



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**Projecto de Entreposto Frigorífico a R-744/R-717  
Para Produtos Congelados**

**Luís Filipe Azevedo Alves Bento**  
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

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

Orientadores:

Eng.º António Manuel Matos Guerra

Eng.º Francisco Manuel Gonçalves dos Santos

Júri:

Presidente: Prof. Francisco Manuel Fernandes Severo

Vogais: Prof. João Nuno Pinto Garcia

Prof. António Manuel Matos Guerra

**Dezembro de 2011**

## **Resumo**

Pretende-se com este trabalho de Projecto de Mestrado conceber uma câmara frigorífica de 20000  $m^3$  para armazenar produtos congelados e estudar um sistema frigorífico com dois fluidos frigorígenos que serão o  $CO_2$  (R-744) e o  $NH_3$  (R-717)

O trabalho inicia-se com a definição dos objectivos principais para o projecto de um sistema frigorífico deste tipo.

Após a definição dos objectivos, o projecto propõe um estudo termodinâmico do  $CO_2$  (R-744) como fluido frigorígeno, definindo se o seu historial de utilização, características principais, diagrama pressão-entalpia com a distinção das diversas fases do fluido, comparação em diversos parâmetros com outros fluidos, o porquê da utilização deste fluido, problemas comuns em sistemas com a presença deste fluido, entre outros parâmetros de estudo.

De seguida será feito o dimensionamento de uma câmara frigorífica de 20000  $m^3$  para armazenar produtos congelados paletizados através de um balanço térmico manual e um balanço térmico informático através do programa da *Centauro* comparando no final o resultado dos dois métodos.

Será feito uma descrição das características básicas da câmara frigorífica com um esquema simples do edifício.

Será abordado de seguida o sistema frigorífico a  $CO_2$  (R-744) e a  $NH_3$  (R-717) nas suas diversas características, nomeadamente no cálculo de caudais, diagrama pressão-entalpia, dimensionamento de tubagens e finalmente selecção de equipamento. Procedese assim também ao estudo um sistema apenas a  $NH_3$  (R-717) com as suas diversas características nomeadamente no cálculo de caudais, diagrama pressão-entalpia, dimensionamento de tubagens e finalmente selecção dos equipamentos mais importantes, para que desta forma se proceda à comparação dos dois sistemas a nível energético, consumo eléctrico e manutenção de equipamentos.

Finalmente proceder-se-á interpretação de resultados com o objectivo final de escolher a melhor solução nos vários parâmetros de comparação, para o esquema em questão.

**Palavras-chave:** Entrepasto frigorífico, Câmara frigorífica, Produtos Congelados, Balanço Térmico,  $NH_3$  (R-717),  $CO_2$  (R-744), Fluido frigorígeno, Sistema Frigorífico.

## **Abstract**

The intent of this study is to develop a Project Master of a refrigeration plant of 20,000  $m^3$  for storage of frozen products and to do a study about a system with two fluids that will be the  $CO_2$  (R – 744) and the  $NH_3$  (R – 717)

The work begins with the definition of the main objectives for the design of a refrigeration system of this type.

After defining the objectives, the project proposes a thermodynamic study of the  $CO_2$  (R-744) as refrigerant fluid, setting its history of use, main characteristics, pressure-enthalpy diagram with the distinction of the various phases of the fluid, various parameters compared with other fluids, why the use of this fluid, common problems in systems with the presence of this fluid, and other study parameters.

Next will be the design of a refrigeration plant of 20,000  $m^3$  for storage of frozen products palletized using a manual heat balance and a computer heat balance computer through a Centauro program comparing the results of two methods.

Then, will be made a basic description of the characteristics of the refrigeration plant with a simple layout of the building.

The next step will be the study of the refrigeration system with two fluids,  $CO_2$ (R-744) and  $NH_3$  (R-717) in its various features, including the calculation of volume and mass flows, pressure-enthalpy diagram, pipe sizing and finally selecting equipment. This was done also to the refrigeration system only with one fluid,  $NH_3$  (R-717) with its many features including the calculation of volume and mass flow, pressure-enthalpy diagram, pipe sizing and finally selecting the most important equipment for this order to proceed to the comparison of two systems.

