

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**LUCIANO CESAR COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONDENSADOR CASCATA DE CO<sub>2</sub> E R-404A**

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**LUCIANO CESAR COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONDENSADOR CASCATA DE CO<sub>2</sub> E R-404A**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Engenharia térmica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

**CAXIAS DO SUL  
2020**

**LUCIANO CESAR COSTA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONDENSADOR CASCATA DE CO<sub>2</sub> E R-404A**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul. Área de concentração: Engenharia térmica.

**Aprovado em: 03/ 07/ 2020.**

**Banca Examinadora:**

Presidente

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Examinadores:

---

Prof. Me. Tomás Augusto Polidoro  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Me. Sérgio da Silva Kucera  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Dedico aos meus pais e esposa que sempre estiveram ao meu lado, me auxiliando, incentivando e concedendo apoio para superar as dificuldades que surgiram neste período. Muito obrigado!

## **AGRADECIMENTOS**

Quero expressar meus agradecimentos a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, colaboraram para que este trabalho fosse realizado. Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini, pela sua competência e orientação durante todo o desenvolvimento desta monografia. Agradeço a empresa Tecnofrio Equipamentos Frigoríficos Ltda, pelo apoio, confiança e a oportunidade de conceder as informações para a realização desse estudo.

Em especial, aos meus familiares, que contribuíram de alguma forma durante a pesquisa, pela sua compreensão e apoio, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e por acreditarem em minhas escolhas, apoiando e esforçando-se junto a mim, para que eu suprisse todas elas.

*“Mesmo as pessoas que dizem que tudo está predeterminado e que não podemos fazer nada para mudá-lo, olham para os dois lados antes de atravessar a rua”.*

**Stephen Hawking**

## RESUMO

Em um sistema de refrigeração subcrítico de cascata simples, que utiliza o CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante no lado de baixa pressão operando por expansão direta, é necessário um trocador de calor para realizar a condensação. Esse condensador, do tipo casco e tubo de dois passes nos tubos e um passe no casco, que condensa e subresfria o R-744 (CO<sub>2</sub>) superaquecido no interior dos tubos à custa da energia cedida ao fluido refrigerante R-404A, o qual evapora no lado do casco. O presente estudo teve por objetivo, determinar o coeficiente global de transferência de calor do equipamento, por meio de uma forma construtiva ideal baseada na norma TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*), para que o R-404A execute a mudança de estado físico do dióxido de carbono pela transferência de calor. Para atingir a meta traçada foi utilizada a metodologia encontrada na literatura pertinente e baseada nos cálculos especificados. A apresentação do estudo é realizada pelo desenvolvimento matemático, utilizando as correlações de Palen para o lado do casco e para o interior dos tubos as correlações descritas por Gnielinski e Iqbal e Bansal (2011). O equipamento resultante teve um coeficiente global de transferência de calor de 431 W/m<sup>2</sup>.K, para uma superfície de troca térmica de 5,49 m<sup>2</sup>, suficiente para realizar a troca térmica de 28,25 kW. Os resultados são comparados à bibliografia utilizada e a um trocador de calor a placas, mostrando ser esse mais compacto, embora mais frágil e com maior perda de pressão.

**Palavras-chave:** Condensador cascata. Casco e tubo. R-744. R-404A.

## ABSTRACT

In a simple cascade subcritical refrigeration system, working with CO<sub>2</sub> as a refrigerant fluid in the low-pressure side with direct expansion, it's necessary a heat exchanger to do the condensation. This condenser, of shell and tube type with a dual pass inside the tubes and a single pass in the shell side, that do the condensation and subcooling of the superheated R-744 (CO<sub>2</sub>) that flows inside the tubes using the energy ceded to the refrigeration fluid R-404A, this one, evaporating in the shell side. This work had, as an objective, determinate de equipment's global heat transfer coefficient, through an ideal constructive way based in the TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*) norm, for the R-404A to do the physical state change of carbon dioxide through the heat transfer. To reach the goal set, it was used the methodology in the pertinent bibliographic and grounded research, through specified calculations. The study presentation is made by the mathematic development, using Palen correlations for the shell side and inside tubes, the correlations described by Gnielinski and Iqbal and Bansal (2011). The resulting equipment had an overall heat transfer coefficient of 431 W/m<sup>2</sup>.K, with a surface heat exchange of 5.49 m<sup>2</sup>, sufficient to realize the heat exchange of 28.25 kW. The results are compared to the used bibliography and the plate heat exchanger, this one showing to be more compact, although more fragile and with a higher pressure drop.

**Keywords:** Cascade condenser. Shell and tube. R-404A. R-744.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema com ciclo cascata.....	15
Figura 2 – Ciclo real X ciclo ideal de compressão à vapor (pressão x entalpia) .....	18
Figura 3 – Diagrama P x h de um sistema cascata de refrigeração .....	21
Figura 4 – Padrão de configuração de tubos .....	22
Figura 5 – Tipos de cascos e cabeçotes de trocadores casco e tubo .....	23
Figura 6 – Nomenclatura de um casco e tubo.....	24
Figura 7 – Padrões de escoamento evaporativo em banco de tubos .....	31
Figura 8 – Padrões de condensação para velocidades: (a) altas; e (b) baixas .....	34
Figura 9 – Fluxograma do pré-projeto do trocador de calor.....	39
Figura 10 – Fluxograma do projeto detalhado do trocador de calor. ....	40
Figura 11 – Trocador de calor “AKU” .....	41
Figura 12 – Coeficiente convectivo interno (R-744) .....	45
Figura 13 – Coeficiente global de transferência de calor.....	48
Figura 14 – Quebra jato .....	50
Figura 15 – Geometria triangular rotacionada .....	51
Figura 16 – Geometria das chicanas .....	52
Figura 17 – Perda de pressão para 49,37 kg/m <sup>2</sup> ·s e pressão de 3,05 MPa.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de entrada para projeto termo hidráulico.....	42
Tabela 2 – Cálculo dos parâmetros térmicos para o dessuperaquecimento .....	43
Tabela 3 – Cálculo do coeficiente conectivo inteiro.....	44
Tabela 4 – Cálculo dos parâmetros térmicos para o subresfriamento.....	44
Tabela 5 – Cálculo do coeficiente convectivo interno local .....	45
Tabela 6 – Cálculo do coeficiente convectivo ideal e fluxo térmico .....	46
Tabela 7 – Cálculo do coeficiente convectivo externo.....	46
Tabela 8 - Coeficiente global local de transferência de calor .....	47
Tabela 9 – Características térmicas do trocador de calor .....	47
Tabela 10 – Geometria do trocador de calor .....	48
Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos materiais .....	49
Tabela 12 – Geometria do banco de tubos e chicanas .....	51
Tabela 13 – Perda de pressão no lado dos tubos .....	53
Tabela 14 – Comparativo entre os resultados dos trocadores de calor .....	54

## **LISTA DE SIGLAS**

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AEL	<i>Allowable Exposure Limit</i>
BWG	<i>Birmingham Wire Gauge</i>
COP	<i>Coefficient of performance (Coeficiente de desempenho)</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
HTC	<i>Heat transfer coefficient</i>
ODP	<i>Ozone Depletion Potential</i>
TEMA	<i>Tubular Exchanger Manufactures Association</i>
HFC	Hidrofluorcarboneto

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA DO ESTUDO .....	16
1.3	AMBIENTE DE TRABALHO.....	16
1.4	OBJETIVOS.....	17
<b>1.4.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1	CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR.....	18
2.2	FLUIDO REFRIGERANTE .....	19
<b>2.2.1</b>	<b>Refrigerante R-744 .....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Refrigerante R-404A.....</b>	<b>20</b>
2.3	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA .....	21
2.4	TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS.....	22
<b>2.4.1</b>	<b>Banco de tubos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Casco e cabeçotes.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Chicanas.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Espelhos.....</b>	<b>25</b>
2.5	FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	25
<b>2.5.1</b>	<b>Condução .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Convecção.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Radiação.....</b>	<b>26</b>
2.6	PROJETO TERMOHIDRÁULICO DO TROCADOR DE CALOR .....	27
<b>2.6.1</b>	<b>Pré-projeto do trocador de calor.....</b>	<b>27</b>
2.6.1.1	Ebulição saturada em banco de tubos .....	30
2.6.1.2	Dessuperaquecimento e subresfriamento no interior dos tubos .....	32
2.6.1.3	Condensação no interior dos tubos.....	33
<b>2.6.2</b>	<b>Projeto detalhado do trocador de calor casco e tubos .....</b>	<b>35</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Perda de pressão no lado dos tubos.....</b>	<b>35</b>
2.7	TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA .....	37
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE TRABALHO .....</b>	<b>38</b>
3.1	SITUAÇÃO ATUAL .....	38
3.2	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO .....	39

<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>42</b>
4.1	PRÉ PROJETO DO TROCADOR DE CALOR .....	42
4.1.1	Cálculo do fator de correção $F$ .....	42
4.1.2	Cálculo do $\Delta TML$ .....	43
4.1.3	Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U) .....	43
4.1.4	Geometria aproximada do casco .....	48
4.2	PROJETO MECÂNICO DO TROCADOR DE CALOR .....	49
4.2.1	Casco e cabeçotes.....	49
4.2.2	Banco de tubos .....	50
4.2.3	Chicanas.....	51
4.2.4	Espelhos.....	52
4.2.5	Determinação da perda de pressão do lado dos tubos.....	52
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>
	<b>ANEXO A – TEMA TABELA RCB-2.21.....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXO B – TEMA TABELA RGP-T-2.4 .....</b>	<b>61</b>
	<b>ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS TEMA .....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXO D – ESPELHOS .....</b>	<b>63</b>
	<b>ANEXO E – DATASHEET DE TROCADOR A PLACAS .....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXO F – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE DESSUPERAQUECIMENTO.....</b>	<b>65</b>
	<b>ANEXO G – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 1) .....</b>	<b>66</b>
	<b>ANEXO H – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 2) .....</b>	<b>67</b>
	<b>ANEXO I – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE SUBRESFRIAMENTO .....</b>	<b>68</b>

<b>ANEXO J – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 1) .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO K – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 2) .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXO L – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 3) .....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXO M – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 1) ...</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO N – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 2) ...</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO O – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 3) ...</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO P – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE DESSUPERAQUECIMENTO.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO Q – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 1) .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO R – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 2) .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO S – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE SUBRESFRIAMENTO.....</b>	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No sistema de refrigeração, após o fluido refrigerante deixar a descarga do compressor no estado de vapor superaquecido, torna-se necessária a condensação deste para o funcionamento do ciclo. O condensador é o equipamento empregado para essa tarefa, ele tem a função de rejeitar o calor proveniente do superaquecimento do fluido refrigerante na descarga do compressor, condensando-o (STOECKER e JABARDO, 2002). Assim, o fluido é conduzido até a válvula de expansão no estado líquido saturado ou subresfriado.

