



**Aplicativos Informáticos para Refrigeração  
Industrial - Estágio na empresa J & E Hall Limited,  
Leeds, Reino Unido**

Relatório de estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em  
Equipamentos e Sistemas Mecânicos

**Autor**

**Tiago Augusto Fernandes Gomes**

**Orientador**

**Prof. Doutor João Manuel Nogueira Malça de Matos Ferreira**

ISEC- Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

**Coimbra, Abril, 2014**

## Epígrafe

**“Todo o conhecimento se inicia na  
imaginação e no sonho, só depois  
desce à realidade material e  
terrena por meio da lógica”**

Albert Einstein

## **Prefácio**

Enquanto trabalhava as pequenas partes deste relatório, pude por vários momentos rever todo o meu percurso académico, desde a candidatura até ao presente momento. Neste percurso surgiram vários obstáculos, que com maior ou menor facilidade fui ultrapassando. Posso afirmar com certeza que a admissão no I.S.E.C., foi uma das muitas coisas boas que a vida me proporcionou, pois permitiu-me conhecer/trabalhar com novos colegas e professores durante o meu percurso académico, o que me permitiu usufruir de experiências e momentos verdadeiramente incríveis.

Posso dizer que encaro a Engenharia como uma disciplina que se encontra em constante desenvolvimento, o que faz com que os desafios sejam cada vez maiores. Para finalizar, resta-me dizer que chego ao fim da minha vida académica com sentido de dever cumprido e preparado para realizar o melhor desempenho possível na minha vida profissional. Para tal foi imprescindível o contributo dos meus colegas e professores que me acompanharam nesta etapa da minha vida.

## **Agradecimentos**

Mais do que um trabalho individual, esta dissertação é o resultado da colaboração e contributos de diversas pessoas num processo que foi tudo menos solitário. Por esta razão quero expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar aos meus pais e irmão, pelo estímulo e apoio incondicional desde o início desta etapa, pela paciência e grande amizade com que sempre me aconselharam.

Ao Professor Doutor João Malça, por todo o seu contributo, disponibilidade e amizade que demonstrou ao longo da realização do estágio académico.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, instituição a que me orgulho de pertencer, agradeço a possibilidade de puder fazer parte da história desta grande instituição.

Ao Nuno Alves, colega e amigo na aventura que foi a realização do estágio académico fora do território Nacional, pela paciência e pelo sentido de companheirismo que sempre demonstrou ao longo dos seis meses que passamos em Leeds, Reino Unido.

Aos colegas e amigos da empresa J&E Hall, pela forma respeitosa e generosa com que nos acolheram e orientaram ao longo dos seis meses que passamos na empresa.

Às restantes pessoas que partilharam comigo o meu percurso académico, pois sem elas o resultado final desse percurso não seria tão satisfatório e completo como acabou por ser.

## Resumo

O presente relatório de estágio tem como principal função explicar o trabalho desenvolvido na filial da empresa J&E Hall International, situada na cidade de Leeds, Reino Unido.

O início do estágio deu-se no dia 7 de Outubro de 2013.

Com a chegada à empresa foi requerido o desenvolvimento de programas que tornassem o fluxo de trabalho mais acessível e rápido.

- O primeiro programa requerido foi o dimensionamento das tubagens para sistemas que utilizassem os seguintes fluidos frigorígenos: Glicol e Amónia.
- Terminado o desenvolvimento do programa, foi requerido o desenvolvimento de um novo programa que calculasse a Potência Frigorífica de uma instalação frigorífica.
- Concluído o programa anterior, foi-nos pedido que elaborássemos um novo programa desta vez para o dimensionamento de um depósito para um fluido frigorígeno.
- Com a conclusão desse programa foi requerido o dimensionamento de válvulas de segurança seguindo a norma EN13136.
- Por último foi requerido um programa que realizasse as diversas operações de um diagrama psicrométrico. De referir que todos os programas foram pedidos para serem desenvolvidos no formato Excel, pela empresa.

Entre a elaboração dos programas foi pedido que os programas fossem utilizados em projetos da empresa.

Os funcionários da empresa ao longo do estágio foram explicando cada passo que realizavam na elaboração de um projeto, o que levou a uma melhor compreensão dos diversos passos a seguir na realização de um projeto.

A conclusão do estágio teve lugar no dia 4 de Maio de 2014.

## **Abstract**

The following internship report has the primary function of explaining the work that was developed in J&E Hall Company, based in the city of Leeds, United Kingdom.

The Internship started on October 7<sup>th</sup>2013. Upon arrival I was required to develop programs to make the work flow faster and more accessible.

- The first program required was the dimensioning of tubing for systems that used the following refrigerant fluids: Glycol and Ammonia.
- After completing this, I was required to develop a new program that calculated the refrigeration capacity of a refrigeration installation.
- Concluded this, I was asked to develop a new program for the dimensioning of a deposit for refrigerant liquid.
- After concluding this program, I was asked to dimension safety valves according to the EN13136 norm.
- At last I was required to do a program that realized the different operations of a psychometric diagram.

The company required all programs to be developed in Excel format.

Each developed program was then used in ongoing company projects.

The employees of J&E Hall throughout the internship explained each step in the elaboration of a project, which led to a better understanding of the different steps required in a project.

The Internship was concluded on May 4<sup>th</sup>, 2014

# Índice

Capa.....	1
Contra-Capa.....	2
Epígrafe.....	3
Prefácio.....	4
Agradecimentos.....	5
Resumo.....	6
Abstract.....	7
Índice.....	8
Índice de figuras.....	9
Índice de tabelas.....	11
Simbologia.....	12
Introdução.....	15
Capítulo 1- Cargas térmicas de uma instalação frigorífica.....	17
1.1 Software para calcular as cargas térmicas de uma instalação frigorífica.....	19
1.1.1 Cargas térmicas por transmissão.....	21
1.1.2 Carga térmica através dos produtos.....	23
1.1.3 Carga térmica interna.....	29
1.1.4 Carga térmica dos equipamentos.....	31
1.1.5 Carga térmica das infiltrações.....	32
1.1.6 Carga térmica conversão final.....	36
Capítulo 2- Dimensionamento de tubagens para fluidos frigoríficos (glicol e amônia).....	37
2.1 Dimensionamento de tubagens em instalações com glicol.....	37
2.2 Dimensionamento de tubagens em instalações com amônia.....	43
2.2.1 Dimensionamento de tubagens em instalações com amônia no estado líquido.....	43
2.2.2 Dimensionamento de tubagens em instalações com amônia no estado bifásico.....	44
2.2.3 Dimensionamento de tubagens em instalações com amônia no estado de vapor.....	48
Capítulo 3 – Dimensionamento de depósitos para instalações frigoríficas.....	53
Capítulo 4 – Atividades complementares desenvolvidas no estágio.....	61
Conclusão.....	63
Bibliografia.....	65



## Índice de figuras

Figura 1 –Cadeia do frio.....	17
Figura 2 – Ciclo de Refrigeração simples (DANFOSS,2013). ....	19
Figura 3 -Diferentes tipos de cargas térmicas (DANFOSS,2013).....	20
Figura 4 - Cargas térmicas por transmissão.....	21
Figura 5 - Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das cargas térmicas numa câmara frigorífica. .....	22
Figura 6 - Esquema dos vários tipos de calor (DANFOSS,2013).....	23
Figura 7- Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das cargas térmicas Introduzidas pelos Produtos.. ....	29
Figura 8 - Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das Térmicas Internas. ....	30
Figura 9 - Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das Térmicas dos equipamentos .....	32
Figura 10 - Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das Térmicas pelas infiltrações .....	35
Figura 11 – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação da potência frigorífica final. .....	36
Figura 12 - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para glicol como fluido frigorígeno.....	42
Figura 13 - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para amónia, no estado líquido, como fluido frigorígeno. ....	43
Figura 14 - Aplicativo informático desenvolvido para quantificar as perdas de carga locais..	47
Figura 15 - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para amónia, no estado bifásico, como fluido frigorígeno .....	47
Figura 16 -Valores das perdas de cargas locais, dos diversos acessórios.....	50
Figura 17 - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para amónia, no estado <i>de vapor</i> , como fluido frigorígeno.....	50
Figura 18 - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento do depósito.....	54
Figura 19 - Capacidade dos depósitos para o fluido R'717, Refrigeration pressure vessels	

.....	54
Figura 20 - Aplicativo informático desenvolvido para fornece o resultado final.....	55
<i>Figura 21</i> – Esquema de um acumulador horizontal de um sistema de refrigeração (STOECKER WF, 1998).	
.....	56
Figura 22 - Tempo de residência de uma gota de amoníaco <i>versus</i> a distância vertical entre a entrada do depósito e a linha de líquido (STOECKER WF, 1998).	
.....	57
Figura 23 - Aplicativo informático desenvolvido para fornece o resultado final.....	59
Figura 24 – Condensadores. ....	61
Figura 25 – Compressor fabricado pela "J & E Hall". ....	62

## Índice de tabelas

Tabela1 – Propriedades de alimentos mais frequentemente refrigerados (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2006).	25
Tabela 2 – - Calor de respiração de frutos e vegetais (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2006).	27
Tabela 3 - Calor específico de materiais mais frequentemente utilizados como embalagens (Engineering toolbox, 2014).Diferentes tipos de cargas térmicas(DANFOSS,2013).....	28
Tabela 4 - Potência calorífica média libertada por uma pessoa quando está a trabalhar em diferentes temperaturas (Danfoss, 2013)	30
Tabela 5 - Densidade do glicol, FRIOGEL NEO	37
Tabela 6 - Viscosidade cinemática do glicol, FRIOGEL NEO.....	38
Tabela 7 - Calor específico do glicol, FRIOGEL NEO.....	38
Tabela 8 - Diâmetro normalizado de tubagens.....	40
Tabela 9 - Perdas de cargas locais	46
Tabela 10 - Capacidade em kW na linha de aspiração, de ASHRAE, 2006.....	48
Tabela 11 – Capacidade em kW na linha de aspiração e descarga de ASHRAE, 2006.....	49
Tabela 12 - Coeficientes de relação entre a altura de líquido e o volume ocupado (STOECKER WF, 1998).	56
Tabela 13 - Valores usados para determinar equações de reta que relacionam a distância de queda de uma gota de amoníaco com o tempo de residência da mesma, para diferentes temperaturas de amoníaco.	58

## Simbologia

$A[m^2]$  -Área

$A [m^2]$ - Área da porta

$A [m^2]$ – Área do teto

$A[m^2]$  - Área transversal ocupada pelo vapor

$t [s] =$  *Tempo mínimo de residência*

$L[m]$  - Comprimento entre a entrada de vapor húmido e a saída de vapor

$p_{atm}[kPa]$  – Pressão atmosférica do ar

$RH[\%]$  ou  $HR[\%]$ - Humidade relativa do ar

$v_- \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ - caudal volumico

$V_- \left[ \frac{m}{s} \right]$ - Velocidade horizontal do vapor

$Q[kW]$ - Potência transferida

$U \left[ \frac{W}{m^2 \times K} \right]$ -Coeficiente global de transferência de calor

$\Delta T [K]$ - Diferença de temperatura entre o interior da câmara e o exterior

$K \left[ \frac{W}{m \times K} \right]$ - Condutividade térmica

$e [m]$ - Espessura do isolamento

$m[kg]$ – Quantidade do produto

$cp \left[ \frac{kJ}{kg \times K} \right]$ – Calor específico

$L \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ - Calor latente do produto

$h \left[ \frac{mW}{kg} \right]$ – Respiração do produto

$np$  – Número de pessoas;

$Ph \left[ \frac{kW}{pessoa} \right]$ – Calor libertado por pessoa

$Pv \left[ \frac{kW}{m^2} \right]$ – Potência da luminária

$n$  – Número de equipamentos;

$P[kW]$  – Potência

$nv$  – Número de ventiladores;

$Pf[kW]$  – Potência do ventilador

E [0-1] – Eficiência de descongelamento

Ps[kW] – Potência elétrica

$qv \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  - Caudal volumico

$qm \left[ \frac{kg}{s} \right]$  - Caudal massico

Cinf- Coeficiente de infiltração

H [m]- Altura da porta

$\rho_0 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar exterior

$\rho_i \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar interior

$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Massa volumica

$\dot{m} \left[ \frac{kg}{s} \right]$  - Caudal mássico

$V \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  - Caudal do ar

$\rho_s \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar ventilado

$h_o \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  - Entalpia do ar exterior

$h_i \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  - Entalpia do ar interior

ps[kPa]- Pressão de saturação do vapor de água

Tdb[°C]- Temperatura de bolbo seco,

pv[kPa]- Pressão parcial de vapor de água.

$v \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$  - Volume especifico

$\phi$ [kW]- Potência frigorifica

k[1.1-1.3]- Factor de segurança

$h \left[ \frac{h}{dia} \right]$  - tempo de funcionamento do evaporador

Qt[kW]- Potência frigorifica,

$cp1 \left[ \frac{kJ}{kg \times K} \right]$  - Calor especifico do fluído na saída,

T1[°C]- Temperatura do fluído na saída,

$cp2 \left[ \frac{kJ}{kg \times K} \right]$  - - Calor específico do fluído na entrada

T2[°C]- temperatura do fluído na entrada,

$D_c$ [mm]- Diâmetro calculado,

$v$  $\left[\frac{m}{s}\right]$ - Velocidade do fluido.

$D_r$ [mm]- Diâmetro real,

$\mu$  [Pa. s]- Viscosidade cinemática.

$\epsilon$ [mm]- Rugosidade do material que constitui a tubagem,

Re- Número de Reynolds

$f$  [ $\mu$ ]- Coeficiente de fricção,

$L$ [m]- Comprimento da tubagem,

$g$   $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ - Aceleração gravítica

$\Sigma k$ - Somatório das perdas de carga de cada acessório usado na tubagem,

$r$ [m]- Raio da tubagem,

$\rho_{tp}$  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ - Densidade da mistura de fases;

$H$  [m]- Altura vertical da tubagem;

$\Theta$ - Ângulo provocado pela tubagem.

$\epsilon$ - Voidfraction;

$\rho_g$  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ - Densidade do gás.

$\frac{u_g}{u_l}$  – *Rácio da velocidade entre o gás e o líquido;*

$x$ - Título da mistura bifásica;

$\rho_l$  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ - Densidade do líquido.

Table  $\Delta t$  [°C]-- queda da temperatura utilizada na tabela,

Actual  $L_e$  [m]- Comprimento equivalente real,

Table  $L_e$  [m]- Comprimento equivalente referente à tabela,

Actual capacity [kW] - potência frigorífica,

Table capacity [kW] - potência frigorífica referente da tabela.