Finally it will be made an interpretation of the results with the ultimate goal of choosing the best solution in the various parameters compared to the scheme in question.

**Key Words:** Refrigeration plant, frozen products, Thermal Balance,  $NH_3$  (R-717),  $CO_2$  (R-744), refrigerant fluid, Refrigeraton System.

## **Agradecimentos**

Ao professor António Manuel Matos Guerra, pelo seu apoio, orientação e total disponibilidade no esclarecimento de dúvidas

À minha família, amigos e colegas, por me terem incentivado e apoiado sempre, assim como pela colaboração.

## Índice

1. Objectivos.....	1
2. Estudo Termodinâmico do $CO_2$ como fluido frigorígeno.....	2
2.1. Introdução .....	2
2.2.História.....	3
2.3.Características Principais.....	4
2.4.Diagrama Pressão-Entalpia.....	9
2.5.Comparação de diversos fluidos com o R744 ( $CO_2$ ) .....	11
2.6.Regimes de Trabalho Sub-Criticos para o R744 ( $CO_2$ ) .....	14
2.7.Regimes de Trabalho Super-Criticos para o R744( $CO_2$ ) .....	15
2.8.Pressão de Projecto .....	15
2.9.O porque do R-744 ( $CO_2$ ) .....	16
2.10. Problemas comuns em sistemas a $CO_2$ .....	17
2.11. Principais componentes de um sistema em Cascata.....	18
3. Câmara Frigorífica de congelados ( $-25^\circ C$ ) de $20000 m^3$ .....	21
3.1.Balanco Térmico Manual – Metodologia de Cálculo .....	23
3.2.Balanco Térmico Manual – Resultados Obtidos .....	28
3.3.Balanco Térmico Manual – Quadro Resumo .....	32
3.4.Balanco Térmico Informático .....	33
4. Características Iniciais e Esquema da Instalação .....	35
5. Sistema frigorífico para congelados ( $-25^\circ C$ ) a $CO_2/NH_3$ .....	36
5.1.Diagrama P-h e Cálculo de Caudais.....	38
5.1.1. Diagrama P-h $CO_2$ .....	38
5.1.2. Diagrama P-h $NH_3$ .....	39
5.1.3. Cálculo de Caudais - $CO_2$ .....	40
5.1.4. Cálculo de Caudais - $NH_3$ .....	40
5.2.Diferenciais Térmicos .....	41
6. Dimensionamento de Tubagens para o Sistema Frigorífico a $CO_2/NH_3$ .....	43
6.1.Método de Cálculo.....	43
6.2.Resultados Obtidos .....	44
6.2.1. Tubagens do lado do $CO_2$ .....	44
6.2.2. Correção da Velocidade - $CO_2$ .....	44
6.2.3. Tubagens do lado do $NH_3$ .....	44
6.2.4. Correção da Velocidade - $NH_3$ .....	45
7. Caracterização Geral do Sistema.....	46
8. Selecção do Equipamento para o Sistema Frigorífico a $CO_2/NH_3$ .....	48
8.1. $CO_2$ .....	48
8.1.1. Evaporadores .....	48
8.1.2. Compressores .....	50
8.1.3. Depósito de Líquido .....	51
8.1.4. Separador de Óleo.....	51
8.1.5. Válvula de Solenoide.....	52

