	6.00	21240	20	3-400	56.70	38.63		

ANEXO 9 - Modelo do liofilizador escolhido e suas características.

Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS										
LGF	3C	3CS	5C	5CS	15C	15CS	25C	25CS	50C	50CS
Cip (Limpeza Interna)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Sip (Esterilização Interna)		X		X		X		X		X
Área Nominal (m ²)	3		5		15		25		50	
Capacidade Máx Condensador por Ciclo (Kg)	60		100		320		500		1000	
Capacidade Máx Líquido (L)	60		100		300		1000		1000	
Capacidade Frascos Ø 16 (mm)	12300		18450		65600		102500		205000	
Capacidade Frascos Ø 22 (mm)	6300		9450		33600		52500		105000	
Dimensões da Bandeja (mm)	600 X 900		900 X 900		1200 X 1490				1490 X 1990	
Espaçamento (mm)					100					
Quantidade de Bandejas	6 + 1			9 + 1			14 + 1		17 + 1	
Temperatura de Trabalho (°C)					de -55 A +80					
Uniformidade de Temperatura da Bandeja (°C)					± 1					
Temperatura do Condensador (°C)					≤ -70					
Vácuo Final (Pa)					≤ 0,0075					
Consumo de água para Sistema Cip-Wip (Limpeza)					100 (lpm)					
Qtd. de Vapor para Sistema Sip (Esterilização) (Kg/Hr)	-	60	-	100	-	300	-	500	-	650
Consumo de Ar Comprimido (m ³ /min)					0.1					
Voltagem (V)	Trifásico (380 V 50 Hz / 440 V 60 Hz)									
Potência (KW)	21		24		75			125		210
Dimensões do Equipamento P X L X A (mm)	3540 X 1210 X 2800	3800 X 1210 X 2800	4000 X 1520 X 2800	4200 X 1520 X 3000	5700 X 2000 X 3700		6700 X 2000 X 4200		8000 X 2500 X 4500	
Peso Total (Ton)	2.8	3.8	4.2	4.5	9	12	13	20	25	35

REQUISITOS: Água (Sistemas de Limpeza / Esterilização e Descongelamento) / Ar Comprimido (Sistema Pneumático) / Rede Elétrica Compatível.

OPCIONAIS: Compressor parafuso; bomba seca; fluido (óleo de silicone) para sistema de resfriamento e aquecimento; sistema de resfriamento In2; sistema de dosagem de medidas; dispositivo para retirada de amostras de frascos; porta para alimentação de frascos automatizada.

** Consulte-nos sobre outras medidas. OBS: Dados podem ser alterados sem aviso prévio.*

Nota: O modelo escolhido está marcado a azul, e a vermelho o factor decisivo na escolha.

Imagens relativas ao modelo do liofilizador seleccionado:



Processo de Liofilização de Produtos Alimentares Perecíveis