O fenômeno da condensação, neste caso, ocorre através da transferência de calor entre dois fluidos em diferentes temperaturas e separados por uma parede. O fluido de maior temperatura é resfriado sem mudar seu estado físico até se tornar vapor saturado (INCROPERA e DEWITT, 2007). A partir desse ponto as moléculas que já vem perdendo energia desde o estado superaquecido, reduzem sua agitação e são atraídas por outras, dando forma ao estado líquido (SILVA, 2009). Ao final dessa transformação, quando não há mais vapor presente na mistura, o refrigerante começa a entrar na fase de líquido subresfriado, onde na mesma pressão de condensação, sua temperatura começa a diminuir (INCROPERA e DEWITT, 2007).

Esse efeito ocorre no interior dos tubos do trocador de calor casco e tubo, através da energia trocada com o R-404A. Esse, por sua vez, também experimenta a mudança de estado físico, sendo evaporado pelo calor recebido do dióxido de carbono. O condensador cascata pode ser observado na figura 1, interligando os dois sistemas, ou seja, o sistema com o R-404A e aquele com R-744.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

O dióxido de carbono é um gás estufa, embora presente e essencial na atmosfera, onde apresenta uma concentração de 379 ppm (SCHIRMER e LISBOA, 2008). O CO<sub>2</sub> é usado como referência para medir o aquecimento global, tendo um valor de GWP (*Global Warming Potential* – Potencial de Aquecimento Global) igual a 1 (SILVA, 2009), valor baixo em comparação com o R-404A, que é um HFC (Hidrofluorcarboneto). E possui um valor de ODP (*Ozone Depletion Potential* – Potencial de Destruição da Camada de Ozônio) igual a zero, embora o seu GWP seja de 3943 (MOTA-BABILONI et. al, 2015).

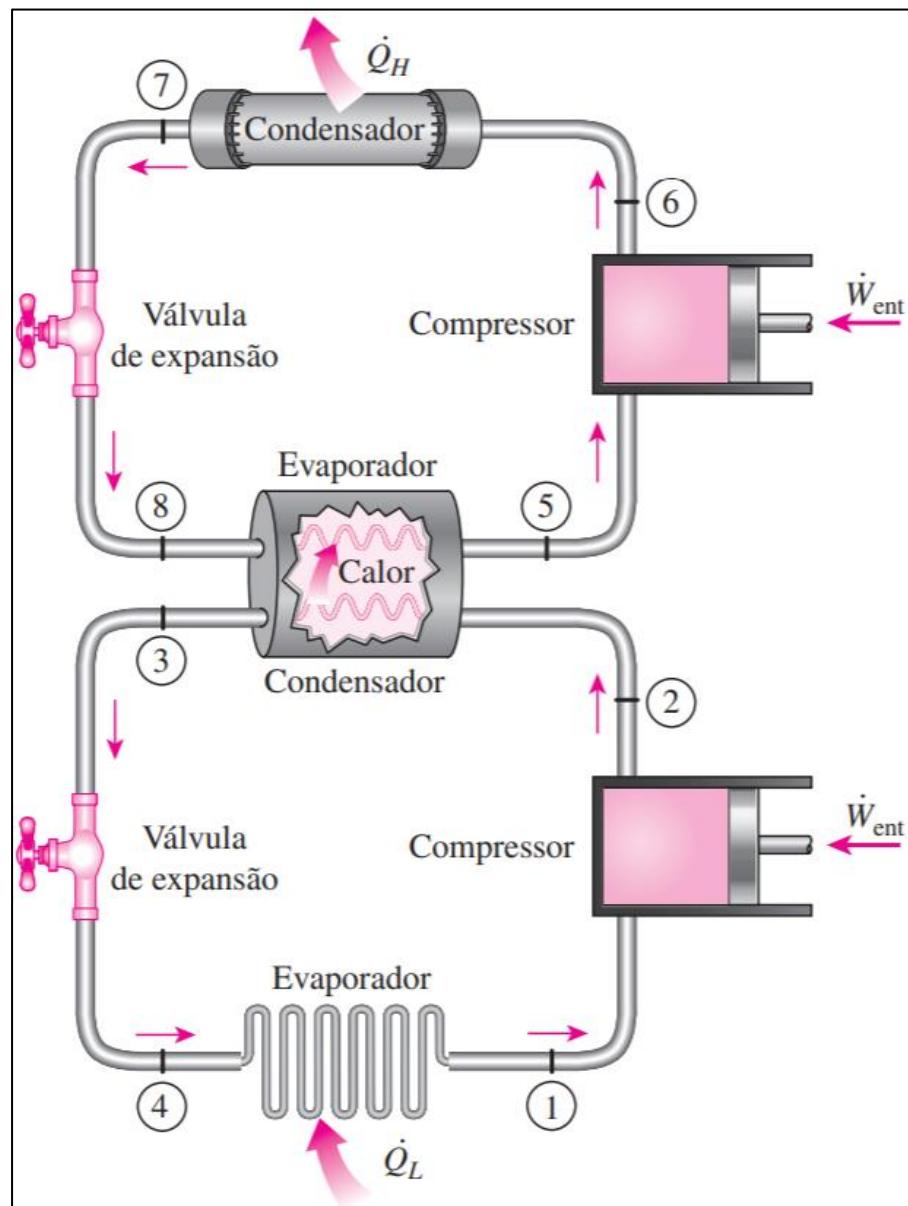
Em um sistema de refrigeração utilizando o CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante no lado de baixa e R-404A no de alta em sistema cascata simples com expansão direta, o dióxido de carbono superaquecido precisa ser condensado à pressão de saturação à custa da energia

perdida para o R-404A. Após passar por um dispositivo de expansão, o refrigerante R-404A adentra ao evaporador como mistura bifásica de líquido e vapor.

Para realizar essa função, um trocador de calor do tipo casco e tubo foi escolhido, para a condensação do CO<sub>2</sub> no lado do tubo, e a evaporação de R-404A lado do casco para que o calor recebido do ambiente favoreça a transformação.

Deseja-se conhecer o coeficiente global de transferência de calor deste equipamento para determinar suas dimensões, a capacidade e também a vazão mássica do refrigerante R-404A necessária para executar essa tarefa. A Figura 1 esquematiza o sistema de refrigeração em cascata.

Figura 1 – Sistema com ciclo cascata



Fonte: Çengel e Boles (2013).

## 1.2 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

Conforme Silva (2009) “A legislação restringe o uso dos refrigerantes sintéticos no mundo inteiro e, consequentemente, ressurge a necessidade de utilizar os refrigerantes alternativos e naturais”. Fluidos com elevado ODP e GWP estão tendo sua utilização extinta, devolvendo espaço ao dióxido de carbono.

Apesar da contribuição para o efeito estufa (na maior parte pelo R-404A), os dois refrigerantes citados possuem baixa ou nula contribuição para a destruição da camada de ozônio (STOECKER e JABARDO, 2002).

O Brasil, assim como vários outros países é signatário do Protocolo de Montreal e possui uma data limite para eliminar as substâncias destruidoras da camada de Ozônio (SILVA, 2009), justificando a tendência de mercado e necessidade do desenvolvimento de estudos envolvendo o CO<sub>2</sub>.

O trocador de calor casco e tubos é mais indicado em comparação ao trocador a placas para altas pressões. Trocadores de calor a placas possuem limitação na sua pressão de trabalho devido às superfícies planas e gaxetas, sendo pressão máxima de projeto em torno de 3 MPa, embora geralmente opera abaixo de 1 MPa (SHAH e SEKULIC, 2003).

Existem muitas configurações de trocadores de calor cascata. Aplicações industriais comumente utilizam trocadores de calor a placas, casco e tubo, e casco e placas para esse fim (ASHRAE, 2018). Para este trabalho, foi utilizado o trocador do tipo casco e tubos, devido ao conhecimento do processo produtivo deste equipamento por parte da empresa, além da disponibilidade de maquinário para futura execução deste projeto.

## 1.3 AMBIENTE DE TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso foi realizado na empresa Tecnofrio Equipamentos Frigoríficos Ltda. Essa empresa atua na área da refrigeração industrial e comercial há mais de 25 anos, oferecendo soluções completas para a conservação de alimentos. Fabricante de equipamentos frigoríficos para resfriamento, congelamento e acondicionamento de produtos, atende a um mercado variado, que contempla frigoríficos de bovinos, suínos, aves e peixes, laticínios, frutas, legumes, hortaliças e sementes, logística entre outras.

O trabalho foi realizado junto ao setor de engenharia do produto da empresa, esta que conta com 97 funcionários no campo produtivo, situado em Caxias do Sul. Além da mão de obra terceirizada que atua na montagem externa.

O estudo foi conduzido em paralelo ao dia-a-dia da empresa, buscando conhecer a capacidade desse equipamento e seu dimensional para posterior fabricação de uma unidade de refrigeração que inicialmente, foi utilizada para testes.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um condensador tipo casco e tubos para operação em um sistema de refrigeração em cascata com dióxido de carbono condensando (lado dos tubos) e R-404A evaporando (lado da carcaça).

### 1.4.2 Objetivos Específicos

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram buscados:

- a) definir a forma construtiva do trocador de calor adequada à aplicação, com base na norma TEMA;
- b) levantar as correlações usadas nos processos de condensação e de evaporação/ebulição;
- c) quantificar os parâmetros de operação do CO<sub>2</sub> e do R-404A para o condensador em estudo;
- d) quantificar os coeficientes convectivos interno e externo para a determinação do coeficiente global de transferência de calor;
- e) comparar tecnicamente os resultados com outros tipos de trocadores de calor.

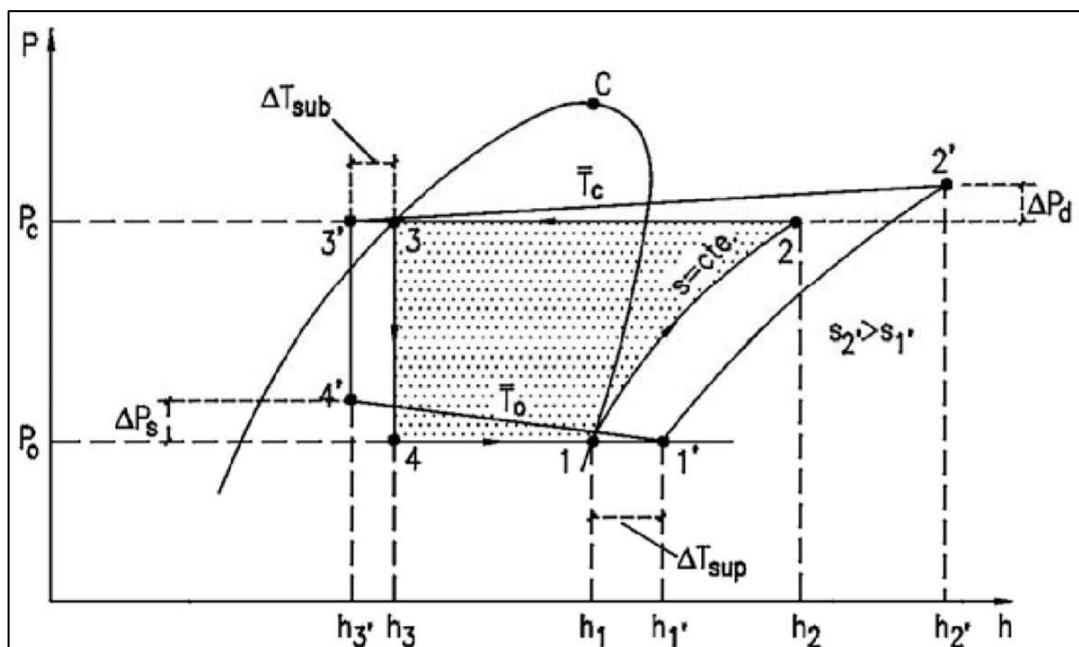
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação teórica deste trabalho é oriunda das ciências térmicas, onde são abordados conteúdos de termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor.