8.1.6.	Válvula de Retenção .....	53
8.1.7.	Válvula de Globo ou Passagem.....	54
8.1.8.	Válvula de Expansão Termostática .....	54
8.1.9.	Filtro Excicador.....	55
8.1.10.	Visor de Líquido .....	55
8.1.11.	Distribuidor de Líquido.....	56
8.1.12.	Pressostato de Alta e Baixa Pressão .....	56
8.2.	Permutador de Calor de Placas.....	57
8.3.	$NH_3$ .....	58
8.3.1.	Compressores .....	58
8.3.2.	Condensador Evaporativo.....	59
8.3.3.	Depósito de Líquido .....	60
8.3.4.	Separador de Líquido .....	61
8.3.5.	Bombas a $NH_3$ .....	62
8.3.6.	Válvula de Expansão Manual.....	62
8.3.7.	Válvula de Solenoide.....	63
8.3.8.	Válvula de Retenção .....	63
8.3.9.	Válvula de Globo .....	64
8.3.10.	Pressostato de Alta e Baixa Pressão .....	65
8.3.11.	Separador de Óleo.....	65
9.	Sistema Frigorífico para congelados a $-25^{\circ}C$ a $NH_3$ clássico .....	66
9.1.	Diagrama P-h e Cálculo de Caudais .....	68
9.1.1.	Diagrama P-h - $NH_3$ .....	68
9.1.2.	Cálculo de Caudais – $NH_3$ .....	69
10.	Dimensionamento de Tubagens para Sistema Frigorífico a $NH_3$ .....	71
10.1.	Método de Cálculo.....	71
10.2.	Resultados Obtidos .....	72
10.3.	Correcção da Velocidade .....	72
11.	Seleção do Equipamento para o sistema frigorífico a $NH_3$ .....	73
11.1.	Evaporadores .....	73
11.2.	Compressores .....	75
11.2.1.	Baixa Pressão.....	75
11.2.2.	Alta Pressão .....	75
11.3.	Condensador Evaporativo.....	77
11.4.	Bombas.....	78
11.5.	Válvula de Solenoide.....	79
11.6.	Depósito Intermédio .....	79
11.7.	Válvula de Expansão Manual.....	79
12.	Comparação do sistema a $CO_2/NH_3$ com o sistema a $NH_3$ clássico.....	80
12.1.	Nível Energético .....	80
12.2.	Consumo Eléctrico.....	82
12.2.1.	Sistema a $CO_2/NH_3$ .....	82

12.2.2. Sistema a $NH_3$ .....	85
12.3. Manutenção de Equipamentos .....	88
12.3.1. Revisão Geral .....	88
12.3.2. Técnico .....	89
12.3.3. Medição de Pressões e Temperaturas.....	89
12.3.4. Classificação das Reclamações .....	89
12.3.5. Localização das Avarias.....	90
12.3.6. Tipo de Avarias mais Importantes – Fugas .....	91
12.3.7. Efeitos Prejudiciais dos Poluentes .....	92
13. Escolha da Melhor Solução – Conclusões .....	93
14. Bibliografia.....	94
15. Anexos .....	95

## Índice de Figuras

Figura 1 – Exemplo de ciclos em sistemas de ar condicionado .....	2
Figura 2 – Evolução de utilização do $CO_2$ como fluido frigorígeno .....	3
Figura 3 – Evolução da utilização de vários fluidos entre 1950 e 1970.....	4
Figura 4 – Viscosidade do R-744 em função da temperatura.....	5
Figura 5 – Pressão vs Entalpia e Temperatura vs Entropia.....	5
Figura 6 – Variação da Entropia e Entalpia em função da Temperatura .....	6
Figura 7 – Pressão de vapor de vários fluidos em função da Temperatura .....	6
Figura 8 – Tensão Superficial de diversos fluidos .....	7
Figura 9 – Variação das características do R-744 ao longo de um processo isobárico.....	7
Figura 10 – Densidade de vários fluidos frigorígenos.....	8
Figura 11 – Densidade do $CO_2$ na fase Líquido e Vapor .....	8
Figura 12 – Diagrama Pressão-Entalpia do $CO_2$ /R-744 .....	9
Figura 13 – Diagrama Pressão-Entalpia de fases do $CO_2$ .....	10
Figura 14 – Comparação de diversos fluidos com o $CO_2$ /R-744 – I.....	11
Figura 15 - Comparação de diversos fluidos com o $CO_2$ /R-744 – II.....	11
Figura 16 - Comparação de diversos fluidos com o $CO_2$ /R-744 – III .....	12
Figura 17 - Comparação de diversos fluidos com o $CO_2$ /R-744 – IV .....	12
Figura 18 - Comparação de diversos fluidos com o $CO_2$ /R-744 – V.....	13
Figura 19 – Regime de Trabalho 1 (-40°C/0°C) .....	13
Figura 20 – Regime de Trabalho 2 (-40°C/25°C) .....	14
Figura 21 – Regime de Trabalho 3 (-10°C/35°C) .....	14
Figura 22 – Esquema simplificado de um sistema em cascata com $CO_2/NH_3$ .....	15
Figura 23 - Compressor a R-134a e a R-744 .....	18
Figura 24 – Diagrama P-h de um sistema frigorifico simples .....	22