## Introdução

Num mundo Industrial em constante evolução, o saber desenvolver/produzir algo, torna-se por si só limitado, logo é extremamente importante aliar ao saber, a eficiência e uma boa capacidade para se relacionar com o próximo. Todas estas capacidades foram desenvolvidas no estágio, no decorrer das seguintes tarefas:

- Elaboração de softwares informáticos;
- Elaboração de projetos;
- Elaboração de orçamentos;
- Contactos com fornecedores;
- Visitas a instalações em desenvolvimento;
- Visita a uma filial da empresa (ADC);

O estágio foi realizado na Empresa de refrigeração J & E Hall. A referida empresa é uma multinacional com mais de um século de existência, sendo líder global na indústria de refrigeração e climatização. A empresa teve um crescimento exponencial, desde que foi adquirida pela empresa Daikin.

No decorrer deste relatório serão explanadas todas as atividades realizadas, no decorrer do estágio curricular.





# Capítulo 1 - Cargas térmicas de uma instalação frigorífica

## Princípio de Refrigeração:

Refrigeração é um processo que contribui para a redução de temperatura através da remoção de calor. O principal objectivo é a remoção de calor de um espaço até este atingir uma temperatura previamente definida, com essa temperatura alcançada, o seguinte objectivo é manter essa temperatura. O termo “refrigeração” faz referência a qualquer processo, tanto natural como artificial, em que ocorra a dissipação de calor.

Este princípio é de extrema importância e extremamente usado para o armazenamento de alimentos perecíveis. Estes espaços onde se depositam os alimentos designam-se de câmaras frigoríficas. Para um correcto uso de uma câmara frigorífica, esta está dependente de uso correcto da cadeia de frio (figura 1). “A cadeia de frio é uma cadeia de abastecimento com controlo da temperatura para o armazenamento e a distribuição de produtos alimentícios, para assim manter a sua qualidade.”



**Figura 1** – Cadeia de frio

O correcto uso da cadeia de frio tem como consequência a manutenção da qualidade do produto. “A qualidade do produto é um termo utilizado para descrever tanto os factores físicos como os de percepção subjectiva.

-Os **factores de percepção subjectiva** são o sabor, a cor, o odor, a consistência, etc.

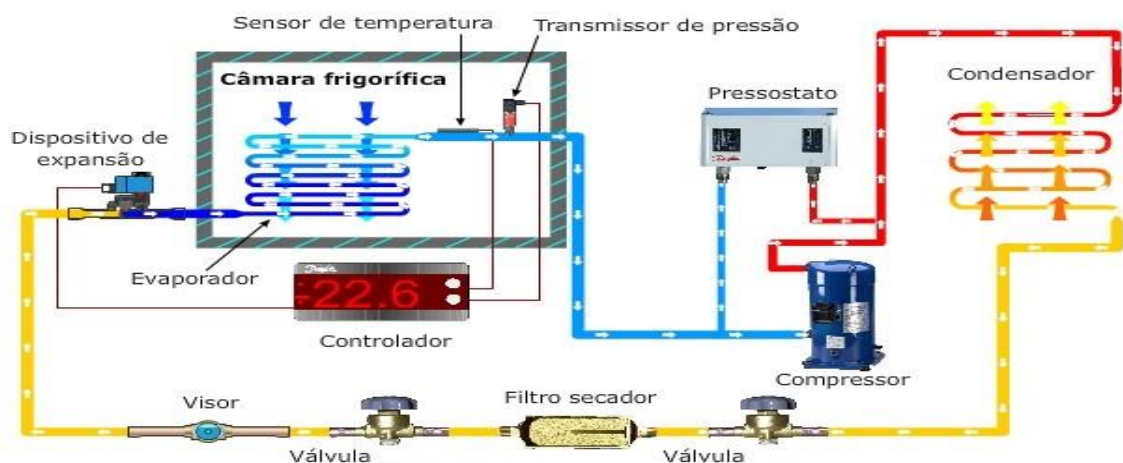
-Os **factores físicos** são os tipos e níveis de contaminação bacteriana e processos químicos, bem como os tipos e quantidades de conservantes adicionados.”

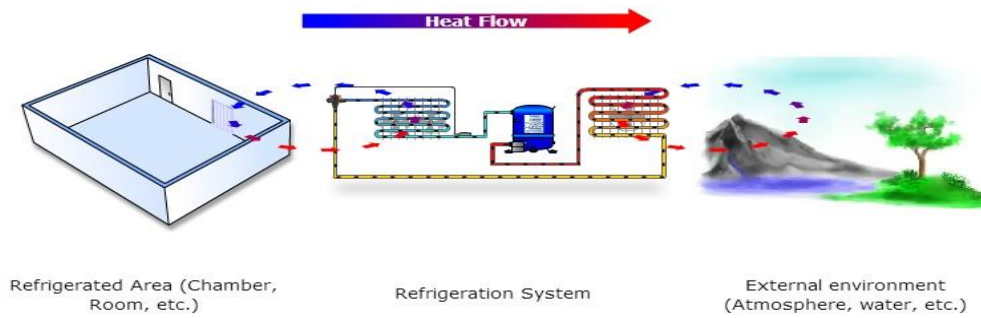
Na construção de uma câmara frigorífica devem-se ter em conta vários factores, com o objectivo de um correcto e seguro uso. Alguns desses factores são:

- Espessura do isolamento das paredes da câmara;
- Aquecimento da moldura da porta, para evitar a formação de gelo que impeça sua abertura;
- Deve ser instalado um aquecimento de piso para evitar o congelamento do mesmo;
- Número de trocas de ar;
- Ventilação sob o piso;
- Válvula de alívio de pressão na parede para igualar a pressão entre a câmara e o ar ambiente externo;
- Cortina de PVC em tiras/porta rápida;
- Alarme de "pessoa na câmara frigorífica" é obrigatório para câmaras frigoríficas de temperaturas negativas e se o volume for maior que 10 m<sup>3</sup> (ISO 27000). Em outros casos, ainda assim é recomendado ter esse tipo de alarme. O alarme deve ser sonoro/visual.

**Nota:** *Se não existir qualquer equalização de pressão numa câmara frigorífica, o ar irá contrair-se. Com isso, as paredes e o teto entrarão em colapso”*

A obtenção da temperatura desejada para, a conservação ou congelamento de um determinado alimento, é atingida através de ciclo de refrigeração, figura 2. Um ciclo de refrigeração, não é mais do que aparelhos mecânicos e eléctricos, que retiram o calor no interior da câmara e o “libertam” para o um meio recetor.





**Figura 2** – Ciclo de Refrigeração simples, DANFOSS,2013

Os elementos “mais “ importantes no ciclo de refrigeração são: compressor, condensador, evaporador e válvula de expansão. Uma definição simples sobre cada elemento é apresentada de seguida.

-Sistema de compressão: sistema em que o gás ou vapor refrigerante é comprimido por um dispositivo mecânico;

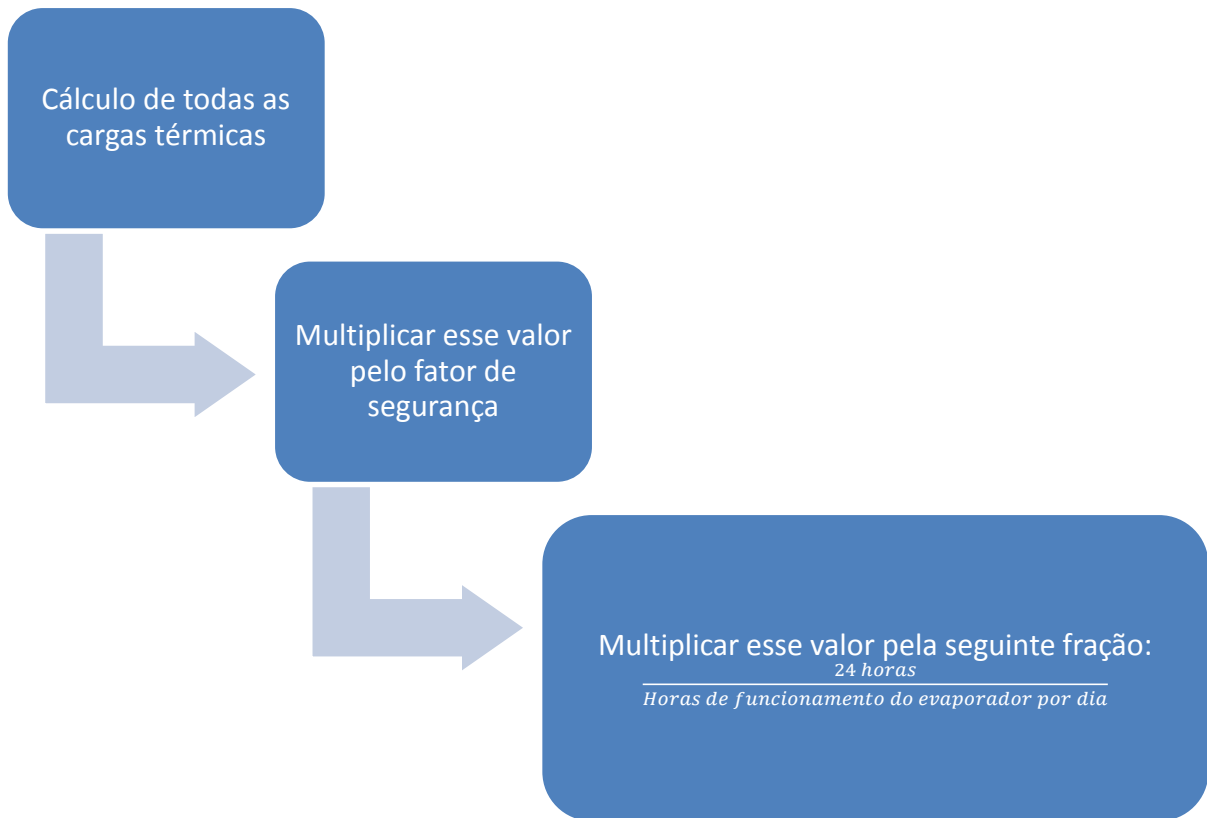
-Condensador: um recipiente ou um arranjo de tubos no qual o vapor é arrefecido e é liquidificado pela remoção de calor;

-Evaporador: parte de um sistema de refrigeração em que o fluido frigorífero absorve calor e é alterado para vapor;

-Válvula de expansão: parte de um sistema de refrigeração em que o fluido frigorífero sofre uma expansão, para atingir o valor de pressão desejada.

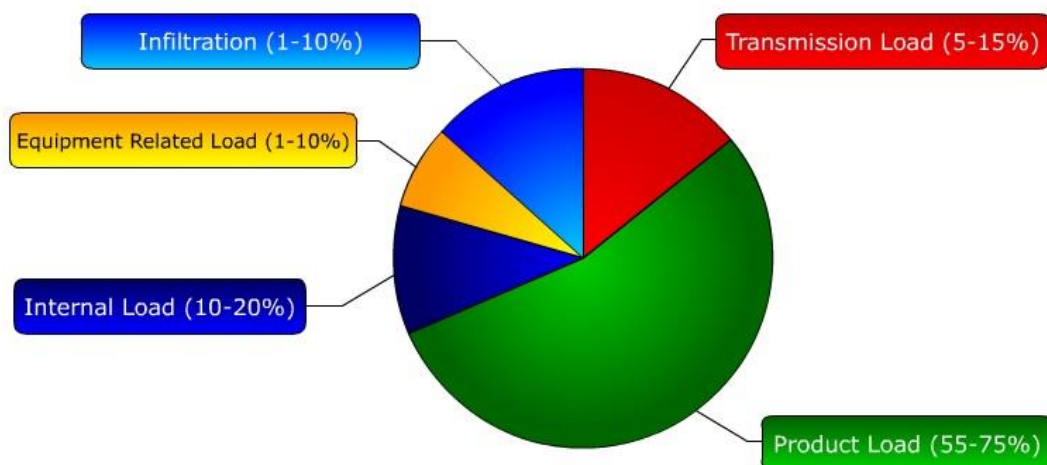
### 1.1 Software para calcular as cargas térmicas de uma instalação frigorífica

A empresa J&E Hall, (onde se realizou o estágio curricular), tinha um modus operandi antiquado, isto devido à utilização de tabelas e de valores de projectos anteriormente realizados, para dimensionamento de novos projectos. Devido a esta razão foi-nos requerido o desenvolvimento de um programa que permitisse calcular a potência frigorífica de uma determinada instalação. O desenvolvimento desse programa foi conseguido através do seguinte princípio.



As cargas térmicas (fontes de calor) de uma instalação frigorífica são divididas em cinco categorias (figura 3). Essas categorias são:

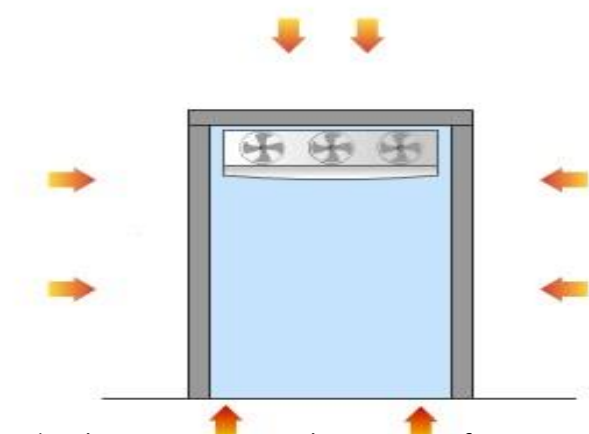
- Cargas térmicas por transmissão;
- Cargas térmicas através de produtos;
- Cargas térmicas internas;
- Cargas térmicas dos equipamentos;
- Infiltrações.



**Figura 3** – Diferentes tipos de cargas térmicas, Danfoss, 2013

### 1.1.1 Cargas térmicas por transmissão

Para obter as cargas térmicas por transmissão de calor (figura 4), somam-se todas as cargas térmicas introduzidas na câmara frigorífica, sendo elas introduzidas pelas paredes, teto e pavimento.



**Figura 4-** Cargas térmicas por transmissão, Danfoss, 2013

A quantificação desse montante pode ser atingida de duas formas, dependendo dos dados que forem disponibilizados. A primeira forma é se for disponibilizado o valor do coeficiente global de transmissão de calor:

$$Q[\text{kW}] = \frac{U \times A \times \Delta T}{1000};$$

Legenda:

Q [kW] - Potência transferido

$U[\frac{W}{m^2 \times K}]$  - Coeficiente global de transferência de calor

A[m<sup>2</sup>] - Área

$\Delta T$  [K] - Diferença de temperatura entre o interior da câmara e o exterior

A segunda forma é se for disponibilizado o valor da condutividade térmica:

$$Q[\text{kW}] = \frac{\frac{k}{e} \times A \times \Delta T}{1000};$$

Legenda:

Q [kW]- Potência transferida

$K[\frac{W}{m \times K}]$ - condutividade térmica

e [m]- espessura do isolamento

$A[m^2]$ - Área

$\Delta T [K]$ -Diferença de temperatura entre o interior da câmara e o exterior

A interface do programa referente à transmissão de calor através das paredes (figura 5), teto e do pavimento, ficou com a seguinte apresentação:

The screenshot shows a software window titled "Square" with a red close button in the top right corner. The main area contains a central square diagram representing a room. The room's temperature is input as "Room Temperature [°C]". The room's dimensions are labeled "a" (width) and "b" (height). Surrounding the room are input fields for ambient temperature and length, each with a choice between "U" and "K and Thickness". At the bottom, there are sections for "Other Values" including "Ceiling" (with temperature and height inputs) and "Floor" (with temperature input), each also offering a choice between "U" and "K and Thickness". Navigation buttons "DONE" and "Back" are located at the bottom right.