### 2.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

O ciclo de refrigeração por compressão a vapor ocorre em 4 etapas, sendo elas a compressão, condensação, expansão e evaporação e quando idealizado, pode ser observado na Figura 2 (DOSSAT, 2004) pelos pontos 1-2, 2-3, 3-4 e 4-1 respectivamente.

Figura 2 – Ciclo real X ciclo ideal de compressão à vapor (pressão x entalpia)



Fonte: Venturini e Pirani (2005).

O ciclo ideal de refrigeração por compressão a vapor pode ter seus valores quantificados aplicando a primeira lei da termodinâmica para um volume de controle em torno de cada equipamento do sistema (Equação 1).

$$\Delta U = Q - W \quad (1)$$

Onde:

$\Delta U$  é a variação da energia interna do sistema [J];

$Q$  é o calor trocado com o meio [J];

$W$  é o trabalho realizado para a transformação [J].

O ciclo ocorre quando o compressor adiabático aspira o vapor saturado proveniente do evaporador, e o descarrega no estado superaquecido à pressão de saturação (Processo 1-2), o fluido então condensa com pressão constante até atingir o estado de líquido saturado no processo 2-3 (BORGNAKKE e SONNTAG, 2013). Esses dois processos compõem o estágio de alta pressão do sistema. O processo 3-4 se dá pela passagem do fluido através de um dispositivo de expansão isoentálpico, que reduzirá a pressão e temperatura do refrigerante. A mistura de líquido e vapor adentram ao evaporador, que fará a evaporação isobárica no processo 4-1, de todo o líquido presente na mistura, sendo esse vapor succionado pelo compressor (BORGNAKKE e SONNTAG, 2013). Os processos 3-4 e 4-1 compõem o estágio de baixa pressão, e completam o ciclo ideal.

Ainda na Figura 2, pode-se observar o ciclo real, representado pelos pontos 1', 2', 3' e 4', que divergem do ideal por fatores como: a transferência de calor em componentes que não são trocadores de calor, perda de pressão pelo atrito do fluido refrigerante com os tubos condutores, além de outras irreversibilidades em processos como compressão e expansão do fluído refrigerante (STOECKER e JONES, 1985).

## 2.2 FLUIDO REFRIGERANTE

Com relação ao ciclo de compressão do vapor, o refrigerante é o fluido de trabalho que alternadamente vaporiza e condensa quando absorve e cede calor, respectivamente (DOSSAT, 2004).

Deve ser reconhecido por princípio, que não existe refrigerante “ideal” e que, por causa das grandes diferenças nas condições e requisitos das várias aplicações, não existe nenhum refrigerante que seja universalmente adequado para todas as aplicações (DOSSAT, 2004).

Stoecker e Jabardo (2002) citam como as principais propriedades para que um fluido seja ideal: apresentar características termodinâmicas favoráveis, estabilidade química, certo grau de compatibilidade com materiais, não ser tóxico, nem inflamável, nem pernicioso ao meio ambiente, ser compatível com o óleo lubrificante do compressor e de fácil detecção, além de estar disponível comercialmente a um custo razoável.

Os refrigerantes são designados por números, de acordo com a norma ASHRAE 34-1992. O uso de números é interessante em virtude da complexidade do nome científico de alguns refrigerantes, especialmente os derivados halogenados dos hidrocarbonetos (STOECKER e JABARDO, 2002).

A norma ASHRAE 32-92 classifica os refrigerantes quanto ao seu nível de toxicidade e inflamabilidade. De acordo com essa norma, cada refrigerante recebe uma designação constituída de dois caracteres alfa numéricos, sendo o primeiro uma letra

maiúscula, que caracteriza seu nível de toxicidade, e o segundo, um algarismo que indica o grau de inflamabilidade (STOECKER e JABARDO, 2002).

### **2.2.1 Refrigerante R-744**

O dióxido de carbono é designado pela ASHRAE como R-744. Iniciando pela letra “R” de “*Refrigerant*”, o número 7 refere-se à série 700 (destinada para os compostos inorgânicos) e 44 a sua massa molecular (44,01 g/mol).

O ponto triplo do CO<sub>2</sub> ocorre à pressão absoluta de 518,5 kPa e temperatura -56,6 °C (SILVA, 2009). Nesse ponto coexistem os três estados físicos (sólido, líquido e vapor).

De acordo com Stoecker e Jabardo (2002), o ponto crítico do R-744 acontece na temperatura de 31,1 °C e pressão absoluta de 7372 kPa. A partir desse ponto, o fluido não poderá mais ser liquefeito. Quando as pressões e temperaturas de operação do sistema estão próximas dos valores do ponto triplo a expansão do vapor poderá criar CO<sub>2</sub> sólido (formação de gelo seco) no orifício ou no ponto de expansão (SILVA, 2009).

Além de ser um fluido natural, é uma substância pura, não é tóxico nem inflamável, é incolor e inodoro, está presente na atmosfera em uma concentração de 379 ppm (SCHIRMER e LISBOA, 2008), não destrói o Ozônio, mas contribui para o efeito estufa.

Esse fluido é classificado pela ASHRAE na classe de segurança A1, onde a letra “A” refere-se a compostos cuja toxicidade não foi identificada, e o número “1” por não se observar propagação de chama em ar a 18 °C e 101,325 kPa (STOECKER e JABARDO, 2002).

### **2.2.2 Refrigerante R-404A**

O R-404A é um fluido halogêneo composto pela mistura ternária de CF<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>, CF<sub>3</sub>CF<sub>2</sub>H e CF<sub>3</sub>CFH<sub>2</sub>. Iniciando pela letra “R” de “*Refrigerant*”, o número “4” refere-se à série 400, reservada para as misturas não azeotrópicas, que durante a sua mudança de estado, à pressão constante sua temperatura varia, além de mudança de composição das fases líquido e vapor, designadas em ordem crescente por cronologia de aparecimento (STOECKER e JABARDO, 2002).

O ponto crítico do R-404A ocorre à pressão absoluta de 3735 kPa e temperatura de 72,15 °C, relativo à temperatura de ebulação normal.

Esse fluido é também classificado pela ASHRAE na classe de segurança A1, possui baixa toxicidade. O AEL (*Allowable Exposure Limit* – Limite de Exposição Permitida) é de 1000 ppm durante 8 horas consecutivas (GAS SERVEI S.A., 20?). Possui um ODP de 0 e GWP de 3943 (MOTA-BABILONI et. al, 2015).

## 2.3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EM CASCATA

O sistema com ciclo cascata constitui-se de dois (ou mais) ciclos de refrigeração independentes, cada um com seu próprio refrigerante (no caso CO<sub>2</sub> e R-404A), porém com um trocador de calor comum aos dois ciclos (CLETO, 2008).

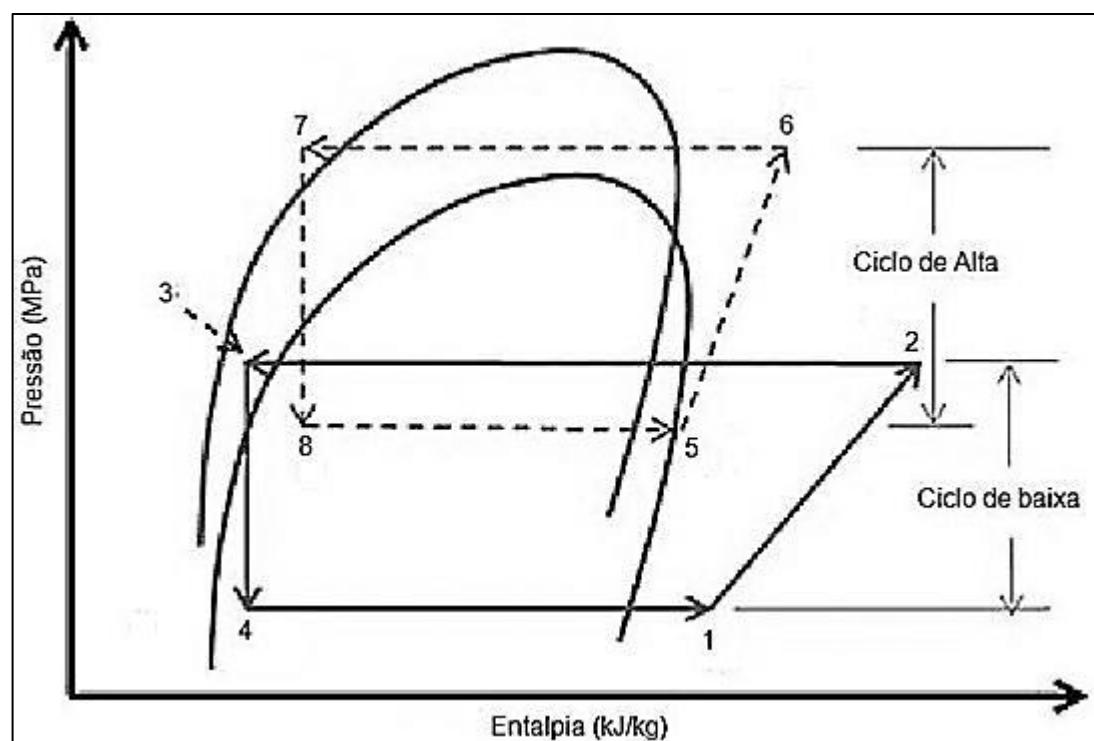
A Figura 3 mostra o diagrama pressão x entalpia de um sistema de refrigeração em cascata genérico o trocador de calor cascata, objeto de estudo deste trabalho, realiza a evaporação do R-404A no processo 8-5, e condensa o R-744 no processo 2-3.

Os sistemas cascata são utilizados quando não é possível retirar o calor do nível mais baixo de temperatura e rejeitá-lo para a atmosfera, ou quando as temperaturas de evaporação são muito baixas, e a eficiência de fluidos convencionais é baixa nessa condição (CLETO, 2008).

No caso do sistema cascata com CO<sub>2</sub>, as temperaturas de evaporação no lado de baixa variam de -55 °C a -30 °C, e as de condensação igual ou inferior a -5 °C, pois acima desse valor o sistema apresenta ineficiência (CLETO, 2008).

O ciclo utilizado é o subcrítico, onde o R-744 se apresenta no lado de baixa, e dessa forma suas pressões de operação são menores se comparadas ao transcrítico, que no lado de alta apresentam pressões entre 10.000 e 15.000 kPa (SILVA, 2009).