Figura 25 – Gráfico circular das cargas térmicas da câmara .....	32
Figura 26 – Simulação no Programa da Centauro – I.....	33
Figura 27 – Simulação no Programa da Centauro – II .....	34
Figura 28 – Simulação no Programa da Centauro – III.....	34
Figura 29 – Esquema em planta da câmara frigorífica.....	35
Figura 30 – Esquema do sistema frigorífico a $CO_2/NH_3$ .....	36
Figura 31 – Diagrama P-h do $CO_2$ .....	38
Figura 32 – Diagrama P-h do $NH_3$ .....	39
Figura 33 – Balanço de massa ao Separador de Líquido .....	41
Figura 34 – Processos Térmicos no Evaporador .....	41
Figura 35 – Esquema completo do sistema frigorífico a $CO_2/NH_3$ .....	46
Figura 36 – Factor de correcção devido à formação de gelo .....	48
Figura 37 – Quadro de selecção do Evaporador.....	49
Figura 38 – Evaporador NKH...S .....	49
Figura 39 – Selecção do compressor através do programa da <i>Bitzer</i> .....	50
Figura 40 – Compressor 4NSL-30K-40P .....	50
Figura 41 – Selecção do Depósito de Líquido do lado do $CO_2$ .....	51
Figura 42 – Depósito de Líquido F1602K .....	51
Figura 43 – Selecção do Separador de Óleo para os compressores a $CO_2$ .....	51
Figura 44 – Separador de Óleo 135A .....	52
Figura 45 – Selecção da Válvula de Solenoide .....	52
Figura 46 – Válvula de Solenoide da série EVR e EVRH.....	52
Figura 47 – Selecção da Válvula de Retenção.....	53
Figura 48 – Válvula de Retenção do tipo NRVH.....	53
Figura 49 – Selecção da Válvula de Globo ou Passagem .....	54
Figura 50 – Válvula de Passagem T51FL-CO2.....	54

Figura 51 – Selecção da Válvula de Expansão Termostática CX4-CO2 .....	54
Figura 52 – Selecção do Filtro Excicador .....	55
Figura 53 – Filtro Excicador modelo DCR .....	55
Figura 54 – Selecção do Visor de Líquido .....	55
Figura 55 – Selecção do Distribuidor de Líquido .....	56
Figura 56 – Distribuidor de Líquido SGR1.5-20 .....	56
Figura 57 – Selecção do Pressostato de Alta e Baixa Pressão.....	56
Figura 58 – Selecção do Permutador de Calor .....	57
Figura 59 – Permutador da LM de placas .....	57
Figura 60 – Selecção dos compressores a $NH_3$ através do programa da <i>Bitzer</i> .....	58
Figura 61 – Compressor seleccionado OSKA7461-K.....	58
Figura 62 – Factor FR para selecção do Condensador Evaporativo .....	59
Figura 63 – Selecção do modelo 65B para Condensador Evaporativo .....	59
Figura 64 – Factor de cálculo do calor dissipado no condensador .....	60
Figura 65 – Selecção do Depósito de líquido do lado do $NH_3$ .....	60
Figura 66 – Selecção do Separador de Líquido .....	61
Figura 67 – Separador de Líquido modelo 6/530.....	61
Figura 68 – Selecção das Bombas a $NH_3$ .....	62
Figura 69 – Selecção da Válvula de Expansão Manual.....	62
Figura 70 – Selecção da Válvula de Solenoide .....	63
Figura 71 – Selecção da Válvula de Retenção.....	64
Figura 72 – Selecção da Válvula de globo ou passagem .....	64
Figura 73 – Válvula de Globo ou Passagem modelo 150LB.....	65
Figura 74 – Selecção do Pressostato de Alta e Baixa Pressão.....	65
Figura 75 – Selecção do Separador de Óleo para os compressores a $NH_3$ .....	66
Figura 76 – Esquema do Sistema Frigorífico de dois andares apenas a $NH_3$ .....	68