**Figura 5** – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das cargas térmicas numa câmara frigorífica.

Nesta interface, o utilizador terá de introduzir os seguintes valores:

- Temperatura ambiente, Temperatura exterior;
- Comprimento das fachadas;
- Coeficiente global de transferência de calor ou espessura e condutividade térmica da parede;
- Temperatura da câmara frigorífica;

De referir que o utilizador terá a possibilidade de optar entre introduzir o coeficiente global de transferência de calor ou a espessura e condutividade térmica da parede.

### 1.1.2 Carga térmica através dos produtos

A carga térmica introduzida pelos produtos é o total de calor introduzido na câmara frigorífica através dos produtos introduzidos nela. Neste caso há um dado importante que deve ser facultado antes de iniciar os cálculos. Isto é, se o produto terá de ser congelado. Isto porque se não for necessário o congelamento, a carga térmica do alimento é calculada da seguinte forma:

$$Q[\text{kW}] = \frac{m \times Cp \times \Delta T}{3600};$$

Legenda:

Q[kW] - Potência transferida

m[kg] – Quantidade do produto

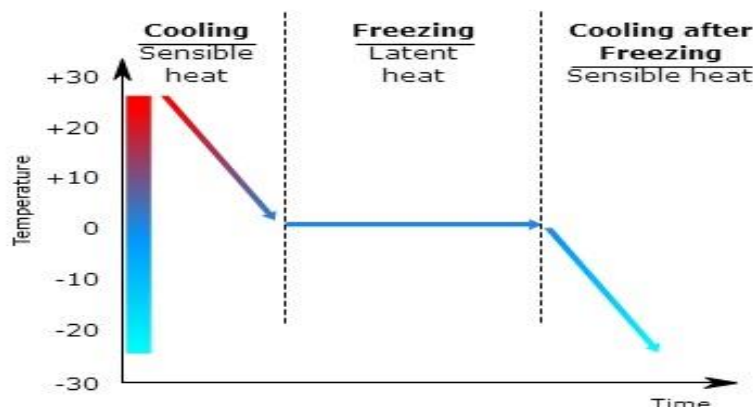
cp [ $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \times \text{K}}$ ] – Calor específico

$\Delta T$  [K] - Diferença de temperatura entre o interior da câmara e o exterior

Caso seja necessário o congelamento, a carga térmica do alimento é dividida em três partes, (figura 6). o arrefecimento antes da congelação, a congelação e o arrefecimento após a congelação (figura 6). Isto devido à necessidade de determinar a quantidade de calor latente introduzida pelo produto.

#### Definição:

- **Calor latente:** energia libertada ou absorvida numa mudança de estado com temperatura e pressão constantes.
- **Calor sensível:** energia libertada ou absorvida associada a variações de temperatura, portanto, perceptível aos sentidos.



**Figura 6-** Esquema dos vários tipos de calor, Danfoss, 2013

As equações usadas para determinar a quantidade de calor libertado pelo produto, quando ocorre congelamento foram:

Arrefecimento antes da congelação:

$$Q \text{ [kW]} = \frac{m \times Cp1 \times \Delta T1}{3600};$$

Congelamento:

$$Q \text{ [kW]} = \frac{m \times L}{3600};$$

Arrefecimento depois da congelação;

$$Q \text{ [kW]} = \frac{m \times Cp2 \times \Delta T2}{3600};$$

Legenda:

Q [kW] - Potência transferida

m [kg] – Quantidade do produto;

$cp1[\frac{kJ}{kg \times K}]$  – Calor específico antes do ponto de congelamento;

$L[\frac{kJ}{kg}]$ - Calor latente do produto ;

$cp2[\frac{kJ}{kg \times K}]$  – Calor específico depois do ponto de congelamento;

$\Delta T1$  [°C] - Diferença de temperatura do produto á entrada da câmara e os 0°C ;

$\Delta T2$  [°C] - Diferença de temperatura entre os 0°C e a temperatura de congelamento do produto;

Os valores utilizados para quantificar o calor específico e calor latente, necessário nas equações anteriores, foram retiradas ASHRAE (2006)



Table 3 Unfrozen Composition Data, Initial Freezing Point, and Specific Heats of Foods\* (Continued)

Food Item	Moisture Content, Protein,		Carbohydrate			Ash, % $x_a$	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing, kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	% $x_w$	% $x_p$	Fat, % $x_f$	Total, % $x_c$	Fiber, % $x_b$					
<b>Pork</b>										
Backfat	7.69	2.92	88.69	0.0	0.0	0.70	—	2.17	2.98	26
Bacon	31.58	8.66	57.54	0.09	0.0	2.13	—	2.70	2.70	105
Belly	36.74	9.34	53.01	0.0	0.0	0.49	—	2.80	3.37	123
Carcass	49.83	13.91	35.07	0.0	0.0	0.72	—	3.08	3.10	166
Ham, cured, whole, lean	68.26	22.32	5.71	0.05	0.0	3.66	—	3.47	2.22	228
country cured, lean	55.93	27.80	8.32	0.30	0.0	7.65	—	3.16	2.31	187
Shoulder, whole, lean	72.63	19.55	7.14	0.0	0.0	1.02	-2.2	3.59	2.20	243
<b>Sausage</b>										
Braunschweiger	48.01	13.50	32.09	3.13	0.0	3.27	—	3.01	2.40	160
Frankfurter	53.87	11.28	29.15	2.55	0.0	3.15	-1.7	3.15	2.31	180
Italian	51.08	14.25	31.33	0.65	0.0	2.70	—	3.10	2.37	171
Polish	53.15	14.10	28.72	1.63	0.0	2.40	—	3.14	2.36	178
Pork	44.52	11.69	40.29	1.02	0.0	2.49	—	2.95	2.43	149
Smoked links	39.30	22.20	31.70	2.10	0.0	4.70	—	2.82	2.45	131
<b>Poultry Products</b>										
Chicken	65.99	18.60	15.06	0.0	0.0	0.79	-2.8	4.34	3.32	220
Duck	48.50	11.49	39.34	0.0	0.0	0.68	—	3.06	2.45	162
Turkey	70.40	20.42	8.02	0.0	0.0	0.88	—	3.53	2.28	235
<b>Egg</b>										
White	87.81	10.52	0.0	1.03	0.0	0.64	-0.6	3.91	1.81	293
dried	14.62	76.92	0.04	4.17	0.0	4.25	—	2.29	2.10	49
Whole	75.33	12.49	10.02	1.22	0.0	0.94	-0.6	3.63	1.95	252
dried	3.10	47.35	40.95	4.95	0.0	3.65	—	2.04	2.00	10
Yolk	48.81	16.76	30.87	1.78	0.0	1.77	-0.6	3.05	2.25	163
salted	50.80	14.00	23.00	1.60	0.0	10.60	-17.2	3.01	3.79	170
sugared	51.25	13.80	22.75	10.80	0.0	1.40	-3.9	3.07	2.54	171
<b>Lamb</b>										
Composite of cuts, lean	73.42	20.29	5.25	0.0	0.0	1.06	-1.9	3.60	2.14	245
Leg, whole, lean	74.11	20.56	4.51	0.0	0.0	1.07	—	3.62	2.14	248
<b>Dairy Products</b>										
Butter	17.94	0.85	81.11	0.06	0.0	0.04	—	2.40	2.65	60
<b>Cheese</b>										
Camembert	51.80	19.80	24.26	0.46	0.0	3.68	—	3.10	3.34	173
Cheddar	36.75	24.90	33.14	1.28	0.0	3.93	-12.9	2.77	3.07	123
Cottage, uncreamed	79.77	17.27	0.42	1.85	0.0	0.69	-1.2	3.73	1.99	266
Cream	53.75	7.55	34.87	2.66	0.0	1.17	—	3.16	2.91	180
Gouda	41.46	24.94	27.44	2.22	0.0	3.94	—	2.87	2.77	138
Limburger	48.42	20.05	27.25	0.49	0.0	3.79	-7.4	3.03	2.82	162
Mozzarella	54.14	19.42	21.60	2.22	0.0	2.62	—	3.15	2.46	181
Parmesan, hard	29.16	35.75	25.83	3.22	0.0	6.04	—	2.58	2.94	97
Processed American	39.16	22.15	31.25	1.30	0.0	5.84	-6.9	2.80	2.75	131
Roquefort	39.38	21.54	30.64	2.00	0.0	6.44	-16.3	2.80	3.36	132
Swiss	37.21	28.43	27.45	3.38	0.0	3.53	-10.0	2.78	2.88	124
<b>Cream</b>										
Half and half	80.57	2.96	11.50	4.30	0.0	0.67	—	3.73	2.16	269
Table	73.75	2.70	19.31	3.66	0.0	0.58	-2.2	3.59	2.21	246
Heavy whipping	57.71	2.05	37.00	2.79	0.0	0.45	—	3.25	2.32	193
<b>Ice Cream</b>										
Chocolate	55.70	3.80	11.0	28.20	1.20	1.00	-5.6	3.11	2.75	186
Strawberry	60.00	3.20	8.40	27.60	0.30	0.70	-5.6	3.19	2.74	200
Vanilla	61.00	3.50	11.00	23.60	0.0	0.90	-5.6	3.22	2.74	204
<b>Milk</b>										
Canned, condensed, sweetened	27.16	7.91	8.70	54.40	0.0	1.83	-15.0	2.35	—	91
Evaporated	74.04	6.81	7.56	10.04	0.0	1.55	-1.4	3.56	2.08	247
Skim	90.80	3.41	0.18	4.85	0.0	0.76	—	3.95	1.78	303
Skim, dried	3.16	36.16	0.77	51.98	0.0	7.93	—	1.80	—	11
Whole	87.69	3.28	3.66	4.65	0.0	0.72	-0.6	3.89	1.81	293
dried	2.47	26.32	26.71	38.42	0.0	6.08	—	1.85	—	8
Whey, acid, dried	3.51	11.73	0.54	73.45	0.0	10.77	—	1.68	—	12
sweet, dried	3.19	12.93	1.07	74.46	0.0	8.35	—	1.69	—	11

Tabela 1 - Propriedades de alimentos mais frequentemente refrigerados (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2006).

Os Frutos são “organismos vivos”, que utilizam substâncias de reserva no processo da respiração, sendo a intensidade respiratória influenciada pela temperatura a que são mantidos. É durante a respiração que é consumido oxigênio, produzindo dióxido de carbono e vapor de água, pois esta reacção é essencial para a libertação da energia necessária para maturação do fruto. A respiração utiliza os hidratos de carbono até estes se esgotarem,

seguindo-se o envelhecimento, que se designa por senescência e morte dos tecidos. Deste modo a respiração é responsável por grandes perdas de qualidade, assim como pela senescência natural.

A seguinte equação sintetiza o processo de respiração:



Durante a respiração o substrato (açúcar e glicose) combina-se com o O<sub>2</sub>, produzindo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e calor. O calor resulta das reacções químicas e orgânicas e designa a quantidade de energia libertada pela respiração em função da oxidação completa de uma mole de fructose.

Devido à explicação anterior, outro factor que deve ser facultado antes de iniciar os cálculos é saber qual o produto que será introduzido na câmara, isto porque se o produto for um vegetal ou fruta, terá de se entrar nos cálculos com o valor da respiração do mesmo. Esse valor é calculado da seguinte forma:

$$Q [\text{kW}] = m \times h;$$

Legenda:

Q [kW] - Calor transferido

m[kg] – Quantidade do produto

$h[\frac{\text{mW}}{\text{kg}}]$  – Respiração do produto

Os valores utilizados para quantificar a respiração dos produtos foram retiradas ASHRAE (2006).

Table 9 Heat of Respiration for Fresh Fruits and Vegetables at Various Temperatures<sup>a</sup>

Commodity	Heat of Respiration (mW/kg)						Reference
	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	
<b>Apples</b>							
Yellow, transparent	20.4	35.9	—	106.2	166.8	—	Wright et al. (1954)
Delicious	10.2	15.0	—	—	—	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Golden Delicious	10.7	16.0	—	—	—	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Jonathan	11.6	17.5	—	—	—	—	Lutz and Hardenburg (1968)
McIntosh	10.7	16.0	—	—	—	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Early cultivars	9.7-18.4	15.5-31.5	41.2-60.6	53.6-92.1	58.2-121.2	—	IIR (1967)
Late cultivars	5.3-10.7	13.6-20.9	20.4-31.0	27.6-58.2	43.6-72.7	—	IIR (1967)
Average of many cultivars	6.8-12.1	15.0-21.3	—	40.3-91.7	50.0-103.8	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Apricots	15.5-17.0	18.9-26.7	33.0-55.8	63.0-101.8	87.3-155.2	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Artichokes, globe	67.4-133.4	94.6-178.0	16.2-291.5	22.9-430.2	40.4-692.0	—	Rappaport and Watada (1958), Sastry et al. (1978)
Asparagus	81.0-237.6	162.0-404.5	318.1-904.0	472.3-971.4	809.4-1484.0	—	Lipton (1957), Sastry et al. (1978)
Avocados	<sup>a</sup> b	<sup>a</sup> b	—	183.3-465.6	218.7-1029.1	—	Biale (1960), Lutz and Hardenburg (1968)
<b>Bananas</b>							
Green	<sup>a</sup> b	<sup>a</sup> b	† <sup>b</sup>	59.7-130.9	87.3-155.2	—	IIR (1967)
Ripening	<sup>a</sup> b	<sup>a</sup> b	† <sup>b</sup>	37.3-164.9	97.0-242.5	—	IIR (1967)
<b>Beans</b>							
Lima, unshelled	31.0-89.2	58.2-106.7	—	296.8-369.5	393.8-531.5	—	Lutz and Hardenburg (1968), Tewfik and Scott (1954)
shelled	52.4-103.8	86.3-180.9	—	—	627.0-801.1	—	Lutz and Hardenburg (1968), Tewfik and Scott (1954)
Snap	<sup>a</sup> b	101.4-103.8	162.0-172.6	252.2-276.4	350.6-386.0	—	Ryall and Lipton (1972), Watada and Morris (1966)
Beets, red, roots	16.0-21.3	27.2-28.1	34.9-40.3	50.0-68.9	—	—	Ryall and Lipton (1972), Smith (1957)
<b>Berries</b>							
Blackberries	46.6-67.9	84.9-135.8	155.2-281.3	208.5-431.6	388.0-581.9	—	IIR (1967)
Blueberries	6.8-31.0	27.2-36.4	—	101.4-183.3	153.7-259.0	—	Lutz and Hardenburg (1968)
Cranberries	<sup>a</sup> b	12.1-13.6	—	—	32.5-53.8	—	Anderson et al. (1963), Lutz and Hardenburg (1968)
Gooseberries	20.4-25.7	36.4-40.3	—	64.5-95.5	—	—	Lutz and Hardenburg (1968), Smith (1966)
Raspberries	52.4-74.2	91.7-114.4	82.4-164.9	243.9-300.7	339.5-727.4	—	Haller et al. (1941), IIR (1967), Lutz and Hardenburg (1968)
Strawberries	36.4-52.4	48.5-98.4	145.5-281.3	210.5-273.5	303.1-581.0	501.4-625.6	IIR (1967), Lutz and Hardenburg (1968), Maxie et al. (1959)
Broccoli, sprouting	55.3-63.5	102.3-474.8	—	515.0-1008.2	824.9-1011.1	1155.2-1661.0	Morris (1947), Lutz and Hardenburg (1968), Scholz et al. (1963)
Brussels sprouts	45.6-71.3	95.5-144.0	187.2-250.7	283.2-316.7	267.2-564.0	—	Sastry et al. (1978), Smith (1957)
<b>Cabbage</b>							
Penn State <sup>c</sup>	11.6	28.1-30.1	—	66.4-94.1	—	—	Van den Berg and Lentz (1972)
White, winter	14.5-24.2	21.8-41.2	36.4-53.3	58.2-80.0	106.7-121.2	—	IIR (1967)
spring	28.1-40.3	52.4-63.5	86.3-98.4	159.1-167.7	—	—	Sastry et al. (1978), Smith (1957)
Red, early	22.8-29.1	46.1-50.9	70.3-824.2	109.1-126.1	164.9-169.7	—	IIR (1967)
Savoy	46.1-63.0	75.2-87.3	155.2-181.9	259.5-293.4	388.0-436.5	—	IIR (1967)
<b>Carrots, roots</b>							
Imperator, Texas	45.6	58.2	93.1	117.4	209.0	—	Scholz et al. (1963)
Main crop, United Kingdom	10.2-20.4	17.5-35.9	29.1-46.1	86.8-196.4 at 18°C	—	—	Smith (1957)
Nantes, Canada <sup>d</sup>	9.2	19.9	—	64.0-83.9	—	—	Van den Berg and Lentz (1972)