Figura 3 – Diagrama P x h de um sistema cascata de refrigeração



Fonte: Adaptado de Tarrad (2017).

## 2.4 TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS

O tipo mais comum de trocador de calor é o do tipo casco e tubos devido à sua larga versatilidade (SHAH, 1981). Sua forma mais simples envolve um único passe no casco e nos tubos (INCROPERA e DEWITT, 2007).

Uma grande variedade de diferentes formas construtivas internas é usada nos trocadores casco e tubos. Isso depende da troca de calor desejada, perda de pressão e métodos aplicados para reduzir os esforços térmicos, evitar vazamentos e possibilitar a limpeza, suportar pressões e temperaturas de operação, controlar corrosão, acomodar fluxos altamente assimétricos entre outros (SHAH e SEKULIC, 2003).

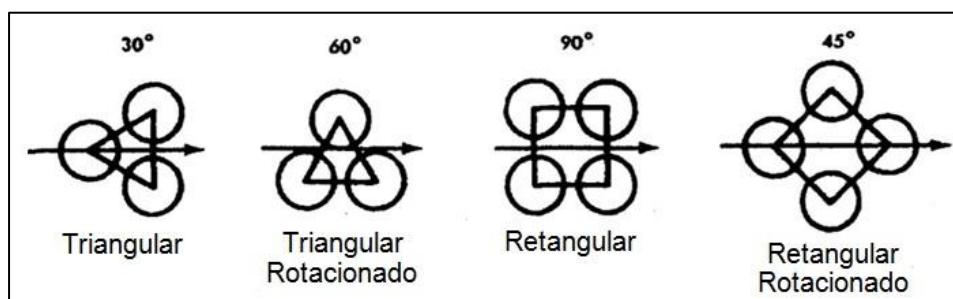
Trocadores de calor casco e tubos são classificados e fabricados seguindo a largamente utilizada norma TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturers Association*). Nesse sistema, cada trocador é designado por uma combinação de três letras, a primeira refere-se ao cabeçote frontal, a segunda ao tipo de casco e a terceira ao cabeçote posterior (SHAH e SEKULIC, 2003). As designações são ilustradas na Figura 5.

### 2.4.1 Banco de tubos

Os tubos do banco são definidos pelo diâmetro externo em medida exata, na grande maioria variando com valores entre 6,35 mm a 50,80 mm (TEMA, 2007). Menores diâmetros oferecem maior troca térmica, porém, maior dificuldade para limpeza (KAKAÇ e LIU, 2002). A espessura dos tubos é definida pela BWG (*Birmingham Wire Gage*) conforme Tabela RCB-2.21 da TEMA (2007), a qual encontra-se no anexo A.

A configuração de tubos padronizado pela norma TEMA é mostrado na Figura 4. Um padrão triangular é capaz de acomodar mais tubos no banco em relação ao quadrado, e ainda gerando maior turbulência e, por consequência, um maior coeficiente de troca térmica. O padrão triangular possui limitações de limpeza, sendo geralmente utilizado para trabalho com fluido limpo no lado do casco (KAKAÇ e LIU, 2002).

Figura 4 – Padrão de configuração de tubos

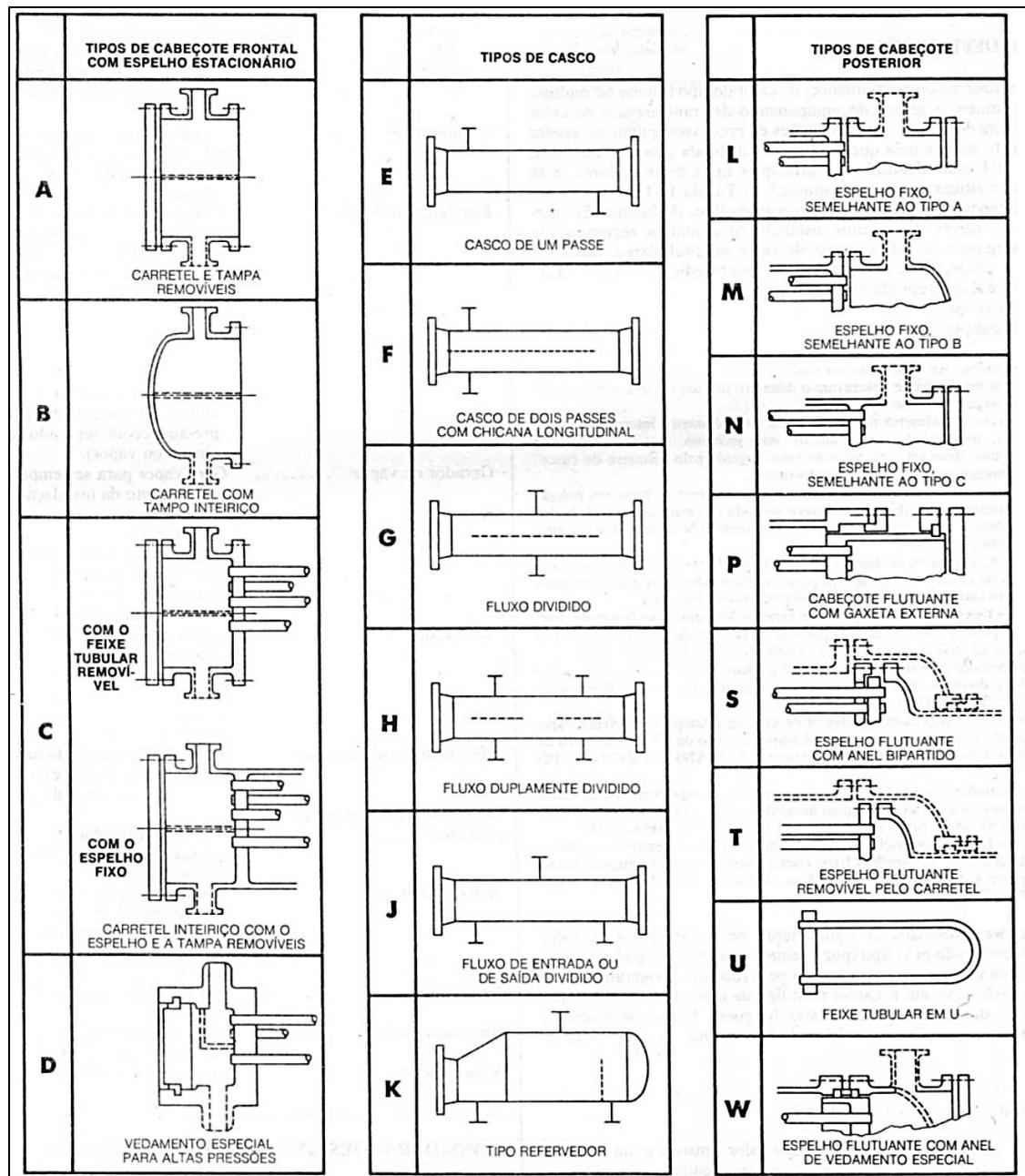


Fonte: Adaptado de TEMA (2007).

## 2.4.2 Casco e cabeçotes

Para a configuração do trocador segundo a norma TEMA, Shah e Sekulic (2003), TEMA (2007) e Kuppan (2000) sugerem o casco do tipo K para evaporação em um banco de tubos inundado, conhecido como “*Kettle Reboiler*”. O grande espaço presente acima do banco de tubos serve como separador de fases (KUPPAN, 2000). A Figura 5 ilustra as construções possíveis.

Figura 5 – Tipos de cascos e cabeçotes de trocadores casco e tubo

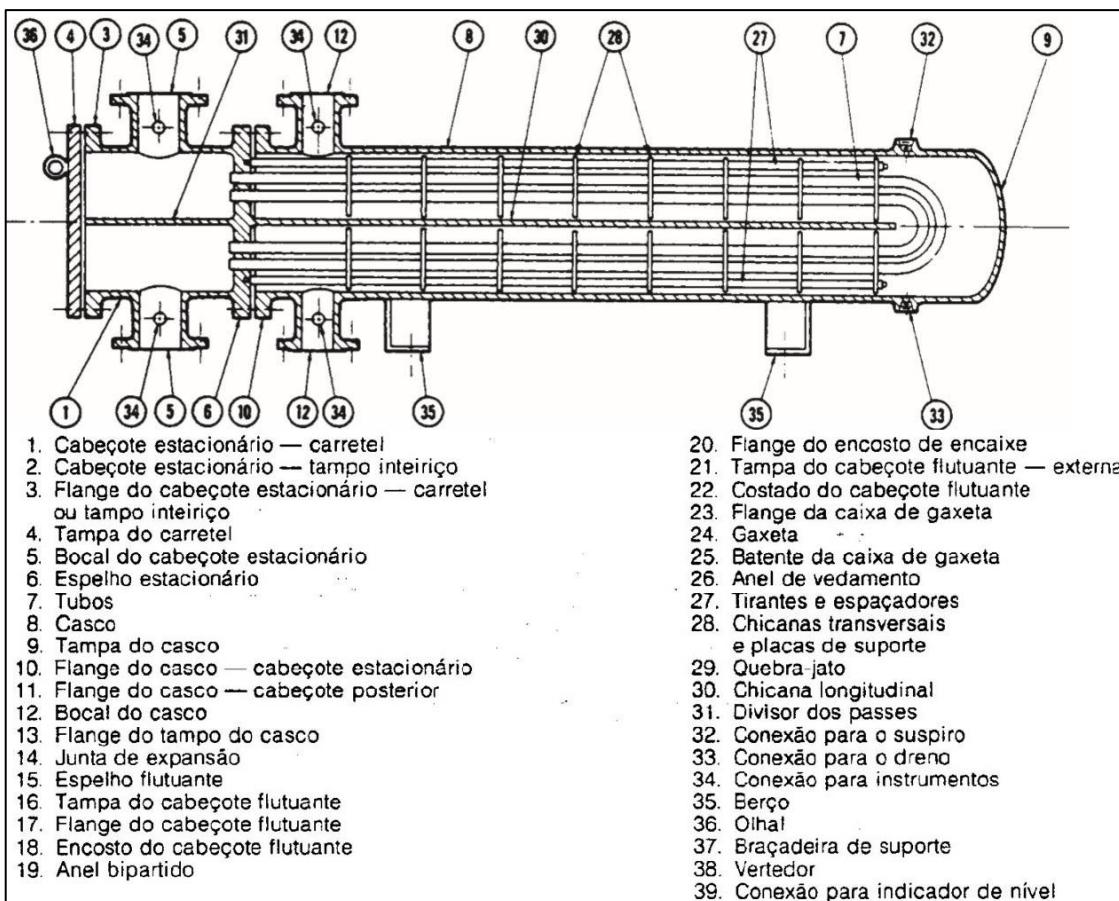


Fonte: Adaptado de TEMA (2007).

Os cabeçotes são definidos, levando em conta os critérios de projeto indicados por Shah e Sekulic (2003) no item 2.4, este tem a função de distribuir o fluxo que escoará pelo feixe de tubos, determinando o número de passes (KAKAÇ e LIU, 2002).