Figura 77 – Diagrama Pressão-Entalpia $NH_3$ .....	69
Figura 78 – Balanço de massa ao Separador de Líquido .....	69
Figura 79 – Balanço de massa ao Depósito Intermédio .....	73
Figura 80 – Factor de Correção devido à formação de gelo .....	74
Figura 81 – Selecção dos Evaporadores para o sistema a $NH_3$ .....	74
Figura 82 – Evaporador da <i>Helpman</i> modelo 348-8 (ZLA) .....	75
Figura 83 – Selecção dos compressores de Baixa pressão.....	76
Figura 84 – Selecção dos compressores de Alta Pressão através do programa da <i>Bitzer</i>	76
Figura 85 – Compressor seleccionado OSKA7441-K.....	77
Figura 86 – Factor FR para selecção do Condensador Evaporativo.....	77
Figura 87 – Selecção do modelo 65B para Condensador Evaporativo .....	78
Figura 88 – Factor de Cálculo para calor dissipado no Condensador .....	78
Figura 89 – Bombas para $NH_3$ .....	78
Figura 90 – Selecção da Válvula de Solenoide .....	79
Figura 91 – Selecção do Depósito Intermédio.....	79
Figura 92 – Selecção da Válvula de Expansão Manual.....	79

## **Índice de Tabelas**

Tabela 1 – Parâmetros do $Q_1$ .....	23
Tabela 2 – Parâmetros de cálculo da Resistência Térmica .....	24
Tabela 3 – Parâmetros de cálculo da espessura de isolamento.....	24
Tabela 4 – Parâmetros para o cálculo do $Q_3$ .....	24
Tabela 5 – Tempo de Abertura de Portas .....	25
Tabela 6 – Duração média de abertura de portas para várias situações .....	25
Tabela 7 – Parâmetros de cálculo do $Q_4$ .....	25
Tabela 8 – Parâmetros de cálculo do $Q_5$ .....	26
Tabela 9 – Quantidade de calor libertado por pessoa a várias temperaturas .....	26
Tabela 10 – Parâmetros de cálculo do $Q_6$ .....	26
Tabela 11 – Características definidas para a câmara frigorífica.....	28
Tabela 12 – Características definidas para a câmara frigorífica (cont.) .....	28
Tabela 13 – Cargas térmicas das paredes, tecto e pavimentos .....	29
Tabela 14 – Espessura de Isolante e Normalizadas .....	29
Tabela 15 – Áreas das paredes, tecto e pavimento.....	29
Tabela 16 – Coeficiente Global de Transmissão de Calor (U) .....	30
Tabela 17 – Parâmetros da carga térmica devido a abertura de portas.....	30
Tabela 18 – Parâmetros da carga térmica devido à iluminação .....	30
Tabela 19 – Parâmetros da carga térmica devido ao pessoal de estiva .....	31
Tabela 20 – Carga Térmica devido aos produtos armazenados .....	31
Tabela 21 – Quadro resumo das cargas térmicas da câmara .....	32
Tabela 22 – Características iniciais da câmara .....	35
Tabela 23 – Características iniciais da câmara (cont.) .....	35
Tabela 24 – Legenda do esquema frigorífico a $CO_2 / NH_3$ .....	37
Tabela 25 – Propriedades Termodinâmicas da Evolução do sistema.....	38
Tabela 26 – Propriedades Termodinâmicas do ponto 2' ( $CO_2$ ) .....	38