Tabela 2- Calor de respiração de frutos e vegetais (ASHRAE Refrigeration Handbook, 2006).

Um factor que é omissa no cálculo da carga térmica através dos produtos, são as embalagens, isto devido ao seu valor não ser relevante comparado com os demais valores. Esse valor foi calculado da seguinte forma:

$$Q[\text{kW}] = m \times Cp \times \Delta T$$

Legenda:

Q [kW] - Potência transferida

m[kg] – Peso das embalagens

$cp[\frac{kJ}{kg \times K}]$  – Calor específico do material das embalagens

$\Delta T [K]$  - Diferença de temperatura entre o interior da câmara e o exterior.

Os valores utilizados para quantificar o calor específico do material das embalagens, foram retiradas da tabela 3.

Product	Specific Heat - Cp -	
	(Btu/lb <sub>m</sub> -°F) (kcal/kg°C)	(kJ/kg K)
Agate		0.80
Aluminum bronze		0.436
Aluminum, 0°C	0.21	0.87
Antimony	0.05	0.21
Apatite	0.2	0.84
Arsenic		0.348
Artificial wool		1.357
Asbestos cement board	0.2	0.84
Asbestos mill board	0.2	0.84
Ashes	0.2	0.84
Asphalt	0.22	0.92
Augite	0.19	0.8
Bakelite, wood filler	0.33	1.38
Bakelite, asbestos filler	0.38	1.59
Barite	0.11	0.46
Barium	0.07	0.29
Basalt rock	0.2	0.84
Beeswax	0.82	3.4
Beryl	0.2	0.84
Beryllium		1.02
Bismuth	0.03	0.13
Boile scale		0.80
Bone	0.11	0.44
Borax	0.24	1
Boron	0.31	1.3
Brass	0.09	0.38
Brick, common	0.22	0.9
Brick, hard	0.24	1
Bronze, phosphor	0.09	
Cadmium	0.08	0.25
Calcite 32 - 100F	0.19	0.8
Calcite 32 - 212F	0.2	0.84
Calcium	0.15	0.63
Calcium carbonat	0.18	
Calcium sulfate	0.27	
Carbon, Diamond	0.12	0.52
Carbon, Graphite	0.17	0.71
Carborundum	0.16	0.67
Cassiterite	0.09	0.38
Cement dry	0.37	1.55
Cement powder	0.2	0.84
Cellulose	0.37	
Celluloid	0.38	
Charcoal	0.24	1
Chalk	0.22	0.9

Tabela 3 - Calor específico de materiais mais frequentemente utilizados como embalagens (Engineering toolbox, 2014).

A interface do programa referente à carga térmica introduzida pelos produtos (figura 7)., ficou com a seguinte apresentação:

**Figura 7** – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das cargas térmicas introduzidas pelos produtos.

Nesta interface o utilizador deverá introduzir os valores necessários, para o programa conseguir calcular os valores necessários para quantificar a carga térmica libertada pelos produtos que se encontram no interior da câmara. Nesta interface o utilizador terá a possibilidade de escolher entre dois processos. Sendo eles: somente arrefecimento, congelamento e arrefecimento após congelamento.

### 1.1.3 Carga térmica interna

A carga térmica interna é a soma de todos os elementos que produzem calor no interior da câmara frigorífica. Sendo esses elementos os seguintes: pessoas, luzes, equipamentos elétricos e máquinas.

A quantidade de calor libertado pelas pessoas que frequentam a câmara foi calculada da seguinte forma:

$$Q \text{ [kW]} = n_p \times P_h;$$

Legenda:

$Q$ [kW] - Potência transferida

$n_p$  – Número de pessoas;

$P_h$  $[\frac{kW}{pessoa}]$  – Potência libertada por pessoa

Os valores utilizados para quantificar o calor libertado por pessoas, foram retiradas da tabela 4.

Temp	10°C	0°C	-20°C
Ph	210 W	270 W	390 W

Tabela 4 - Potência calorífica média libertada por uma pessoa quando está a trabalhar em diferentes temperaturas, Danfoss, 2013

A quantidade de calor libertado pelos equipamentos eléctricos e máquinas dentro da câmara foi calculado da seguinte forma:

$$Q[\text{kW}] = A \times Pv;$$

Q [kW] - Potência transferida

A [m<sup>2</sup>] – Área do teto

Pv [ $\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ ] – Potência da luminária

A quantidade de calor libertado pelas luzes dentro da câmara foi calculada da seguinte forma:

$$Q [\text{kW}] = n \times P;$$

Legenda:

Q[kW] - Potência transferida

n – Número de equipamentos;

P[kW] – Potência

A interface do programa referente à carga térmica interna (figura 8), ficou com a seguinte apresentação:

The screenshot shows a software interface titled "Internal Load" with a grid layout. It contains four main sections for calculating different types of internal loads:

- People:** Formula  $Q_9 = n \times P_h$ . Inputs: n (Number of people), Ph (Heat release per person), t1 (temperature required). Result: Q9 = 0 kW.
- Lighting:** Formula  $Q_{10} = A \times P_v$ . Inputs: A (Warehouse floor area), Pv (Lighting load). Result: Q10 = 0 kW.
- Electric equipment heat loads:** Formula  $Q_{11} = n \times P$ . Inputs: n (Number of devices), P (Heat load). Result: Q11 = 0 kW.
- Forklift truck:** Formula  $Q_{12} = n \times P$ . Inputs: n (Number of devices), P (Heat load). Includes checkboxes for Forklift 900 kg and Forklift 1800 kg, and a section for Palet. Result: Q12 = 0 kW.

Figura 8 – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das Térmicas Internas.

Nesta interface o utilizador deverá introduzir todos os valores necessários para quantificar a carga térmica, introduzidas na câmara por:

- Pessoas;
- Luzes;
- Equipamento Eléctrico;
- Equipamentos móveis.

#### 1.1.4 Carga térmica dos equipamentos

A carga térmica dos equipamentos é referente aos ventiladores e ao descongelamento eléctrico.

A quantidade de calor libertada pelos ventiladores para a câmara foi calculada da seguinte forma:

$$Q \text{ [kW]} = nv \times Pf;$$

Legenda:

Q [kW] - Potência transferida

nv – Número de ventiladores;

Pf[kW] – Potência do ventilador

A quantidade de calor libertada pelo descongelamento eléctrico para a câmara foi calculada da seguinte forma:

$$Q[\text{kW}] = E \times Ps;$$

Legenda:

Q [kW] - Potência transferido

E (0-1) – Eficiência de descongelamento

Ps[kW] – Potência eléctrica

A interface do programa referente à carga térmica interna (figura 9), ficou com a seguinte apresentação:

**Figura 9** – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das térmicas dos equipamentos

Nesta interface o utilizador deverá introduzir todos os valores necessários para quantificar a carga térmica, introduzida na câmara por:

- Ventiladores;
- Equipamentos para descongelamento.

### 1.1.5 Carga térmica das infiltrações

A carga térmica devido a infiltrações, é referente às infiltrações que ocorrem na porta da câmara e através dos ventiladores.

Um dos grandes problemas no cálculo das cargas térmicas de uma instalação, é quantificar o calor que é inserido na câmara através da abertura da (s) porta (s). Isto porque é extremamente difícil encontrar uma fórmula consensual. No programa desenvolvido usaram-se as seguintes fórmulas para quantificar a infiltração através da (s) porta (s):

$$q = C_{inf} \times A \times \sqrt{H} \times ((\rho_i - \rho_o) / \rho_i)^{\frac{1}{2}} \times \left[ \frac{2}{1 + \left(\frac{\rho_i}{\rho_o}\right)^{\frac{1}{3}}} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$\dot{m} = q \times \left( \frac{\rho_o + \rho_i}{2} \right)$$



$$Q = qm \times (ho - hi)$$

Legenda:

$qv \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  - Caudal volúmico;

Cinf - Coeficiente de infiltração;

A  $[m^2]$  - Área da porta;

H [m] - Altura da porta

$\rho_0 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar exterior;

$\rho_i \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar interior;;

$qm \left[ \frac{Kg}{s} \right]$  - Caudal mássico.

O coeficiente de infiltração, é um valor impossível de prever com exactidão, por este facto, utilizou-se o valor (constante) recomendado em SToecker (1998), de onde foram também retiradas as fórmulas usadas. O valor inserido na fórmula foi:  $0,692 \sqrt{m} \text{ s}$  (SToecker (1998)) .

Outro tipo de infiltração recorrente numa instalação frigorífica é através da ventilação de ar, sendo que o mais comum é esse ar ser uma mistura de ar recirculado com ar novo. A fórmula que se utilizou foi a seguinte:

$$Q = V \times \rho_s \times (ho - hi)$$

Legenda:

$V \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  - Caudal de ar;

$\rho_s \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Densidade do ar ventilado;

$ho \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  - Entalpia do ar exterior;

$hi \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  - Entalpia do ar interior;

Nestes dois cálculos era necessário introduzir a densidade e entalpia do ar, tanto exterior como interior. Usaram-se as seguintes fórmulas para calcular os valores necessários.

$$P_{\text{vaporização}} = 220640 \times 100 \times e^{\frac{T_c}{T_{bs}}} \times (c_1 \times v_1 + c_2 \times v_1^2 + c_3 \times v_1^3 + c_4 \times v_1^{3.5} + c_5 \times v_1^4 + c_6 \times v_1^{7.5})$$

$$P_{\text{saturação}} = 220640 \times 100 \times e^{\frac{T_c}{T_{bh}}} \times (c_1 \times v_2 + c_2 \times v_2^{1.5} + c_3 \times v_2^3 + c_4 \times v_2^{3.5} + c_5 \times v_2^4 + c_6 \times v_2^{7.5})$$

Onde:

$c1=-7,85951783$
$c2=1,84408259$
$c3=-11,7866497$
$c4=22,6807411$
$c5=-15,9618719$
$c6=1,80122502$
$Tc [K]=647.096$
$Tbs [K]=Tbs [^{\circ}C]+273.15$
$Tbh [K]=Tbh [^{\circ}C]+273.15$
$v2=1-(Tbh[K]Tc[K])$
$v1=1-(Tbs[K]Tc[K])$

$$HR[\%] = \frac{pv}{ps} \times 100$$

Legenda:

$pv[kPa]$ - Pressão parcial de vapor de água,

$ps[kPa]$ - Pressão de saturação de vapor de água

$$x \left[ \frac{kgv}{kga} \right] = \frac{HR \times Ps}{Patm - HR \times Ps} \times 100$$

Legenda:

HR- Humidade relativa,

$pv[kPa]$ - Pressão parcial de vapor de água,

$Patm[kPa]$ - Pressão atmosférica do ar.

$$h \left[ \frac{kJ}{kga} \right] = 1.005 \times Tdb + x \times (1.93 \times Tdb + 2490)$$

Legenda:

Tdb[°C]-Temperatura de bolbo seco,

x- Mistura bifasica,

$$v \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg a}} \right] = \frac{287.069 \times (\text{Tbs} + 273.15)}{\text{Patm} - \left( \frac{\text{HR}}{100} \right) \times \text{Pv}}$$

Legenda:

Tdb[°C] - Temperatura de bolbo seco,

Patm[kPa] - Pressão atmosférica do ar,

HR[%] - Humidade relativa,

pv[kPa] - Pressão parcial de vapor de água,

$$\rho \left[ \frac{\text{kg a}}{\text{m}^3} \right] = \frac{1}{v}$$

Legenda:

$v \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$  – Volume específico.