A Figura 6 mostra um trocador casco e tubos de configuração CFU, com a nomenclatura de cada um de seus componentes (TEMA, 2007).

Figura 6 – Nomenclatura de um casco e tubo



Fonte: Adaptado de TEMA (2007).

Existe um padrão de comprimento de tubos em TEMA standard RCB-2.1, com medidas de 2.438 mm, 3.048 mm, 3.658 mm, 4.978 mm e 6.096 mm, podendo ser usados comprimentos diferentes (TEMA, 2007).

#### 2.4.3 Chicanas

As chicanas têm duas funções básicas. A primeira é promover a rigidez ao banco de tubos, prevenindo a vibração e a deflexão/empeno dos tubos. A segunda é desviar o fluxo do fluido no lado do casco para aumentar o coeficiente convectivo. As chicanas podem ser classificadas como transversais e longitudinais (KAKAÇ e LIU, 2002).

#### 2.4.4 Espelhos

É a principal barreira entre os fluidos que passam pelo lado do casco e pelo lado dos tubos, importante para a segurança e confiabilidade do trocador (KUPPAN, 2000).

Ainda, segundo o mesmo autor, o espelho pode ser conectado ao casco por solda, parafuso, ou uma combinação dos dois. A forma como o espelho é fixado ao vaso determina se o trocador é de feixe fixo ou móvel.

### 2.5 FUNDAMENTOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor ocorre entre um meio ou entre meios que possuam diferentes temperaturas. Esse fluxo de energia pode ocorrer de três formas: condução, convecção e radiação (INCROPERA e DEWITT, 2007).

#### 2.5.1 Condução

A condução ocorre em um meio estacionário, onde o calor é conduzido e transferido entre moléculas do meio de maior temperatura para o de menor temperatura. A Equação 2, conhecida como Lei de Fourier descreve o fluxo térmico em estado estacionário (INCROPERA e DEWITT, 2007).

$$\dot{q}_x'' = k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

Onde:

$\dot{q}_x''$  é o fluxo térmico [ $\text{W/m}^2$ ];

$T_1$  é a temperatura inicial [K];

$T_2$  é a temperatura final [K];

$k$  é a condutividade térmica do meio [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ];

$L$  é o comprimento [m].

#### 2.5.2 Convecção

Ocorre pelo contato entre um fluido em movimento e uma superfície, ambos em diferentes temperaturas. A transferência de calor por convecção pode ser classificada como natural ou forçada, de acordo com a natureza do escoamento.

Na convecção forçada pura, o fluido se movimenta pela energia recebida de forças externas como ventiladores e bombas. A convecção natural pura é induzida por forças de empuxo, originadas da diferença de densidade causada pela variação de temperatura do fluido (INCROPERA e DEWITT, 2007).

Combinações entre a convecção natural e forçada podem existir, como é o caso da ebulação e da condensação. As bolhas formadas pela ebulação de um fluido ao fundo de um vaso induzem a uma velocidade maior do escoamento, esse fenômeno é conhecido como ebulação.

Independente da sua natureza, a convecção pode ser descrita pela Lei do Resfriamento de Newton, pela Equação 3 (INCROPERA e DEWITT, 2007).

$$q'' = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3)$$

Onde:

$q''$  é o fluxo térmico [W/m<sup>2</sup>];

$T_s$  é a temperatura da superfície [K];

$T_\infty$  é a temperatura do fluido [K];

$h$  é o coeficiente convectivo [W/m<sup>2</sup>.K].

### 2.5.3 Radiação

É a energia emitida pela matéria e não necessita de um meio material para se propagar, sendo inclusive mais eficiente a transferência de calor no vácuo (INCROPERA e DEWITT, 2007).

O poder emissivo de um corpo pode ser calculado pela Lei de Stefan-Boltzmann, Equação 4.

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (4)$$

Onde:

$E$  é o poder emissivo [W/m<sup>2</sup>];

$T_s$  é a temperatura da superfície [K];

$\varepsilon$  é a emissividade da superfície [-];

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann igual a  $5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>].

## 2.6 PROJETO TERMOHIDRÁULICO DO TROCADOR DE CALOR

Segundo Kuppan (2000), o procedimento geral de projeto de um trocador casco e tubos é complexo e iterativo, sendo as vezes necessário subdividir o procedimento conforme abaixo:

- a) pré-projeto do trocador de calor;
- b) avaliar parâmetros geométricos, também conhecido como cálculos auxiliares;
- c) corrigir fatores de transferência de calor e perda de pressão;
- d) estimar o coeficiente de troca térmica e perda de pressão do lado do casco;
- e) estimar o coeficiente de troca térmica e perda de pressão do lado dos tubos;
- f) avaliar o projeto e compor os resultados com as especificações de projeto.

### 2.6.1 Pré-projeto do trocador de calor

O dimensionamento aproximado dos trocadores de calor casco e tubos pelo método de Bell (1983), se dá através do seguinte procedimento:

- a) estimar a carga térmica do equipamento pela 1ª Lei da Termodinâmica em regime permanente aplicada a volumes de controle nos lados dos fluidos quente e frio, desprezando a geração de trabalho e os efeitos de variação de energia cinética e potencial de elevação, através da Equação 5.

$$\dot{Q} = \dot{m}_h \cdot \Delta h_h = \dot{m}_c \cdot \Delta h_c \quad (5)$$

Onde:

$\dot{Q}$  é a capacidade térmica ou carga térmica do trocador de calor [W];

$\Delta h_h$  é a diferença de entalpia entre a entrada e saída do fluido quente [J/kg];

$\Delta h_c$  é a diferença de entalpia entre a entrada e saída do fluido frio [J/kg];

$\dot{m}_h$  é o fluxo mássico do fluido quente [kg/s];

$\dot{m}_c$  é o fluxo mássico do fluido frio [kg/s];

- b) estimar a diferença de temperatura média logarítmica ( $\Delta T_{ML}$ ) e temperatura média do meio (MTD) através das Equações 6a e 6b, para as correntes dos dois fluidos em contrafluxo.

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_{h,e} - T_{c,s}) - (T_{h,s} - T_{c,e})}{\ln[(T_{h,e} - T_{c,s})/(T_{h,s} - T_{c,e})]} \quad (6a)$$

$$MTD = \frac{T_{evap} + T_{cond}}{2} \quad (6b)$$

Onde:

$T_{h,e}$  é a temperatura de entrada do fluido quente [K];

$T_{h,s}$  é a temperatura de saída do fluido quente [K];

$T_{c,e}$  é a temperatura de entrada do fluido frio [K];

$T_{c,s}$  é a temperatura de saída do fluido frio [K];

$T_{evap}$  é a temperatura de evaporação do fluido quente [K];

$T_{cond}$  é a temperatura de condensação do fluido frio [K].

- c) corrigir o  $\Delta T_{ML}$  com o fator de correção  $F$ : sempre que existirem sentidos diferentes do paralelo e do contrafluxo. A ebulação em um banco de tubos disposto na horizontal desloca as bolhas no sentido ascendente. Esse deslocamento e mudança de densidade no fluido que evapora no lado do casco promove o fluxo cruzado em relação aos tubos. Não é necessário corrigir o  $\Delta T_{ML}$  quando o fluido no lado do casco possui temperatura constante (KAKAÇ, 1991).
- d) determinar o número de cascos em série que deverão ser utilizados. Caso ocorra a aproximação dos valores nos dois lados das Desigualdades 7 e 8, é necessário o uso de múltiplos cascos em série.

Para fluido quente do lado do casto:  $2 \cdot T_{h,s} \geq T_{c,e} + T_{c,s}$  (7)

Para fluido frio do lado do casco:  $2 \cdot T_{c,s} \geq T_{h,e} + T_{h,s}$  (8)

- e) estimar o coeficiente global de transferência de calor através da Equação 9 (para tubos lisos).

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_s} + R_{f,s} + \frac{t_w}{k_w} \frac{A_i}{A_m} + R_{f,t} + \frac{1}{h_t} \cdot \frac{A_e}{A_i}\right)} \quad (9)$$

Onde:

$U$  é o coeficiente global de transferência de calor [W/m<sup>2</sup>·K];

$h_s$  é o coeficiente convectivo do lado do casco [W/m<sup>2</sup>·K];

$h_t$  é o coeficiente convectivo do lado dos tubos [W/m<sup>2</sup>.K];

$R_{f,s}$  é a resistência térmica devido à incrustação no lado do casco [m<sup>2</sup>.K/W];

$R_{f,t}$  é a resistência térmica devido à incrustação no lado dos tubos [m<sup>2</sup>.K/W];

$t_w$  é a espessura da parede do tubo [m];

$k_w$  é a condutividade térmica do tubo [W/m.K];

$A_i = A_e \cdot r_i/r_e$  é a área da superfície interna dos tubos [m<sup>2</sup>];

$A_e = A_m \cdot r_e/(r_e + r_i)$  é a área da superfície externa dos tubos [m<sup>2</sup>];

$A_m = \pi \cdot L_t \cdot (r_e - r_i)$  é a área da média efetiva de troca térmica [m<sup>2</sup>].

$L_t$  é o comprimento dos tubos [m];

$r_e$  é o raio externo dos tubos [m];

$r_i$  é o raio interno dos tubos [m].

f) Determinar o fator de incrustação, conforme Tabela RGP-T-2.4 (Anexo B).

g) Calcular a área externa de troca térmica: Conhecidos os valores de  $\dot{Q}$ ,  $U$ ,  $\Delta T_{ML}$  e  $F$ , sendo  $A_e$  calculado pela Equação 10.

$$A_e = \frac{\dot{Q}}{U \cdot F \cdot \Delta T_{ML}} \quad (10)$$

h) Determinar o tamanho do casco e comprimento dos tubos através da área de transferência de calor  $A_e$ . Nesse ponto, a configuração e comprimento de tubos, e tamanho do casco deve ser definido dentro dos parâmetros de projeto, simplificando os cálculos. Na falta desses valores limite, a configuração pode ser feita pelas Equações 11, 12 e 13.

$$A_e = \pi \cdot d_e \cdot L_t \cdot N_t \quad (11)$$

$$N_t = \frac{0,78 \cdot D_i^2}{C_l \cdot L_{tp}^2} \quad (12)$$

Substituindo os valores da Equação 12 na Equação 11:

$$A_e = (0,78 \cdot \pi) \frac{d_e}{C_l \cdot L_{tp}^2} [L_t \cdot D_i^2] \quad (13)$$

Onde:

$d_e$  é o diâmetro externo dos tubos do banco [m];

$N_t$  é o número de tubos [-];

$D_i$  é o diâmetro interno do casco [m];

$C_l$  é uma constante que depende da configuração dos tubos;

$$C_l = 0,86 \text{ para } \theta_{tp} = 30^\circ \text{ e } 1,00 \text{ para } \theta_{tp} = 45^\circ \text{ e } 90^\circ$$

$L_{tp}$  é a medida do passe dos tubos [m];

$\theta_{tp}$  é o ângulo característico do arranjo de tubos [°].