Tabela 27 – Propriedades Termodinâmicas do sistema frigorífico ( $NH_3$ ) .....	39
Tabela 28 – Propriedades Termodinâmicas do ponto 2'' .....	39
Tabela 29 – Velocidades recomendadas respectivas linhas .....	43
Tabela 30 – Características e diâmetros nas diversas linhas do $CO_2$ .....	44
Tabela 31 – Velocidade corrigida de cada linha .....	44
Tabela 32 – Características e diâmetros das diversas linhas do $NH_3$ .....	44
Tabela 33 – Velocidade corrigida de cada linha .....	45
Tabela 34 – Legenda do esquema completo do sistema frigorífico.....	47
Tabela 35 – Parâmetros de cálculo da selecção do Evaporador .....	48
Tabela 36 – Legenda do esquema frigorífico de dois andares a $NH_3$ .....	67
Tabela 37 – Propriedades termodinâmicas da evolução do sistema .....	68
Tabela 38 – Propriedades dos pontos 2' e 4' .....	68
Tabela 39 – Velocidades recomendadas das diversas linhas .....	71
Tabela 40 – Características e respectivos diâmetros das diversas linhas .....	72
Tabela 41 – Velocidade corrigida das diversas linhas .....	72
Tabela 42 – Parâmetros de cálculo da capacidade do evaporador .....	73
Tabela 43 – Energia disponível no fluido no sistema a $CO_2 / NH_3$ .....	80
Tabela 44 – Energia disponível no fluido no sistema a $NH_3$ .....	80
Tabela 45 – Eficiências, Rend. Volumétrico e taxa de compressão .....	81
Tabela 46 – Potência absorvida dos equipamentos do sistema .....	82
Tabela 47 – Consumo Eléctrico do sistema a $CO_2 / NH_3$ .....	83
Tabela 48 – Consumo diário e mensal do sistema a $CO_2 / NH_3$ .....	84
Tabela 49 – Potência absorvida dos equipamentos do sistema $NH_3$ .....	85
Tabela 50 – Consumo Eléctrico do sistema a $NH_3$ .....	86
Tabela 51 – Consumo diário e mensal do sistema a $NH_3$ .....	87
Tabela 52 – Diferença de Consumos entre os dois sistemas .....	87

### **Lista de Símbolos**

#### Sistema Frigorífico a $CO_2/NH_3$

$Q_{evap}$  – Carga Térmica da câmara frigorífica ou carga térmica de evaporação (kW)

$\dot{m}_{CO_2}$  – Caudal mássico que circula do lado do  $CO_2$  (kg/s)

$W_c$  – Trabalho de Compressão (kW)

$Q_{Permutador}$  – Potência do Permutador ou carga transferida no mesmo (kW)

$Q_H$  – Carga Térmica de Condensação (kW)

$\dot{m}_{NH_3(1)}$  – Caudal mássico que circula entre o separador de líquido do lado do  $NH_3$  (kg/s)

$\dot{m}_{NH_3(2)}$  – Caudal mássico que circula na tubagem principal do lado do  $NH_3$  (kg/s)

$t_{bh}$  – Temperatura média de bolbo húmido para a zona de Lisboa (°C)

$\Delta T_m$  – Diferença média aritmética de temperatura (°C)

$t_e$  – Temperatura de entrada do ar no evaporador (°C)

$t_s$  – Temperatura de saída do ar no evaporador (°C)

$\dot{V}$  – Caudal Volumétrico ( $m^3/h$ )

$A$  – Área da Tubagem ( $m^2$ )

$C$  – Velocidade recomendada para cada linha de tubagem (m/s)

$d$  – diâmetro interno da tubagem (mm)

#### Sistema Frigorífico a $NH_3$

$\dot{m}_1$  – Caudal mássico que circula entre o separador de líquido (kg/s)

$\dot{m}_2$  – Caudal mássico que circula entre o depósito intermédio e o compressor de baixa pressão (kg/s)

$\dot{m}_3$  – Caudal mássico que circula entre o compressor de alta pressão e o depósito intermédio (kg/s)

#### Outros

$\mathcal{E}_f$  – Eficiência Frigorífica

**COP** – Eficiência da Bomba de calor

$\eta_v$  – Rendimento Volumétrico (%)

$\tau$  – Taxa de compressão

## **Lista de Abreviaturas**

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de Carbono

**NH<sub>3</sub>** – Amoníaco

**HCFC** – Hidrofluorcarbonato

**CFC** – Clorofluorcarbonato

**R717** – Fluido frigorígeno (Amoníaco - NH<sub>3</sub>)

**R744** – Fluido frigorígeno (Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub>)

**R134a** – Tetrafluroetano

**R404A** – Fluido Frigorígeno (constituído por vários fluidos)

**ANC** – Aglomerado de cortiça