A interface do programa referente às infiltrações (figura 10), ficou com a seguinte apresentação:

The screenshot shows a software interface for calculating infiltration through ventilations. It is divided into several sections:

- Diagram:** A schematic showing a 'Refrigerated room' on the left and a 'Warm environment' on the right. A doorway of height 'H' is shown. Air density ( $\rho_i$ ), air temperature ( $t_i$ ), and air enthalpy ( $h_{ai}$ ) are indicated for the room. In the warm environment, air density ( $\rho_o$ ), air temperature ( $t_o$ ), and air enthalpy ( $h_{ao}$ ) are indicated. The 'Neutral pressure elevation' is also shown.
- Formulas:**
  - $Q = C_{in,j} A \sqrt{H} \left( \frac{\rho_o - \rho_i}{\rho_i} \right)^{1/2} \left[ \frac{2}{1 + (\rho_i/\rho_o)^{1/3}} \right]^{3/2}$
  - $\dot{m} = Q \left( \frac{\rho_o + \rho_i}{2} \right)$  and  $\dot{Q}_{15} = \dot{m}(h_{a,o} - h_{a,i})$
- Where:**
  - $Q$  = volume rate of flow,  $\text{m}^3/\text{s}$  ( $\text{ft}^3/\text{s}$ )
  - $C_{in}$  = infiltration coefficient =  $0.692 \sqrt{\text{m}}/\text{s}$  ( $1.254 \sqrt{\text{ft}}/\text{s}$ )
  - $A$  = area of doorway,  $\text{m}^2$  ( $\text{ft}^2$ )
  - $H$  = height of doorway,  $\text{m}$  ( $\text{ft}$ )
  - $\rho_i$  and  $\rho_o$  = air densities,  $\text{kg}/\text{m}^3$  ( $\text{lb}/\text{ft}^3$ ) of the cold and warm air, respectively
  - $\dot{m}$  = mass flow rate,  $\text{kg}/\text{s}$  ( $\text{lb}/\text{s}$ )
  - $\dot{Q}_{15}$  = refrigeration load,  $\text{kW}$  ( $\text{Btu}/\text{s}$ )
- Input Table (Right):**

Height:	t internal	HR% Internal	external
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Width	How many doors are open [day]		HR% Extern
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Percentage of the door opening	Hours per day open (each door)		
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Q15			0 kW
- Infiltration through ventilations (Bottom):**
  - $Q_{16} = V \times \rho_s \times (h_u - h_s)$
  - $Q_{16}$  = Forced ventilation load [kWh/d]
  - $V$  = Air flow [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
  - $\rho_s$  = Inner air density, about 1.2  $\text{kg}/\text{m}^3$
  - $h_u$  = outside air enthalpy (kJ / kg)
  - $h_s$  = inside air enthalpy (kJ / kg)
- Input Table (Bottom Right):**

V	t internal	HR% Intern	t external	HR% Extern	How many ventilators	Q16
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0 [kW]

Figura 10 – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação das Térmicas pelas infiltrações

Nesta interface o utilizador deverá introduzir todos os valores necessários para quantificar a carga térmica, introduzidas na câmara por infiltrações:

- Portas;
- Ventilação.

### 1.1.6 Carga térmica conversão final

Com todas as cargas térmicas referidas, o passo seguinte será somar todas as cargas térmicas e de seguida utilizar a seguinte fórmula:

$$\Phi[\text{kW}] = \frac{Q_{total} \times 24 \times k}{h}$$

Legenda:

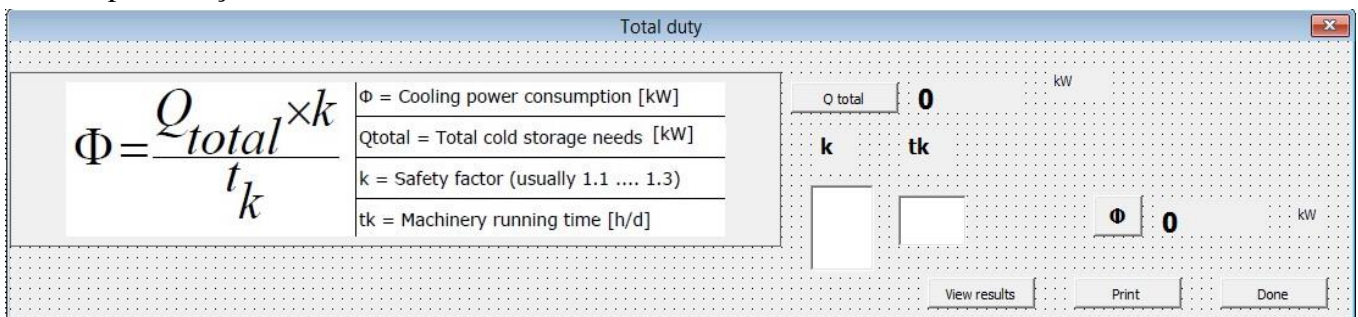
$\Phi[\text{kW}]$ - Potência frigorífica;

k [1.1 – 1.3]- Factor de segurança ;

h  $\left[ \frac{\text{h}}{\text{dia}} \right]$  – Tempo de funcionamento do evaporador;

Esta última fórmula tem como consequência, a conversão de todas as cargas térmicas que foram inseridas no sistema, para o montante de Potência frigorífica que será necessário retirar do sistema no tempo de funcionamento do evaporador. Isto é, o valor somado das cargas térmicas seria o valor da potência frigorífica, se o evaporador funcionasse 24 horas dia, para evitar a formação de gelo, multiplica-se o valor das cargas térmicas por 24 horas e divide-se pelo número de horas de funcionamento do evaporador. O que levará a uma potência frigorífica maior.

A interface do programa referente à Potência frigorífica (figura 11), ficou com a seguinte apresentação:



**Figura 11** – Aplicativo informático desenvolvido para a determinação da potência frigorífica final.

A última interface apresentará o resultado final da carga térmica necessária a retirar da instalação, contabilizando os valores anteriormente calculados, usando um coeficiente de segurança e por fim o tempo de funcionamento dos evaporadores.

## Capítulo 2 - Dimensionamento de tubagens para fluidos frigoríficos (glicol e amônia)

Neste capítulo será explicado detalhadamente como foi realizado o programa que tem como função o dimensionamento das tubagens necessárias, para um correcto funcionamento de uma Instalação frigorífica.

A empresa onde foi realizado o estágio, J&E Hall, utilizava um modo de dimensionamento de tubagens, semelhante ao explicado no capítulo anterior. Como tal foi proposto a realização de um programa simples e prático para realizar essa tarefa.

A primeira preocupação foi conhecer os fluidos frigoríficos com que a empresa trabalha, sendo esses fluidos o Glicol e a Amônia. Devido a diferentes propriedades térmicas dos fluidos em questão, foi decidido a realização de dois programas distintos, um para o dimensionamento de tubagens que utilizassem o glicol e outro para o dimensionamento de tubagens que utilizassem amônia.

### 2.1 Dimensionamento de tubagens em instalações com glicol

O primeiro programa a ser explicado será o que tem como finalidade dimensionar as tubagens para o uso do glicol. Para tal o primeiro passo foi recolher as propriedades necessárias no programa referentes ao glicol. As propriedades necessárias foram: densidade, viscosidade cinemática e o calor específico. Os valores usados para quantificar essas propriedades foram retirados das propriedades do “FRIOGEL NEO”, isto devido à empresa utilizar o referido produto.

Densidade:

#### 2.2. Density of water solutions of FRIOGEL® at 20°C

Concentration FRIOGEL® NEO (% in volume)	Solution density kg / dm <sup>3</sup>
10	1,008
15	1,013
20	1,018
25	1,023
30	1,028
35	1,032
40	1,037
45	1,040
50	1,044
55	1,046
60	1,048

Tabela 5 - Densidade do glicol, FRIOGEL NEO

Viscosidade cinemática:

**24. Kinematic viscosity of water solutions of FRIOGEL® NEO (centistokes cSt)\***

FRIOGEL® NEO concentration (% in volume)	25	30	35	40	45	50						
Temperature °C	FROST ZONE											
- 30												206,7
- 20												
- 10	9,7	12,8	16,9	22,3	29,3	38,2						
0	6,0	7,7	9,8	12,4	15,7	19,7						
10	3,9	4,9	6,1	7,5	9,2	11,2						
20	2,8	3,3	4,0	4,9	5,8	6,9						
30	2,0	2,4	2,8	3,3	3,9	4,5						
40	1,5	1,8	2,1	2,4	2,8	3,1						
50	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3						
60	1,0	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8						
70	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3	1,4						
80	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2						
90	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0						
100	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8						

**Tabela 6,**Viscosidade cinemática do glicol, FRIOGEL NEO

Calor específico:

**2.5. Specific heat of water solutions of FRIOGEL® NEO (kJ. kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)\***

FRIOGEL® NEO concentration (% in volume)	25	30	35	40	45	50						
Temperature °C	FROST ZONE											
- 30												3,4
- 20												
- 10	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5	3,4						
0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5						
10	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5						
20	4,0	3,9	3,8	3,7	3,6	3,5						
30	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7	3,6						
40	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,6						
50	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7	3,7						
60	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8	3,7						
70	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8	3,7						
80	4,1	4,0	4,0	3,9	3,8	3,8						
90	4,1	4,0	4,0	3,9	3,9	3,8						
100	4,1	4,0	4,0	4,0	3,9	3,8						

**Tabela 7 -** Calor específico do glicol, FRIOGEL NEO

De seguida procedeu-se à recolha do material usado no fabrico das tubagens, isto devido ao diferente valor de rugosidade dos materiais. Os diferentes materiais usados são: aço inoxidável, PVC e o aço galvanizado. Os valores utilizados para quantificar a rugosidade desses materiais foram:

- Aço inoxidável = 0,0015 mm

- PVC = 0,005 mm
- Aço galvanizado = 0,15 mm

Com as propriedades necessárias e com o material usado para a construção de tubagens, todos os dados necessários para elaboração do programa estão recolhidos. De seguida procurámos as fórmulas necessárias para o correto funcionamento do programa. Essas fórmulas foram as seguintes:

$$qm\left[\frac{kg}{s}\right]=\frac{Qt}{cp2\times T2-cp1\times T1}$$

Legenda:

$qm\left[\frac{kg}{s}\right]$  - Caudal mássico

$Qt$  [kW] - Potência frigorífica,

$cp1\left[\frac{kJ}{kg\times K}\right]$  - Calor específico do fluído na saída,

$T1$  [°C] - Temperatura do fluído na saída,

$cp2\left[\frac{kJ}{kg\times K}\right]$  - Calor específico do fluído na entrada

$T2$  [°C] - Temperatura do fluído na entrada,

Este valor foi calculado para juntamente com a massa volúmica do glicol chegar ao caudal volúmico do glicol:

$$qv\left[\frac{m^3}{s}\right]=\frac{qm}{\rho}$$

Legenda:

$qv\left[\frac{m^3}{s}\right]$  - Caudal volúmico,

$qm\left[\frac{kg}{s}\right]$  - Caudal mássico,

$\rho\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  - Massa volúmica.

E por sua vez, o caudal volúmico foi usado para calcular o diâmetro necessário da tubagem.

$$Dc[mm]=\frac{\sqrt{\frac{4 \times Qv}{v \times \pi}}}{1000}$$

Legenda:

$Dc [mm]$  - Diâmetro calculado,

$qv[\frac{m^3}{s}]$ - Caudal volúmico,

$v[\frac{m}{s}]$ - Velocidade do fluido.

Calculado o valor do diâmetro necessário, este valor foi aproximado para o valor comercializado (tabela 8).

Diameter inside - DN (mm)	Thickness (mm)
15	1,5
20	1,5
25	1,5
32	1,5
40	1,5
50	1,5
65	1,5
80	1,5
100	1,5
125	2
150	2
200	2
250	2
300	2,5

**Tabela 8-** Diâmetro normalizado de tubagens

Isto devido aos diâmetros referidos na tabela anterior serem os valores padrão comercializados no mercado.

Um exemplo: se o resultado do diâmetro calculado usando a fórmula anterior, fosse 89 mm, o valor real do Diâmetro a utilizar seria 100mm.

De seguida é necessário calcular a perda de carga que ocorre na tubagem, para com esse valor dimensionar correctamente a bomba a utilizar. As fórmulas necessárias para chegar a esse valor são as seguintes:



Fórmula de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \times v \times Dr}{\mu},$$

Legenda:

$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  - Massa volúmica,

$v \left[ \frac{m}{s} \right]$  - Velocidade do fluído,

Dr [mm] - Diâmetro real,

$\mu$ [Pa. s] - Viscosidade cinemática.

Coefficiente de fricção:

$$f = \sqrt[3]{0,0055 \times \left( 1 + \left( 20000 \times \frac{\varepsilon}{Dr} \times \frac{10^6}{Re} \right) \right)}.$$

Legenda:

$\varepsilon$  [mm]- Rugosidade do material que constitui a tubagem,

Dr [mm] - Diâmetro real,

Re - Número de Reynolds.

Perda de carga continua (fórmula de Darcy):

$$\Delta P \text{ contínua} = \frac{f \times L}{Dr} \times \frac{v}{2 \times g}$$

Legenda:

f - Coeficiente de fricção,

L [m]- Comprimento da tubagem,

Dr[mm]- Diâmetro real,

$v \left[ \frac{m}{s} \right]$  - Velocidade do fluído,

$g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ - Aceleração gravítica.



**Figura 12** – Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para glicol como fluido refrigerante.

A interface anterior tem um modo de funcionamento bastante acessível, isto porque o utilizador só deverá ter que introduzir os seguintes valores:

- Percentagem de glicol;
- Comprimento de tubagem;
- Potência frigorífica;
- Temperatura de entrada e de saída;
- Rugosidade do material da tubagem;
- Velocidade do fluido;
- Perdas de cargas locais.

## Secção 2.2 Dimensionamento de tubagens em instalações com amónia

O programa realizado para dimensionar as tubagens, a quando da utilização de amónia foi dividido em três subprogramas. Isto devido, aos diferentes estados pelos quais a amónia passa num ciclo de refrigeração, sendo eles: o estado líquido, mistura bifásica (líquido e vapor) e estado de vapor.

As propriedades necessárias, foram retiradas das tabelas termodinâmicas, de “Properties of saturated Ammonia”.

### 2.2.1 Dimensionamento de tubagens em instalações com amónia no estado líquido

O primeiro subprograma desenvolvido foi para a amónia em estado líquido. Como o programa utilizado para dimensionar as tubagens onde se utiliza glicol é um programa para fluidos no estado líquido, aproveitou-se o princípio de funcionamento desse para o subprograma da amónia no estado líquido, onde somente, por razões claras, foram alterados os valores da densidade, da viscosidade cinemática e do calor específico, para os valores correspondentes da amónia. Logo as fórmulas recolhidas para o desenvolvimento deste subprograma foram iguais às utilizadas para dimensionar o programa referente ao glicol (figura 13).

Branch	Length [m]	Duty [kW]	% Duty	T [°C]	Roughness of the pipe [mm]	Real Velocity [m/s]	Status	Max. Velocity [m/s]	Mass flow [kg/s]	Enthalpy [kJ.kg <sup>-1</sup> ]	Neessing diameter [mm]	Real diameter [DN]	Continuous pressure drop [Darcy formula] [bar]	K Factors Sum	K Factors Sum	Located pressure drop [Darcy formula] [bar]	Others located pressure drops [bar]	Total pressure drop [bar]	Total volume in the pipes [m <sup>3</sup> ]
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	3,3	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	13,1	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	13,1	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	1,5	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000
			0%	-40	0,05	#DIV/0!	###	0,000	1392,5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	Calculated K Factors	0	#DIV/0!	0,000	0	0,000	0,0000</

**Figura 13** - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento de tubagens para amónia, no estado líquido, como fluido frigorígeno.