#### 2.6.1.1 Ebulação saturada em banco de tubos

Segundo Collier e Thome (1994), na ebulação em um banco de tubos pode-se observar diversos padrões de escoamento (Figura 7), sendo predominante a transferência de calor devido à nucleação em casos onde não há escoamento forçado do fluido.

As bolhas formadas pela ebulação em torno dos tubos de troca térmica se desprendem da parede deste, e devido à sua menor densidade, migram para a superfície absorvendo as bolhas das fileiras superiores, aumentando a turbulência do escoamento e por consequência o coeficiente convectivo externo. A temperatura da parede do tubo tende a reduzir à medida que maior calor é retirado deste, caso das fileiras superiores (COLLIER e THOME, 1994).

O coeficiente convectivo de evaporação do lado do casco, pode ser calculado pelas correlações desenvolvidas por Palen, onde o coeficiente convectivo no banco de tubos é encontrado pela superposição dos efeitos de ebulação e convecção natural (COLLIER e THOME, 1994).

$$h_s = h_{NCB} \cdot F_b \cdot F_c + h_{nc} \quad (14)$$

Onde:

$h_s$  é o coeficiente convectivo médio do banco de tubos [W/m<sup>2</sup>.K];

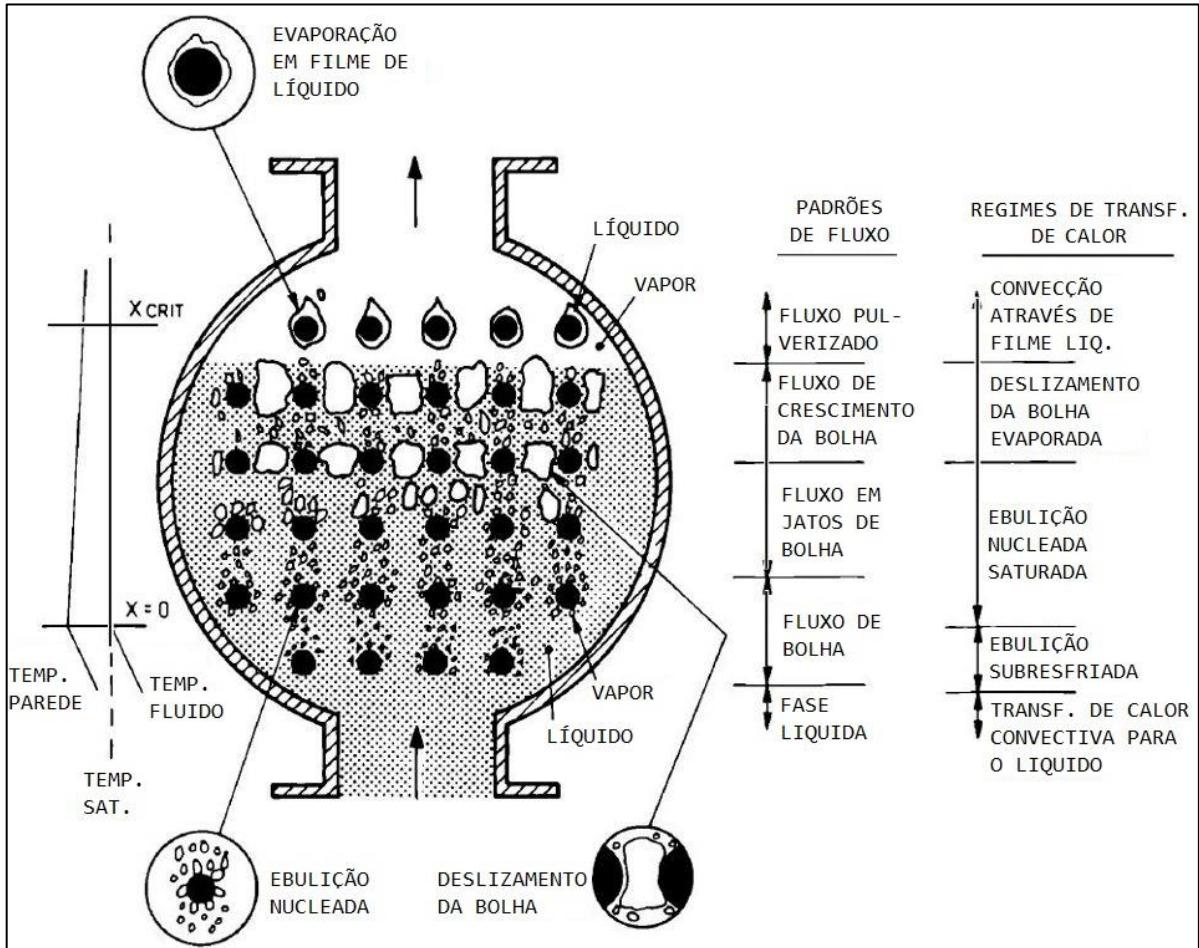
$h_{NCB}$  é o coeficiente de ebulação por nucleação em vasos [W/m<sup>2</sup>.K];

$F_b = h_s/h_{NCB}$  é o fator de ebulação no banco de tubos [-];

$F_c$  é o fator de correção para ebulação para fluidos não puros [-];

$h_{nc}$  é o coeficiente de convecção natural do fluido no banco de tubos [W/m<sup>2</sup>.K].

Figura 7 – Padrões de escoamento evaporativo em banco de tubos



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

Segundo Bejan e Kraus (2003), pode-se assumir  $F_b = 1,5$  como um valor conservativo. Ainda segundo os mesmos autores, juntamente com Collier e Thome (1994)  $F_c$  deve ser calculado para misturas não azeotrópicas, conforme a Equação 15 desenvolvida por Thome (1989).

$$F_c = \left\{ 1 + \left( \frac{h_{id}}{\phi} \cdot \Delta T_{bp} \right) \cdot \left[ 1 - \exp \left( \frac{-\phi}{\rho_l \cdot h_{lv} \cdot \beta_l} \right) \right] \right\}^{-1} \quad (15)$$

O coeficiente convectivo ideal ( $h_{id}$ ) é encontrado quando  $\Delta T_{bp} = 0$  e  $F_c = 1$ , resultando na correlação de Cooper, segundo a Equação 16,  $h_{id} = h_{NcB}$ .

$$h_{NcB} = 55 \cdot P_r^{0,12} \cdot (-0,4343 \cdot \ln P_r)^{-0,55} \cdot M^{-0,5} \cdot \phi^{0,67} \quad (16)$$

Onde:

$h_{NCB}$  é o coeficiente de ebulação por nucleação em vasos [W/m<sup>2</sup>·K];

$\Delta T_{bp}$  é a temperatura de deslizamento do fluido [K];

$h_{lv}$  é o peso calor latente de mudança de fase [J/kg];

$\beta_l$  é o coeficiente de transferência de massa, fixado em 0,0003 [m/s];

$\phi$  é o fluxo de calor [W/m<sup>2</sup>];

$P_r$  é a pressão reduzida ( $P_r = p/p_{CRIT}$ );

$M$  é o peso molecular [kg/kmol].

O coeficiente de convecção natural  $h_{nc}$  pode assumir o valor de 250 W/m<sup>2</sup>·K (COLLIER e THOME, 1994).

#### 2.6.1.2 Dessuperaquecimento e subresfriamento no interior dos tubos

Kondou e Hrnjak (2010 e 2012) e Cavallini et al. (2006) conduziram diversos estudos sobre o dessuperaquecimento, condensação e subresfriamento do CO<sub>2</sub>, comparando as correlações existentes com dados práticos. Como resultado, a equação que melhor descreve o dessuperaquecimento e subresfriamento do dióxido de carbono é a correlação de Gnielinski, citada por Kondou e Hrnjak (2010 e 2012).

$$Nu_0 = \frac{\left[ \left( \frac{f_b}{8} \right) \cdot \left( \frac{G_r \cdot d_i}{\mu_b} - 1000 \right) \cdot Pr_b \right]}{\left[ 1 + 12,7 \cdot \left( \frac{f_b}{8} \right)^{1/2} \cdot (Pr_b^{2/3} - 1) \right]} \quad (17)$$

Onde  $f_b$  é o fator de atrito de Filonenko, dado pela Equação 18.

$$f_b = \left[ 1,82 \cdot \log_{10} \left( \frac{G_r \cdot d_i}{\mu_b} \right) - 1,64 \right]^{-2} \quad (18)$$

O número de Nusselt é então encontrado Equação 19.

$$Nu_b = Nu_0 \cdot F_a \quad (19)$$

Sendo  $F_a$  o fator de correção das propriedades do fluido segundo Sieder e Tate e Petukhov.

$$F_a = \left( \frac{\mu_b}{\mu_{wi}} \right)^{0,14} \quad \text{Para a zona de subresfriamento} \quad (20)$$

$$F_a = \left( \frac{T_{wi}}{T_{rb}} \right)^{-0,36} \quad \text{Para a zona de superaquecimento} \quad (21)$$

Onde:

$Nu_0$  é o número de Nusselt para propriedades constantes [-];

$Nu_b$  é o número de Nusselt, avaliado na temperatura média do fluido [-];

$F_a$  é o fator de correção das propriedades do fluido [-];

$G_r$  é o fluxo de massa do fluido [kg/m<sup>2</sup>·s];

$d_i$  é o diâmetro interno do tubo [m];

$\mu_b$  é a viscosidade, avaliada na temperatura da média do fluido [Pa·s];

$\mu_{wi}$  é a viscosidade na parede interna do tubo [Pa·s];

$T_{wi}$  é a temperatura da parede interna do tubo [K];

$T_{rb}$  é a temperatura média local do fluido refrigerante [K].

#### 2.6.1.3 Condensação no interior dos tubos

Agarwal e Hrnjak (2014), Cavallini et al. (2006) e Kondou e Hrnjak (2012) mostraram que a condensação se inicia já no dessuperaquecimento, superdimensionando o trocador de calor nas correlações clássicas.

A condensação no interior dos tubos, é satisfatoriamente descrita pela correlação de Cavallini et al. (2006) para elevadas pressões (a partir de 6,0 MPa) e fluxos de massa (maior que 100 kg/m<sup>2</sup>·s<sup>1</sup>).

Para baixas pressões e fluxos de massa, Iqbal e Bansal (2011) conduziram testes de condensação do CO<sub>2</sub> e compararam às correlações existentes, além de desenvolver uma correlação empírica que, testes realizados, apresentou maior precisão nos resultados. Conforme a Equação 22.

$$Nu_{tp} = 0,023 \cdot Re_l^{0,8} \cdot Pr_l^{0,4} \left[ (1-x)^{6,43} + \frac{0,464 \cdot x^{0,23} \cdot (1-x)^{-1,03}}{P_{red}^{2,33}} \right] \quad (22)$$

Onde:

$x$  é o título da mistura [-];

$Nu_{tp}$  é o número de Nusselt para a zona bifásica [-];

$P_{red} = P_{sat}/P_{crit}$  é a pressão reduzida [Pa];

$P_{sat}$  é a pressão de saturação [Pa];

$P_{crit}$  é a pressão crítica do fluido [Pa];

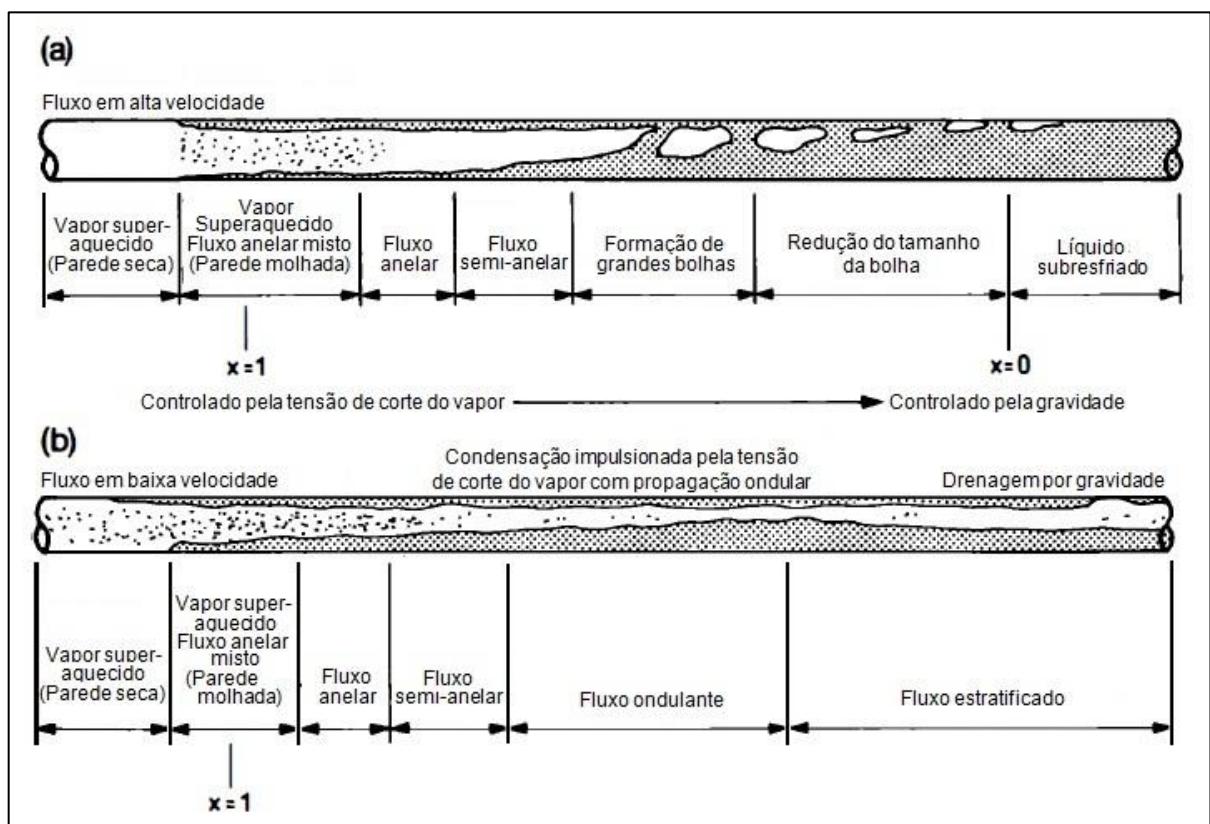
$Re_l = (G_r \cdot d_i)/\mu_l$  é o número de Reynolds para fluxo total no estado líquido [-];

$Pr_l$  é o número de Prandtl para fluxo total no estado líquido [-];

$\mu_l$  é a viscosidade dinâmica do fluido no estado líquido [Pa·s].

A Figura 8 mostra os padrões de escoamento no processo de condensação no interior de tubos, onde em situações com maior fluxo de massa a condensação ocorre mais rapidamente devido ao atrito gerado com as paredes tudo, que aumentar o coeficiente de troca térmica. Na condição com menor fluxo, a condensação demora mais para acontecer (COLLIER e THOME, 1994).

Figura 8 – Padrões de condensação para velocidades: (a) altas; e (b) baixas



Fonte: Adaptado de Collier e Thome (1994).

## 2.6.2 Projeto detalhado do trocador de calor casco e tubos

O projeto detalhado segue o método de Bell-Delaware, que consiste no procedimento de cálculo para avaliar os desvios da condição ideal da transferência de calor no lado do casco, por meio da avaliação de parâmetros geométricos: geometria das chicanas e banco de tubos e diferentes áreas de fluxo para determinar diferentes fatores de correção. (KUPPAN, 2000).

Para a situação de ebulação em vaso sem convecção forçada, essa avaliação de transferência de calor e perda de pressão pode ser desprezada (SCHLUNDER et al., 1983).

## 2.6.3 Perda de pressão no lado dos tubos

Kondou e Hrnjak (2010) conduziram experimentos também relacionados à perda de pressão durante o escoamento de R-744 no interior de tubos, mostrando que as correlações de Coulburn e Friedel apresentam valores satisfatórios. Tarawneh (2013) mostrou que as correlações de Muller-Steinghagen e Heck apresentaram melhores resultados para microtubos.

As Equações 25 e 26 de Coulburn se aplicam a perda de pressão devido a mudança de momento e ao atrito para as zonas de superaquecimento e subresfriamento, respectivamente.

Ainda segundo os autores Kondou e Hrnjak (2010), as propriedades do fluido nessas correlações são representadas na temperatura de saturação.

$$\Delta P_M = G_r^2 \cdot \left( \frac{1}{\rho_{r,inlet}} - \frac{1}{\rho_{r,outlet}} \right) \quad (25)$$

$$\frac{dP_F}{dZ} = 4 \cdot 0,046 \cdot Re_r^{-0,2} \cdot \left( \frac{G_r^2}{2 \cdot d_i \cdot \rho_r} \right) \quad (26)$$

As Equações de Friedel calculam a perda de pressão devido à mudança de momento e ao atrito para escoamento bifásico, pelas Correlações 27 e 28 respectivamente.

$$\Delta P_M = G_r^{-2} \cdot \left\{ \left[ \frac{x^2}{\xi \cdot \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\xi) \cdot \rho_l} \right]_{inlet} - \left[ \frac{x^2}{\xi \cdot \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\xi) \cdot \rho_l} \right]_{outlet} \right\} \quad (27)$$

$$\frac{dP_F}{dZ} = \Phi_{LO}^2 \cdot 4 \cdot 0,0791 \cdot Re_l^{-0,25} \cdot \left( \frac{G_r^2}{2 \cdot d_i \cdot \rho_l} \right) \quad (28)$$

$$\xi = \frac{\rho_l \cdot x}{\rho_v \cdot (1 - x) + \rho_l \cdot x} \quad (29)$$

$$\Phi_{LO}^2 = C_{F1} + \frac{3,24 \cdot C_{F2}}{Fr_h \cdot We_l} \quad (30)$$

$$Fr_h = \frac{G_r}{g \cdot d_i \cdot \rho_h} \quad (31)$$

$$We_l = \frac{G_r^2 \cdot d_i}{\sigma \cdot \rho_h} \quad (32)$$

$$\rho_h = \left( \frac{x}{\rho_v} + \frac{1-x}{\rho_l} \right)^{-1} \quad (33)$$

$$C_{F1} = (1 - x)^2 + x^2 \cdot (\rho_l / \rho_v) \cdot (\mu_v / \mu_l)^{0,25} \quad (34)$$

$$C_{F2} = x^{0,78} \cdot (1 - x)^{0,224} \cdot (\rho_l / \rho_v)^{0,91} \cdot (\mu_v / \mu_l)^{0,19} \cdot (1 - \mu_v / \mu_l)^{0,7} \quad (35)$$

Para obter a perda de pressão total, deve-se somar as duas perdas de carga, seguindo a Equação 36.

$$\Delta P_{TS} = \Delta P_M + \left( \frac{dP_F}{dZ} \right) \cdot dZ \quad (36)$$

Onde:

$\Delta P_M$  é a perda de pressão devido à mudança de momento [Pa];

$dP_F$  é a perda de pressão devido ao atrito [Pa];

$g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ];

$\rho_v$  é a densidade do fluido no estado de vapor [ $kg/m^3$ ];

$\rho_l$  é a densidade do fluido no estado líquido [ $kg/m^3$ ];

$\rho_h$  é a densidade da mistura [ $kg/m^3$ ];

$\rho_r$  é a densidade do fluido refrigerante [ $kg/m^3$ ];

$Re_r$  é o número de Reynolds do fluido refrigerante [-];  
 $\mu_v$  é a viscosidade dinâmica do fluido no estado de vapor [Pa·s];  
 $dZ$  é a parcela percorrida do comprimento do tubo [m];  
 $\Phi_{LO}^2$  é o multiplicador bifásico [-];  
 $\xi$  é a fração da seção transversal ocupada por vapor [-];  
 $C_{F1}$  e  $C_{F2}$  são parâmetros de Friedel [-];  
 $We_l$  é o número de Weber do líquido [-];  
 $Fr_h$  é o fator de fricção [-].

## 2.7 TRABALHOS REALIZADOS NA ÁREA

Ekmekci (2016) analisou a performance de um sistema de refrigeração do tipo cascata, em ciclo subcrítico, utilizando o fluido R-744 no lado de baixa pressão. O autor utilizou em seu estudo como fluidos refrigerantes o R-717 e o R-404A no lado de alta pressão. Ainda comenta que dois tipos de trocadores de calor podem ser utilizados nessa aplicação: a placas e o casco e tubos.

Nasruddin et al. (2016) estudaram a otimização de um sistema cascata utilizando o fluido refrigerante C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> no lado de alta pressão, e uma mistura de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> + CO<sub>2</sub> no lado de baixa. Os autores utilizaram trocadores de calor compactos para a função de condensador no circuito de alta pressão e evaporador no circuito de baixa pressão. O condensador cascata utilizado também foi do tipo casco e tubos. Analisando os dados, pode-se observar que o condensador cascata necessitou de uma área de troca de 127 m<sup>2</sup> para realizar a troca térmica entre o ciclo de alta pressão com 31,4 kW de potência e 17,4 kW no ciclo de baixa.

Turgut e Turgut (2018) conduziram uma investigação comparativa entre 3 circuitos em cascata utilizando R-717, R-134a e R1234yf no lado de alta em combinação com o R-744 no lado de baixa. No trabalho os autores utilizaram um condensador e um evaporador a ar, para realizar a troca térmica com os meios. Para o trocador interestágio foi utilizado o do tipo casco e tubos. Os autores observaram que o sistema operando com R-744 e R-1234yf teve a maior eficiência dos três, resultando no menor custo anual.

Gorenflo (2000) apresentou resultados teóricos para a determinação do coeficiente convectivo externo, na condição de ebulação em vaso de diversos fluidos refrigerantes. Com os resultados, foram elaborados gráficos em função da pressão. Os valores variam de 5,0 kW/m<sup>2</sup>·K a 12,0 kW/m<sup>2</sup>·K dependendo da condição.