### 2.2.2 Dimensionamento de tubagens em instalações com amónia no estado bifásico

O subprograma seguinte a ser desenvolvido, foi para a mistura de estados (vapor + líquido) da amónia. Após uma pesquisa intensa, pela forma mais correcta para dimensionar as tubagens na fase bifásica do fluído, chegou-se à conclusão que seriam utilizadas as fórmulas apresentadas no documento da, Wolverine tube, inc. O documento sugere diferentes fórmulas, dependendo do estado do comportamento do fluido. Nesse capítulo é referido que a queda de pressão dentro das tubagens, é a soma de três contributos, sendo eles: a queda de pressão estática, a queda de pressão por aceleração e a perda de pressão por fricção.

$$\Delta p \text{ total} = \Delta p \text{ static} + \Delta p \text{ mom} + \Delta p \text{ fric}$$

A queda de pressão estática é dada pela seguinte fórmula:

$$\Delta p \text{ static} = \rho_{tp} \times g \times H \times \sin\theta$$

Legenda:

$\rho_{tp} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ - Densidade da mistura de fases;

$g \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ - Aceleração gravítica;

H [m]- Altura vertical da tubagem;

$\theta$ - Ângulo provocado pela tubagem.

A fórmula usada para calcular a densidade da mistura de fases foi a seguinte:

$$\rho_{tp} = \rho_L \times (1 - \varepsilon) + \rho_g \times \varepsilon$$

Legenda:

$\rho_L \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ - Densidade do líquido;

$\varepsilon$ - Voidfraction;

$\rho_g \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$ - Densidade do gás.

Na fórmula anterior, falta somente saber o valor de voidfraction. Para isso recorremos à seguinte fórmula:

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \left(\frac{u_g}{u_l} \times \frac{(1-x)}{x} \times \frac{\rho_g}{\rho_l}\right)}$$

Legenda:

$\frac{u_g}{u_l}$  – Rácio da velocidade entre o gás e o líquido;

x- Título da mistura bifásica;

$\rho_g$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]- Densidade do gás;

$\rho_l$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]- Densidade do líquido.

Em relação à perda de pressão por aceleração, convém referir que nos cálculos que utilizamos para dimensionar projectos que a empresa nos disponibilizou, o valor utilizado foi zero. Isto porque considerando o fluxo como homogéneo, o valor do título da mistura bifásica é constante, por essa razão o valor da perda de pressão por aceleração é nulo.

A última perda de carga a entrar nos cálculos é a perda de pressão devido ao atrito. A fórmula usada para definir esse valor foi a fórmula de Gronnerud, que é a seguinte:

$$\Delta p_{fric} = \Phi_{gd} \times \Delta p_l$$

$$\Phi_{gd} = 1 + \left(\frac{dp}{dz}\right) \times \left[ \frac{\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)}{\left(\frac{\mu_l}{\mu_g}\right)^{0.25}} + 1 \right]$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = f \times [x + 4 \times (x^{1.8} - x^{10} \times f^{0.5})]$$

$$f = Fr l^{0.3} + 0.005 \times \left( \ln \frac{1}{Fr l} \right)^2$$

$$Fr l = \frac{\dot{m}^2 \text{total}}{g \times Di \times \rho l^2}$$

$$\dot{m}^2 \text{total} = \frac{\text{potencia frigorifica}}{\text{hfg}} \times \left( \frac{D}{2000} \right)^2$$

Neste subprograma, a forma para contabilizar as perdas de cargas locais, foi diferente, do método utilizado no capítulo anterior. Neste caso, as perdas locais foram contabilizadas como comprimento equivalente, onde o valor da perda de carga foi contabilizado por um comprimento. Esse valor foi somado com o comprimento da tubagem, resultando no valor usado nos cálculos (onde era necessário usar o comprimento da tubagem).

NOMINA L Pipe tube size (mm)	Smooth bend Elbows						Smooth Bend Tees			Sudden Enlargement, d/D			Sudden Contraction, d/D			Sharp Edge		Pipe Projection		Valves Losses in Equivalente Metres of pipe							
	90° Std <sup>a</sup>	90° Long- Radius <sup>a</sup>	90° Swept <sup>a</sup>	45° Std <sup>a</sup>	45° Swept <sup>a</sup>	180° Std <sup>a</sup>	Flow Through Branch	Straight-Through Flow			1/4	1/2	3/4	1/4	1/2	3/4	Entrance	Exit	Entrance	Exit	Globe <sup>d</sup>	60° Wye	45° Wye	Angle <sup>d</sup> Rectangular Valve	Gate <sup>b</sup>	Swing Check <sup>e</sup>	Lift Check
	No Reduction			Reduced 1/4	Reduced 1/2	Diagram			Diagram		Diagram		Diagram														
10	0,4	0,3	0,7	0,2	0,3	0,7	0,8	0,3	0,4	0,4	0,4	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1	0,5	0,2	0,5	0,3	5,2	2,4	1,8	1,8	0,2	1,5	5,2
15	0,5	0,3	0,8	0,2	0,4	0,8	0,9	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,1	0,3	0,3	0,1	0,5	0,3	0,5	0,5	5,5	2,7	2,1	2,1	0,2	1,8	5,5
20	0,6	0,4	1	0,3	0,5	1	1,2	0,4	0,6	0,6	0,8	0,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,9	0,4	0,9	0,7	6,7	3,4	2,1	2,1	0,3	2,2	6,7
25	0,8	0,5	1,2	0,4	0,6	1,2	1,5	0,5	0,7	0,8	1	0,6	0,2	0,5	0,4	0,2	1,1	0,5	1,1	0,8	8,8	4,6	3,7	3,7	0,3	3	8,8
32	1	0,7	1,7	0,5	0,9	1,7	2,1	0,7	0,9	1	1,4	0,9	0,3	0,7	0,5	0,3	1,6	0,8	1,6	1,3	12	6,1	4,6	4,6	0,5	4,3	12
40	1,2	0,8	1,9	0,6	1	1,9	2,4	0,8	1,1	1,2	1,8	1,1	0,4	0,9	0,7	0,4	2	1	2	1,5	13	7,3	5,5	5,5	0,5	4,9	13
50	1,5	1	2,5	0,8	1,4	2,5	3	1	1,4	1,5	2,4	1,5	0,5	1,2	0,9	0,5	2,7	1,3	2,7	2,1	17	9,1	7,3	7,3	0,73	6,1	17
65	1,8	1,2	3	1	1,6	3	3,7	1,2	1,7	1,8	3	1,9	0,6	1,5	1,2	0,6	3,7	1,7	3,2	2,7	21	11	8,8	8,8	0,9	7,6	21
80	2,3	1,5	3,7	1,2	2	3,7	4,6	1,5	2,1	2,3	4	2,4	0,8	2	1,5	0,8	4,3	2,2	4,3	3,8	26	13	11	11	1	9,1	26
90	2,7	1,8	4,6	1,4	2,2	4,6	5,5	1,8	2,4	2,7	4,6	2,8	0,9	2,3	1,8	0,9	5,2	2,6	5,2	4	30	15	13	13	1,2	10	30
100	3	2	5,2	1,6	2,6	5,2	6,4	2	2,7	3	5,2	3,4	1,2	2,7	2,1	1,2	6,1	3	6,1	4,9	37	18	14	14	1,4	12	37
125	4	2,5	6,4	2	3,4	6,4	7,6	2,5	3,7	4	7,3	4,6	1,5	3,7	2,7	1,5	8,2	4,3	8,2	6,1	43	22	18	18	1,8	15	43
150	4,9	3	7,6	2,4	4	7,6	9	3	4,3	4,9	8,8	6,7	1,8	4,6	3,4	1,8	10	5,8	10	7,6	52	27	21	21	2,1	18	52
200	6,1	4	0	3	0	10	12	4	5,5	6,1	0	7,6	2,6	0	4,6	2,6	14	7,3	14	10	62	35	26	26	2,7	24	62
250	7,6	4,9	0	4	0	13	15	4,9	7	7,6	0	9,8	3,4	0	6,1	3,4	18	8,8	18	14	85	44	32	32	3,7	30	85
300	9,1	5,8	0	4,9	0	15	18	5,8	7,9	9,1	0	12,4	4	0	7,6	4	22	11	22	17	98	50	40	40	4	37	98
350	10	7	0	5,5	0	17	21	7	9,1	10	0	0	4,9	0	0	4,9	26	14	26	20	110	56	47	47	4,6	41	110
400	12	7,9	0	6,1	0	19	24	7,9	11	12	0	0	5,5	0	0	5,5	29	15	29	23	125	64	55	55	5,2	46	125
450	13	8,8	0	7	0	21	26	8,8	12	13	0	0	6,1	0	0	6,1	35	18	35	27	140	73	61	61	5,8	50	140
500	15	10	0	7,9	0	25	30	10	13	15	0	0	0	0	0	0	43	21	43	33	160	84	72	72	6,7	61	160
600	18	12	0	9,1	0	29	35	12	15	18	0	0	0	0	0	0	50	25	50	40	186	98	81	81	7,6	73	186

Tabela 9, Perdas de cargas locais



Após a introdução destes valores o programa irá calcular a perda de carga que ocorre na tubagem.

### 2.2.3 Dimensionamento de tubagens em instalações com amónia no estado de vapor

O último subprograma a ser explicado é o que se refere, à amónia no estado de vapor. Devido à falta de fórmulas credíveis, utilizaram-se as tabelas disponíveis em ASHRAE (2006). As tabelas utilizadas foram as seguintes:

**Table 1 Suction Line Capacities in Kilowatts for Ammonia with Pressure Drops of 0.005 and 0.01 K/m Equivalent**

Steel Nominal Line Size, mm	Saturated Suction Temperature, °C					
	-50		-40		-30	
	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 12.1 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 24.2 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 19.2 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 38.4 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 29.1 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 58.2 \text{ Pa/m}$
10	0.19	0.29	0.35	0.51	0.58	0.85
15	0.37	0.55	0.65	0.97	1.09	1.60
20	0.80	1.18	1.41	2.08	2.34	3.41
25	1.55	2.28	2.72	3.97	4.48	6.51
32	3.27	4.80	5.71	8.32	9.36	13.58
40	4.97	7.27	8.64	12.57	14.15	20.49
50	9.74	14.22	16.89	24.50	27.57	39.82
65	15.67	22.83	27.13	39.27	44.17	63.77
80	28.08	40.81	48.36	69.99	78.68	113.30
100	57.95	84.10	99.50	143.84	161.77	232.26
125	105.71	155.05	181.16	261.22	293.12	420.83
150	172.28	248.91	294.74	424.51	476.47	683.18
200	356.67	514.55	609.20	874.62	981.85	1402.03
250	649.99	937.58	1107.64	1589.51	1782.31	2545.46
300	1045.27	1504.96	1777.96	2550.49	2859.98	4081.54

Steel Nominal Line Size, mm	Saturated Suction Temperature, °C					
	-20		-5		+5	
	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 42.2 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 84.4 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 69.2 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 138.3 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.005 \text{ K/m}$ $\Delta p = 92.6 \text{ Pa/m}$	$\Delta t = 0.01 \text{ K/m}$ $\Delta p = 185.3 \text{ Pa/m}$
10	0.91	1.33	1.66	2.41	2.37	3.42
15	1.72	2.50	3.11	4.50	4.42	6.37
20	3.66	5.31	6.61	9.53	9.38	13.46
25	6.98	10.10	12.58	18.09	17.79	25.48
32	14.58	21.04	26.17	37.56	36.94	52.86
40	21.99	31.73	39.40	56.39	55.33	79.38
50	42.72	61.51	76.29	109.28	107.61	153.66
65	68.42	98.23	122.06	174.30	171.62	245.00
80	121.52	174.28	216.15	308.91	304.12	433.79
100	249.45	356.87	442.76	631.24	621.94	885.81
125	452.08	646.25	800.19	1139.74	1124.47	1598.31
150	733.59	1046.77	1296.07	1846.63	1819.59	2590.21
200	1506.11	2149.60	2662.02	3784.58	3735.65	5303.12
250	2731.90	3895.57	4818.22	6851.91	6759.98	9589.56
300	4378.87	6237.23	7714.93	10973.55	10810.65	15360.20

Note: Capacities are in kilowatts of refrigeration resulting in a line friction loss per unit equivalent pipe length ( $\Delta p$  in Pa/m), with corresponding change in saturation temperature per unit length ( $\Delta t$  in K/m).

**Tabela 10,** Capacidade em kW na linha de aspiração, deASHRAE, 2006



**Table 2 Suction, Discharge Line, and Liquid Capacities in Kilowatts for Ammonia (Single- or High-Stage Applications)**

Steel Nominal Line Size, mm	Suction Lines ( $\Delta r = 0.02$ K/m)					Discharge Lines ( $\Delta r = 0.02$ K/m, $\Delta p = 684.0$ Pa/m)			Steel Nominal Line Size, mm	Liquid Lines	
	Saturated Suction Temperature, °C					Saturated Suction Temp., °C				Velocity = 0.5 m/s	$\Delta p = 450.0$
	-40 $\Delta p = 76.9$	-30 $\Delta p = 116.3$	-20 $\Delta p = 168.8$	-5 $\Delta p = 276.6$	+5 $\Delta p = 370.5$	-40	-20	+5			
10	0.8	1.2	1.9	3.5	4.9	8.0	8.3	8.5	10	3.9	63.8
15	1.4	2.3	3.6	6.5	9.1	14.9	15.3	15.7	15	63.2	118.4
20	3.0	4.9	7.7	13.7	19.3	31.4	32.3	33.2	20	110.9	250.2
25	5.8	9.4	14.6	25.9	36.4	59.4	61.0	62.6	25	179.4	473.4
32	12.1	19.6	30.2	53.7	75.4	122.7	126.0	129.4	32	311.0	978.0
40	18.2	29.5	45.5	80.6	113.3	184.4	189.4	194.5	40	423.4	1469.4
50	35.4	57.2	88.1	155.7	218.6	355.2	364.9	374.7	50	697.8	2840.5
65	56.7	91.6	140.6	248.6	348.9	565.9	581.4	597.0	65	994.8	4524.8
80	101.0	162.4	249.0	439.8	616.9	1001.9	1029.3	1056.9	80	1536.3	8008.8
100	206.9	332.6	509.2	897.8	1258.6	2042.2	2098.2	2154.3	—	—	—
125	375.2	601.8	902.6	1622.0	2271.4	3682.1	3783.0	3884.2	—	—	—
150	608.7	975.6	1491.4	2625.4	3672.5	5954.2	6117.4	6281.0	—	—	—
200	1252.3	2003.3	3056.0	5382.5	7530.4	12195.3	12529.7	12864.8	—	—	—
250	2271.0	3625.9	5539.9	9733.7	13619.6	22028.2	22632.2	23237.5	—	—	—
300	3640.5	5813.5	8873.4	15568.9	21787.1	35239.7	36206.0	37174.3	—	—	—

**Tabela 11, Capacidade em kW na linha de aspiração e descarga ASHRAE, 2006**

A primeira tabela somente pode ser utilizada para dimensionar a tubagem que alimenta o compressor, a segunda tabela pode ser utilizada para dimensionar a tubagens que alimenta o compressor e também para dimensionar a tubagem de descarga do compressor. A diferença entre utilizar a tabela número 10 ou número 11 para dimensionar a tubagem de carga do compressor é a perda de temperatura por metro de tubagem que é permitida na instalação.

A fórmula que se utilizou para calcular a queda de temperatura na tubagem a dimensionar, ASHRAE (2006), e foi a seguinte:

$$\Delta t = Table\Delta t \times \left(\frac{Actual\ Le}{Table\ Le}\right) \times \left(\frac{Actual\ capacity}{Table\ capacity}\right)^{1.8}$$

Legenda:

Table  $\Delta t$  [°C]- Queda da temperatura utilizada na tabela,

ActualLe [m]- Comprimento equivalente real,

TableLe [m]- Comprimento equivalente referente à tabela,

Actualcapacity [kW]- Potência frigorífica,

Tablecapacity [kW]- Potência frigorífica referente da tabela.

A queda de temperatura referente à tabela varia dependendo da tabela que se utiliza. A escolha depende do quão tolerante se é com a perda de temperatura por metro de tubagem, isto é, se o utilizador necessita de uma perda de temperatura reduzida na tubagem que alimenta o compressor, ele irá utilizar a tabela número 10, com a perda de temperatura por



Neste subprograma os dados que são necessários introduzir são:

- Potência frigorífica,
- Comprimento da tubagem,
- Temperatura de condensação,
- Temperatura de evaporação,
- Os acessórios da tubagem (válvulas, T's, curvas)

A interface da figura 17 tem um modo de funcionamento bastante rudimentar, isto porque o utilizador deverá ter que introduzir todos os seguintes valores:

- Potência frigorífica;
- Comprimento da tubagem;
- Temperatura de condensação;
- Temperatura de evaporação;
- Os acessórios da tubagem (válvulas, T's, curvas);
- Outro tipo de perdas de carga.

Neste subprograma, o utilizador poderá ver a diferença que ocorre se usar o valor do diâmetro recomendado ou um valor de diâmetro introduzido manualmente (“Test other diameter”).



### Capítulo 3 -Dimensionamento de depósitos para instalações frigoríficas:

Neste capítulo será explicado como se desenvolveu o programa de dimensionamento do depósito.

No contexto do ciclo de refrigeração, os depósitos podem ser utilizados em duas situações distintas. A primeira situação, o depósito é utilizado para prevenir o fornecimento do fluido refrigerante no estado líquido ao compressor, ou seja neste caso o depósito é utilizado como uma medida de segurança. O fluido refrigerante entra no depósito no estado bifásico, ou seja, alguma percentagem do fluido encontra-se no estado líquido e outra no estado gasoso, a separação no depósito ocorre devido à diferente densidade dos estados. O líquido “armazena-se” na parte inferior do depósito, por sua vez o gás encontra-se no estado gasoso “superior”, sendo posteriormente encaminhado para os compressores para seguir o fluxo do ciclo de refrigeração. A segunda situação, o depósito funciona como armazenamento de fluido refrigerante. Esta (segunda) situação, utiliza-se quando existe uma flutuação da capacidade do sistema, onde o depósito com o líquido irá corresponder a uma maior ou menor necessidade do ciclo.

Devido às duas situações explicadas anteriormente, um correcto dimensionamento dos depósitos é fundamental para um correcto funcionamento do ciclo de refrigeração. Se o dimensionamento não for efectuado correctamente, o compressor é alimentado por fluido refrigerante, no estado líquido, o que levaria a danos possivelmente irreparáveis no compressor.

O primeiro passo no desenvolvimento do programa, foi a elaboração de um programa simples e de rápida utilização, onde era necessário o utilizador referir os seguintes dados:

1. Capacidade frigorífica;
2. Temperatura;
3. Posição do depósito;
4. Definir número de estágios;
5. Tipo de depósito;
6. Referencias.

Este rápido programa foi desenvolvido a partir, do “Refrigeration pressure vessels”, em que o refrigerante utilizado é exclusivamente o R-717 (figura 18). Isto porque, a empresa (JEHALL), utiliza constantemente este fornecedor para adquirir, qualquer tipo de depósitos.

Este programa funciona da seguinte maneira: após o utilizador inserir todos os dados necessários, o programa irá percorrer a tabela referente ao tipo de depósito e ao tipo de posição. No final de percorrer a tabela o programa fornece os dados desse depósito (figura 20).

### Refrigeration Pressure Vessels

<b>Duty</b>	200	<b>kW</b>
<b>Temperature</b>	-5	<b>°C</b>

Choose the position

 Vertical  
 Horizontal

Choose the stage type

 Single stage  
 Two stage

Choose the type

 Accumulators  
 Surge Drums  
 Flow Horizontal Surge Drums

### References

Enq. N°	
Contract N°	
Customer	
Details	
Duty [kW]	
Vessel description	
Running conditions [°C]	

**Figura 18** - Aplicativo informático desenvolvido para o dimensionamento do depósito

Após a introduzir os dados, o utilizador clica no botão “Select”, e neste caso o programa irá percorrer a tabela referente ao accumulator, single stage, vertical. De referir que a tabela foi convertida de Tons de refrigerante, para kw.

Model No.	A Diameter	B Overall Length	C Shell Length	D Suction Inlet	E Gas Outlet	F Liquid Outlet(s)	G Level Column	H Relief	J Drain	K 3 Way Vent(s)	L Oil Pot Vent	(lbs.) Vessel Weight
VA12-72	12	72	61	2-1/2	2-1/2	2	1-1/2	1-1/2	2	3/4	3/4	350
VA16-85	16	85	72	3	3	2	1-1/2	1-1/2	2	3/4	3/4	550
VA20-87	20	87	72	4	4	3	1-1/2	1-1/2	2	3/4	3/4	710
VA24-88	24	88-1/2	72	5	4	3	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	875
VA30-115	30	115	96	6	5	3	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	1,410
VA36-118	36	118	96	6	6	4	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	1,760
VA42-121	42	121	96	8	6	4	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	2,150
VA48-147	48	147	119	8	8	4	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	2,960
VA54-150	54	150	119	10	8	4	1-1/2	1-1/2	2	1-1/4	3/4	4,550
VA60-153	60	153	119	10	8	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	5,200
VA72-159	72	159	119	12	10	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	8,250
VA84-165	84	165	119	12	10	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	10,125
VA96-171	96	171	119	14	12	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	13,125
VA108-177	108	177	119	16	12	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	17,190
VA120-183	120	183	119	16	14	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	26,500
VA144-195	144	195	119	20	16	(2) 4	1-1/2	1-1/2	2	(2) 1-1/4	3/4	36,725

Notes: All dimensions are given in inches. Consult factory for certified drawings.

### Vertical Accumulator Capacity—Tons of Refrigeration R-717

Model No.	Evaporator Temperature °F										
	Single Stage*						Two Stage*				
	30°F	20°F	10°F	0°F	-10°F	-20°F	-20°F	-30°F	-40°F	-50°F	
VA12-72	35	32	29	25	22	19	23	19	16	14	
VA16-85	64	58	52	46	40	35	41	35	30	25	
VA20-87	101	92	83	73	64	56	66	56	47	40	
VA24-88	147	135	120	107	93	82	96	82	70	59	
VA30-115	232	212	189	168	147	129	152	130	111	94	
VA36-118	333	305	271	242	211	185	218	187	159	135	
VA42-121	452	415	369	329	287	252	296	254	217	184	
VA48-147	590	541	481	429	374	328	387	331	283	240	
VA54-150	750	688	612	545	475	417	491	420	359	305	
VA60-153	925	848	754	672	586	514	606	519	443	376	
VA72-159	1339	1228	1092	974	848	745	877	751	642	544	
VA84-165	1819	1668	1484	1322	1115	1012	1191	1019	871	739	
VA96-171	2385	2187	1945	1734	1510	1326	1561	1336	1142	968	
VA108-177	3013	2764	2458	2190	1908	1675	1972	1688	1443	1223	
VA120-183	3715	3407	3030	2700	2350	2065	2431	2081	1779	1508	
VA144-195	5358	4914	4370	3894	3393	2978	3506	3002	2565	2174	

\* Single stage capacities based on +96°F liquid supply temperature

**Figura19**-Capacidade dos depósitos para o fluido R’717, Refrigeration pressure vessels

De seguida irei apresentar um resumo das dimensões do accumulator, que satisfaça as necessidades do utilizador.

Selection Details		References	
Model No.	VA16-85	Eng. N°	0
Table Duty	211,008	Contract N°	0
Diameter	406,4	Customer	0
Overall length	2159	Details	0
Shell length	1828,8	Duty [kW]	0
Number of stages	Single	Vessel discription	0
		Running conditions [°C]	0

**Figura 20** - Aplicativo informático desenvolvido para fornecer o resultado final

Após desenvolver este programa, foi requerido o desenvolvimento de outro programa, mas que neste caso não tivesse como fonte um catálogo.

Este programa foi baseado em três princípios:

1. Velocidade máxima do vapor não deve ser superior a 0,45 m/s,
2. Comprimento entre a entrada do vapor húmido e a saída do líquido terá de ser igual ou superior a 2,15 metros.
3. O tempo que o fluído demora desde que entra no depósito até que as suas gotas ficam retidas no líquido deve ser inferior ao tempo máximo calculado para essas condições.

Este último princípio, foi assegurado seguindo as fórmulas disponíveis no livro “Industrial Refrigeration Handbook”. A seguinte fórmula indica, o tempo mínimo necessário para as gotas de vapor atingirem o nível do líquido, desde que estas entram no depósito.

$$t = \frac{L}{V} = \frac{L \times A}{\dot{v}_{\text{vapor}}}$$

Legenda:

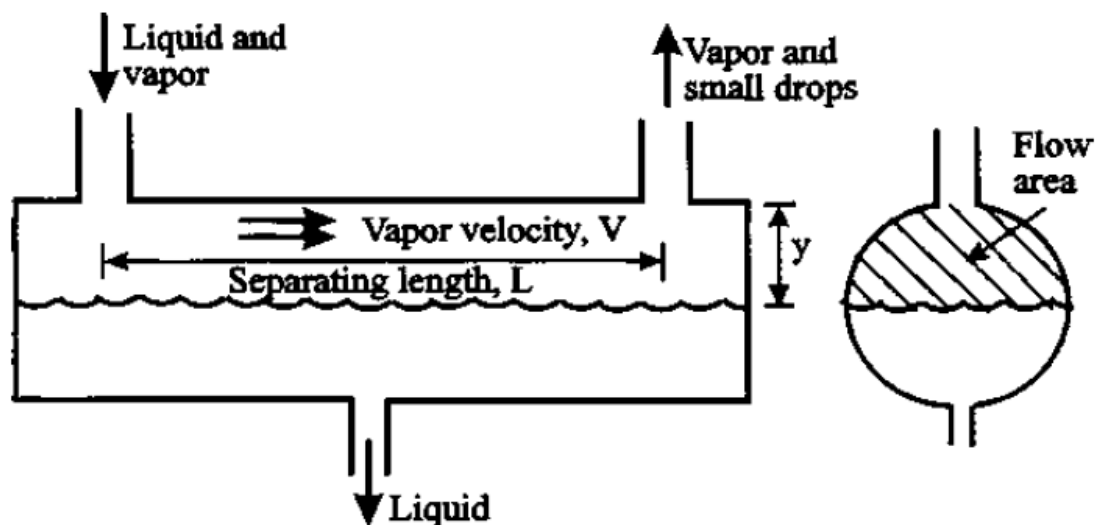
$t [s]$  = Tempo mínimo de residência

$L [m]$  = Comprimento entre a entrada de vapor húmido e a saída de vapor

$A [m^2]$  = Área transversal ocupada pelo vapor

$V \left[ \frac{m}{s} \right]$  = Velocidade horizontal do vapor

$\dot{v} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$  = caudal volúmico.



**Figura 21** - Esquema de um acumulador horizontal de um sistema de refrigeração (STOECKER WF, 1998).

A área transversal ocupada pelo vapor, foi calculada usando o seguinte método: saber o diâmetro do depósito e o nível do líquido ocupado pelo depósito. O quociente desses dois parâmetros anteriores, dará o resultado ao nível do líquido no depósito. Em seguida consulta-se a seguinte tabela, para com o valor calculado anteriormente, se retirar o volume do líquido no depósito. De seguida multiplica-se esse valor retirado da tabela pela área do depósito e obtém-se a área transversal do líquido. Seguidamente subtrai-se esse valor à área transversal do depósito, obtendo-se a área transversal ocupada pelo vapor.

Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$	Height $F_{ht}$	Volume $F_{vol}$
0.01	0.0017	0.26	0.207	0.51	0.513	0.76	0.815
0.02	0.0048	0.27	0.218	0.52	0.525	0.77	0.826
0.03	0.0087	0.28	0.229	0.53	0.538	0.78	0.837
0.04	0.0134	0.29	0.241	0.54	0.551	0.79	0.847
0.05	0.0187	0.30	0.252	0.55	0.564	0.80	0.858
0.06	0.0245	0.31	0.264	0.56	0.576	0.81	0.868
0.07	0.0308	0.32	0.276	0.57	0.588	0.82	0.878
0.08	0.0375	0.33	0.288	0.58	0.601	0.83	0.887
0.09	0.0446	0.34	0.300	0.59	0.614	0.84	0.897
0.10	0.0520	0.35	0.312	0.60	0.626	0.85	0.906
0.11	0.0599	0.36	0.324	0.61	0.639	0.86	0.915
0.12	0.0680	0.37	0.336	0.62	0.651	0.87	0.924
0.13	0.0764	0.38	0.349	0.63	0.664	0.88	0.932
0.14	0.0851	0.39	0.361	0.64	0.676	0.89	0.940
0.15	0.0941	0.40	0.374	0.65	0.688	0.90	0.948
0.16	0.103	0.41	0.386	0.66	0.700	0.91	0.955
0.17	0.113	0.42	0.399	0.67	0.712	0.92	0.963
0.18	0.122	0.43	0.411	0.68	0.724	0.93	0.969
0.19	0.132	0.44	0.424	0.69	0.736	0.94	0.976
0.20	0.142	0.45	0.436	0.70	0.748	0.95	0.981
0.21	0.153	0.46	0.449	0.71	0.759	0.96	0.987
0.22	0.163	0.47	0.462	0.72	0.771	0.97	0.991
0.23	0.174	0.48	0.474	0.73	0.782	0.98	0.995
0.24	0.184	0.49	0.487	0.74	0.793	0.99	0.998
0.25	0.196	0.50	0.500	0.75	0.805	1.00	1.000

**Tabela 12** – Coeficientes de relação entre a altura de líquido e o volume ocupado (STOECKER WF, 1998).



De seguida, usando a potencia (entalpia de vaporização), o volume específico e o caudal mássico consegue-se obter a velocidade horizontal do fluido. As fórmulas usadas para calcular esse valor foram as seguintes:

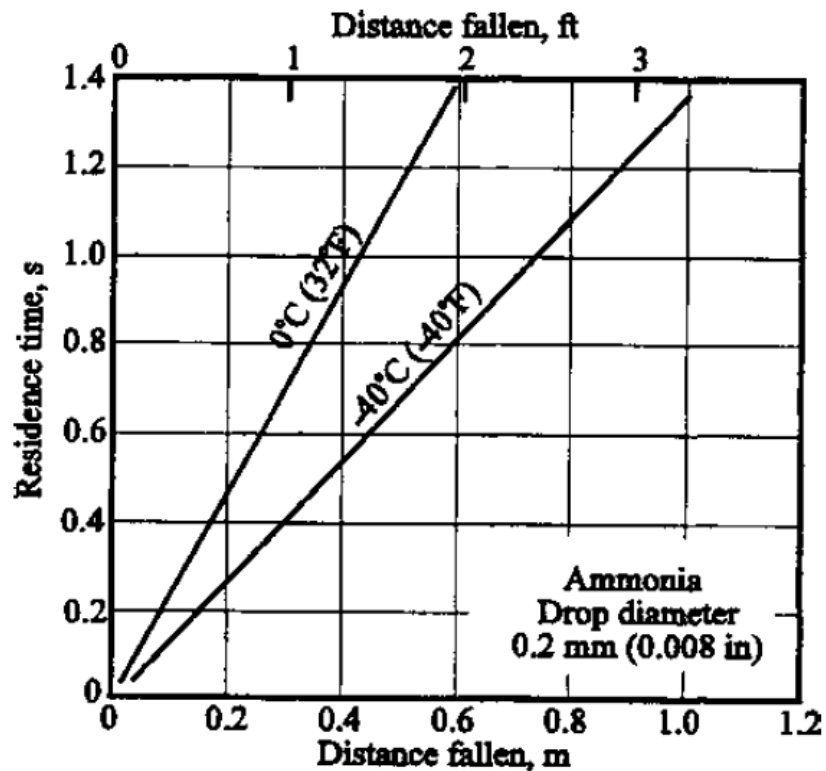
$$Q = \dot{m} \times h_{\text{vaporização}}$$

$$Q = \rho \times v_{\text{esp}} \times h_{\text{vaporização}}$$

$$v_{\text{esp}} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = \frac{Q}{\rho \times h_{\text{vaporização}}}$$

$$V_{\text{vapor}} \left[ \frac{m}{s} \right] = \frac{Q}{\rho \times h_{\text{vaporização}} \times A}$$

De seguida, compara-se o valor calculado pelo tempo mínimo de residência, Este valor é retirado do seguinte gráfico (Industrial Refrigeration Handbook):



**Figura 22** - Tempo de residência de uma gota de amoníaco *versus* a distância vertical entre a entrada do depósito e a linha de líquido (STOECKER WF, 1998).

O gráfico anterior apresenta uma limitação, (pois só apresenta duas temperaturas). Devido a essa razão teve de se calcular os valores intermédios, obtendo-se a seguinte tabela:

	Distance fallen [m]	Residence time [s]	$y = m \cdot x$
Ammonia temperature	Initial point (0,0)		m
0	0.6	1.4000	2.333
-1	0.6	1.3850	2.308
-2	0.6	1.3700	2.283
-3	0.6	1.3550	2.258
-4	0.6	1.3400	2.233
-5	0.6	1.3250	2.208
-6	0.6	1.3100	2.183
-7	0.6	1.2950	2.158
-8	0.6	1.2800	2.133
-9	0.6	1.2650	2.108
-10	0.6	1.2500	2.083
-11	0.6	1.2350	2.058
-12	0.6	1.2200	2.033
-13	0.6	1.2050	2.008
-14	0.6	1.1900	1.983
-15	0.6	1.1750	1.958
-16	0.6	1.1600	1.933
-17	0.6	1.1450	1.908
-18	0.6	1.1300	1.883
-19	0.6	1.1150	1.858
-20	0.6	1.1000	1.833
-21	0.6	1.0850	1.808
-22	0.6	1.0700	1.783
-23	0.6	1.0550	1.758
-24	0.6	1.0400	1.733
-25	0.6	1.0250	1.708
-26	0.6	1.0100	1.683
-27	0.6	0.9950	1.658
-28	0.6	0.9800	1.633
-29	0.6	0.9650	1.608
-30	0.6	0.9500	1.583
-31	0.6	0.9350	1.558
-32	0.6	0.9200	1.533
-33	0.6	0.9050	1.508
-34	0.6	0.8900	1.483
-35	0.6	0.8750	1.458
-36	0.6	0.8600	1.433
-37	0.6	0.8450	1.408
-38	0.6	0.8300	1.383
-39	0.6	0.8150	1.358
-40	0.6	0.8000	1.333

**Tabela 13** – Valores usados para determinar equações de reta que relacionam a distância de queda de uma gota de amoníaco com o tempo de residência da mesma, para diferentes temperaturas de amoníaco.

Na tabela é referida a equação de reta característica a cada temperatura. Através da tabela conseguimos determinar o tempo de residência máximo.

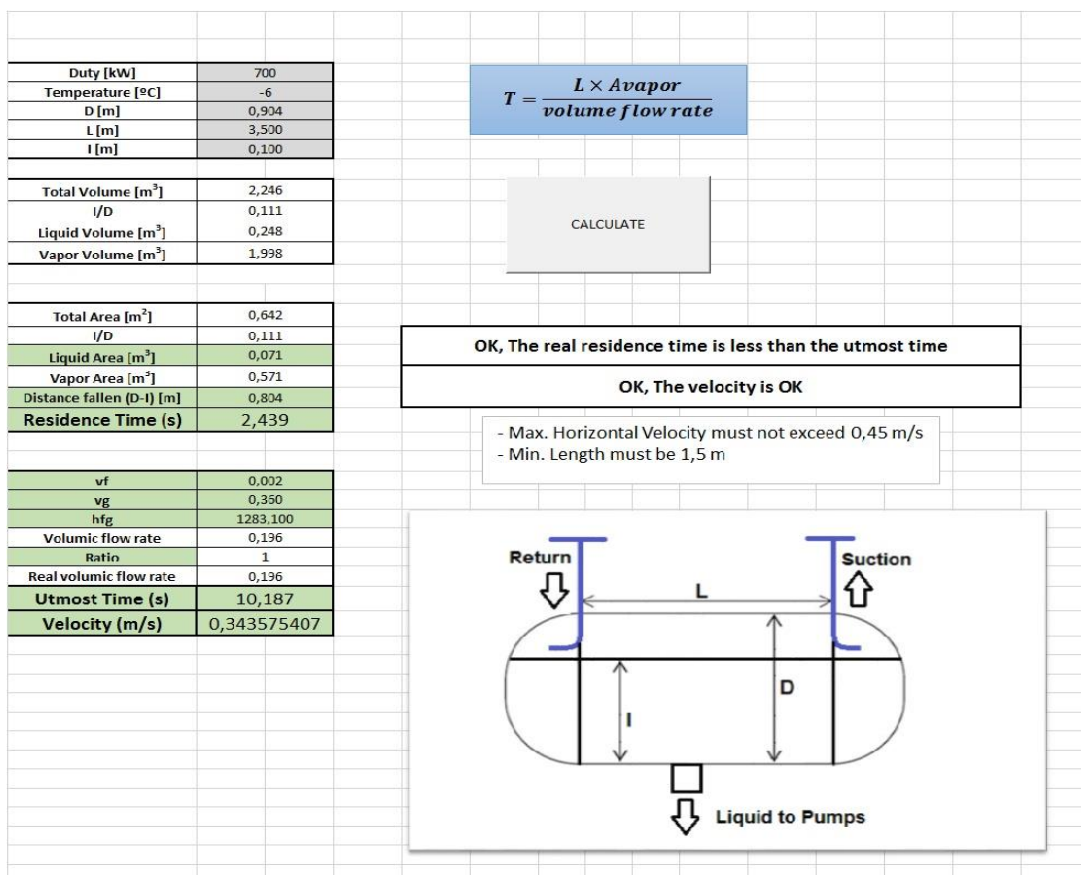
Na aplicação os dados que são necessários introduzir são:

1. Potência frigorífica;
2. Temperatura;
3. Diâmetro do depósito;
4. Comprimento do depósito.

Com o valor da temperatura é possível determinar a entalpia de vaporização e o volume específico do amoníaco. Com esses valores, o programa calcula todos os valores necessários. O programa depois de realizar esses cálculos, irá apresentar um resumo, onde podemos facilmente verificar se os dados introduzidos cumprem os requisitos necessários.

A tabela usada para retirar os valores da entalpia de vaporização e o volume específico do amoníaco, foi retirada da Table 17s: Properties of Saturated Ammonia – Temperature Table (SI).

A aplicação apresenta a seguinte interface:



**Figura 23** - Aplicativo informático desenvolvido para fornece o resultado final



## Capítulo 4 -Atividades complementares desenvolvidas no estágio:

No decorrer do estágio, foram desenvolvidas enumeradas atividades, para além dos softwares descritos nos capítulos anteriores. A elaboração de orçamentos, para futuros projetos, foi uma das actividades também desenvolvidas. O cliente referia o tipo de instalação e a finalidade da instalação. Com a ajuda dos programas anteriores era possível definir o tipo de produtos que o cliente necessitava. O passo seguinte, era entrar em contacto com os fornecedores, para assim ter disponível o valor de cada produto necessário, sendo depois produzido um orçamento final para o cliente. Este processo era o tempo todo monitorizado, pelo engenheiro Óscar Lobo, no qual nos aconselhava e corrigia quando necessário.

Uma outra atividade desenvolvida foi a visita a uma instalação que se encontrava numa fase extremamente avançada, no mês de Novembro de 2013. No qual foi possível, compreender a parte pratica da instalação dos diversos aparelhos necessários, numa instalação deste tipo. Esta instalação em concreto, tinha como objetivo aumentar a capacidade de armazenamento de produtos alimentares. Para tal, a instalação usava como fluido “principal” a amonia, e como fluido “ secundário” o glicol. A imagem 24, demonstra a dimensão dos condensadores instalados.



**Figura 24-** Condensadores

Em Maio de 2014, realizou-se uma visita, a uma filial da empresa, ADC, A qual durou uma semana. Esta filial tem como finalidade, analisar e desenvolver compressores. Nesta semana, foi possível ter um conhecimento mais profundo e prático do funcionamento dos

compressores. Foi possível, visualizar testes práticos a diferentes tipos de compressores, como por exemplo, o cálculo da quantidade de óleo que é “arrastado” para o sistema. A imagem 25 mostra um compressor que foi submetido a vários testes. Nessa visita, foi também possível, adquirir alguns conhecimentos no programa solidworks, onde se realizaram algumas atividades.



**Figura 25 - Compressor fabricado pela "J & E Hall"**

Todas estas visitas foram extremamente proveitosas do ponto de vista pedagógico, isto porque, foi possível observar na prática certos processos abordados teoricamente.

Em suma, todas as actividades desenvolvidas durante estes seis meses de estágio, foram deveras enriquecedoras ao nível profissional.

## Conclusão

Após os seis meses propostos para a realização do estágio curricular, a conclusão retirada é que todos os propósitos estabelecidos no início do estágio foram atingidos.

No decorrer desses seis meses, foram desenvolvidos cinco programas que nos foram propostos realizar, e a aprendizagem dos diversos passos a realizar na produção de um orçamento profissional. O feedback da empresa em relação ao nosso desempenho e programas desenvolvidos foi bastante positivo, isto porque com a utilização dos programas desenvolvidos, a empresa rentabiliza o tempo nos dimensionamentos que necessita realizar.

Do ponto de vista individual, de referir que este estágio curricular, foi deveras importante, tanto para o meu desenvolvimento profissional, servindo como uma ponte entre a vida académica e a vida profissional, e também como uma experiência bastante enriquecedora na vertente pessoal. O meu desenvolvimento profissional deveu-se ao facto de existirem grandes profissionais que me apoiaram de uma forma incondicional. Foi com enorme prazer que convivi e contribuí com algo para a empresa J&E Hall.





## Bibliografia

ASHRAE Handbook - Refrigeration, ASHRAE Inc., 2006. ISBN: 978-1-931862-86-8

BS EN 13136:2001 Refrigerating systems and heat pumps – Pressure relief devices and their associated piping – Methods for calculation. ISBN 0-580-38288-5

Calor específico de materiais [Consult. 21 Abril 2014]. WWW:<URL:  
[http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html)>;

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. – *Thermodynamics, an engineering approach*, McGraw-Hill.

Danfoss aprendizagem [Consult. 10 Jan. 2014]. WWW:<URL:  
<http://learning.danfoss.com/portuguese>>; 2013

Engineering toolbox-.( [http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d\\_154.html](http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html))

FRAZER Stephen. Diagrama psicrométrico [Consult. 22 Mar. 2014]. Disponível em  
WWW:<URL:[http://www.arca53.dsl.pipex.com/index\\_files/psy3.htm](http://www.arca53.dsl.pipex.com/index_files/psy3.htm)>;

Humidity Formulas [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em  
WWW:<URL:[http://www.gorhamschaffler.com/humidity\\_formulas.htm](http://www.gorhamschaffler.com/humidity_formulas.htm)>;

MALÇA J – Instalações Frigoríficas – Textos de apoio da disciplina, 2009

MALÇA J. *Sistemas de Climatização*, 2010

MAURO Alvaro. Propriedade do Ar Atmosférico [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em  
WWW:<URL:<http://pt.scribd.com/doc/232768607/2-propriedades-Do-Ar-Atmosferico>>;  
2006

OGAWA Arthur. Diagrama psicrométricos [Consult. 18 Mar. 2014]. WWW:<URL:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Psychrometrics#mediaviewer/File:PsychrometricChart.SeaLevel.SI.svg>>; 2009

STOECKER WF – *Industrial Refrigeration Handbook*, McGraw-Hill, 1998. ISBN: 0-070-61623-X

SANTOS L. *Psicrometria*, 2011

STULL Roland. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature  
[Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em  
WWW:<URL:<https://wiki.engr.illinois.edu/download/attachments/45842726/Stull+2011+-+Wet+Bulb+from+RH+and+T.pdf?version=1&modificationDate=1359651680000>>; 2011

S.A. Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature [Consult. 14 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL:<https://wiki.engr.illinois.edu>.

edu/download/attachments/45842726/Stull+2011+Wet+Bulb+from+RH+and+T.pdf?version=1&modificationDate=1359651680000>; 2011

THOME JR. Engineering Data Book III. [Em linha] Wolverine Tube, Inc, [Consult. 15 Fev. 2014]. Disponível em WWW:<URL:www.wlv.com/wp-content/uploads/2014/06/databook3/data/db3ch13.pdf>; 2004