Kondou e Hrnjak (2010) conduziram estudos práticos sobre a condensação de CO<sub>2</sub> no interior de tubos lisos, obtendo valores entre 1,5 kW/m<sup>2</sup>·K e 2,5 kW/m<sup>2</sup>·K de coeficiente convectivo interno na zona bifásica.

### **3 METODOLOGIA DE TRABALHO**

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver o estudo sobre as propriedades térmicas de um trocador do tipo casco e tubos, responsável por unir os circuitos de alta e baixa temperatura de um sistema de refrigeração em cascata.

O conhecimento dessas características permitirá o dimensionamento de um equipamento para realizar a troca térmica, avaliar a viabilidade de sua utilização, o espaço físico ocupado pelo trocador de calor e compará-lo tecnicamente a um trocador de calor a placas.

Esse estudo é incentivado pela possibilidade deste equipamento ser fabricado dentro do campo fabril da empresa Tecnofrio Equipamentos Frigoríficos Ltda, enquanto outros tipos de trocadores de calor necessitam atualmente ser adquiridos de fabricantes externos à empresa. Isso devido à falta de maquinário adequado para fabricação, o não conhecimento das técnicas de produção, do domínio das normas aplicáveis, além da necessidade de desenvolver estudos totalmente novos nessa área, resultando em um investimento alto e de longo prazo.

#### **3.1 SITUAÇÃO ATUAL**

Os sistemas tradicionais de refrigeração por compressão a vapor têm seu rendimento reduzido quando ocorre uma grande diferença de pressão entre a descarga e a sucção do compressor. Como solução a esse problema, compressores de duplo estágio de compressão são empregados, apresentando valores de coeficiente de desempenho (COP - *Coefficient of Performance*) superiores em relação ao de simples estágio de compressão para aplicações de baixas temperaturas (STOECKER e JABARDO, 2002).

Devido ao dano ao meio ambiente oferecido por refrigerantes sintéticos, como a destruição da camada de ozônio e aquecimento global, os fluidos refrigerantes naturais são a melhor alternativa a longo prazo, atendendo às regulamentações ambientais. A amônia (R-717), como refrigerante natural é amplamente utilizada na refrigeração comercial e industrial, porém seus limites de toxicidade e inflamabilidade devem ser observados (MESSINEO, 2011).

Segundo Messineo (2011) o uso de sistemas em cascata de R-744 e R-717 reduzem significativamente o volume de amônia do sistema, além de possuir um COP comparável ao de duplo estágio em baixas temperaturas. O mesmo autor ainda cita que tipicamente nos circuitos de alta temperatura, os fluidos mais utilizados são a amônia, o propano, o propileno, o etileno e o R-404A.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto termo hidráulico do trocador de calor casco e tubos foi elaborado através do desenvolvimento matemático utilizando as equações e correlações disponíveis e indicadas no referencial teórico. Inicialmente foram levantados os dados conhecidos do projeto como: temperaturas de entrada e saída dos fluidos, dimensões máximas e mínimas do equipamento, fluxo de massa, carga térmica requerida e as considerações e simplificações de cálculo que puderam ser feitas sem afetar o resultado final.

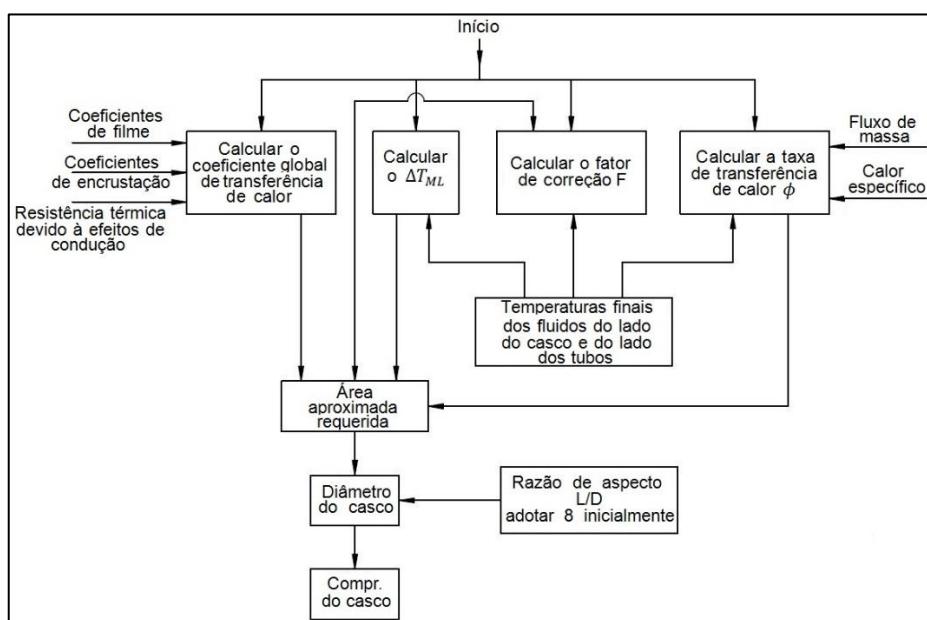
O processo foi iterativo, pois em função do número de circuitos utilizados no trocador, diâmetro do tubo e comprimento do trocador de calor, o fluxo mássico foi alterado, impactando diretamente em toda a configuração do equipamento. Esse procedimento foi executado seguindo o fluxograma de pré-dimensionamento proposto por Kuppan (2000), conforme a Figura 9. O projeto detalhado foi elaborado seguindo o fluxograma da Figura 10, proposto pelo mesmo autor.

Os valores das propriedades termodinâmicas do fluido R-404A foram retiradas do software *CoolPack Version 1.5*. E para o fluido R-744 as propriedades utilizadas proveram do software *miniREFPROP Version 9.5*.

O procedimento de cálculo do equipamento iniciou pelo lado dos tubos, para garantir a condensação do R-744, que é a proposta principal do trocador de calor.

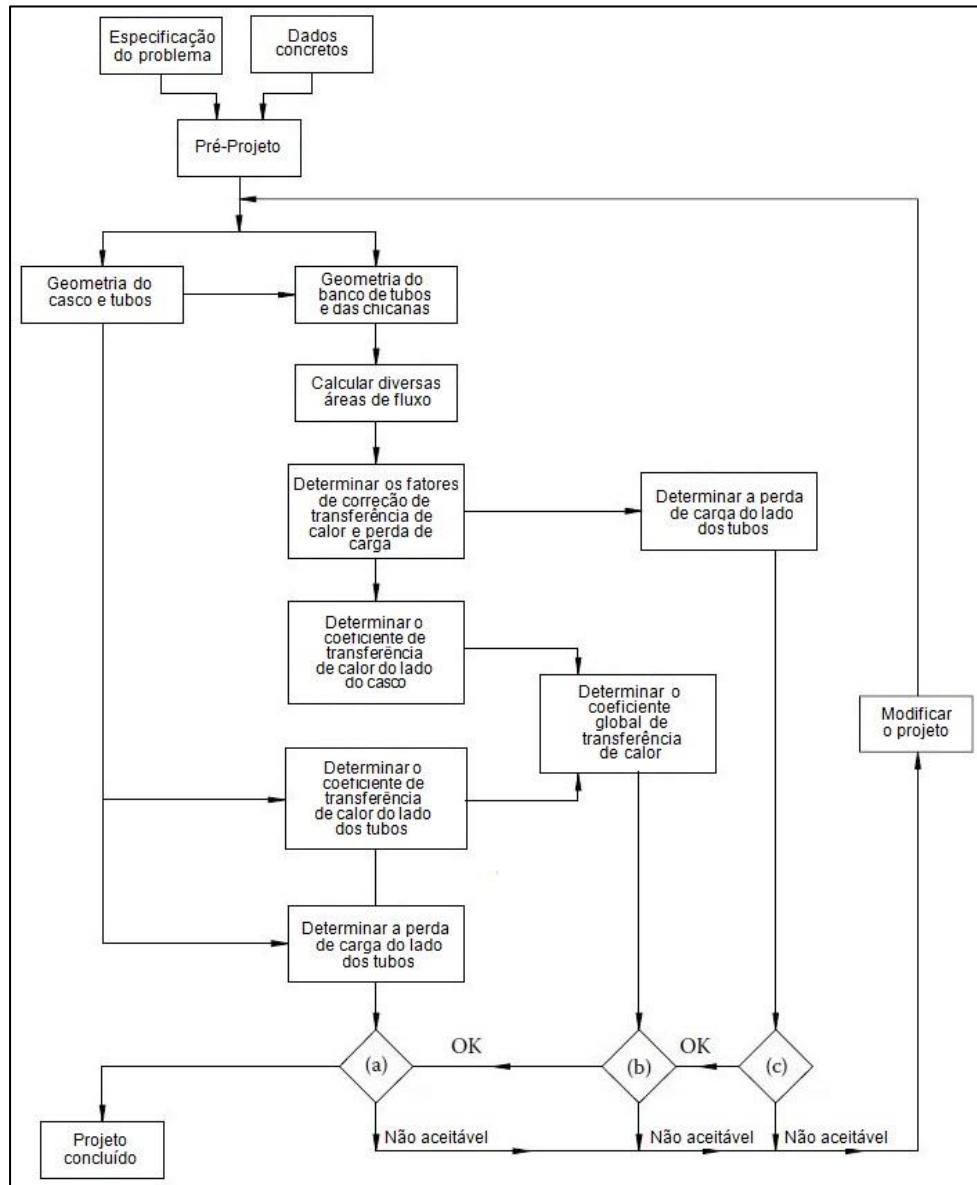
Para o cálculo do dessuperaquecimento e subresfriamento do CO<sub>2</sub> no interior dos tubos, foram utilizadas as correlações de Gnielinski. Para a condensação, foram adotadas as correlações de Iqbal e Bansal (2011).

Figura 9 – Fluxograma do pré-projeto do trocador de calor.



Fonte: Adaptado de Kuppan (2000).

Figura 10 – Fluxograma do projeto detalhado do trocador de calor.



Fonte: Adaptado de Kuppan (2000).

A perda de pressão no interior dos tubos é descrita pelas equações de Coulburn para as áreas com o fluido em uma fase e Friedel para a zona bifásica.

Kondou e Hrnjak (2010) apresentaram resultados satisfatórios de troca térmica e perda de pressão, na comparação entre seus ensaios e as correlações descritas para a condensação no interior dos tubos.

Posteriormente foi calculada a evaporação do R-404A no lado do casco, utilizando a equação de Palen, procedimento indicado por Collier e Thome (1994) e Bejan e Kraus (2003).

A perda de pressão no lado do casco foi desprezada para a situação de ebulação saturada em vaso, conforme sugerido por Schlunder et al. (1983), o efeito de perda de

pressão seria relevante em situação com convecção forçada, onde seria necessário o uso do método de Bell-Delaware para estimar essa perda.

Definidos os coeficientes convectivos interno e externo, é possível estimar a superfície de troca térmica requerida pelo equipamento utilizando a Equação (9), sugerida por Incropera e Dewitt (2007), utilizando os coeficientes de incrustação indicados pela norma TEMA (2007).

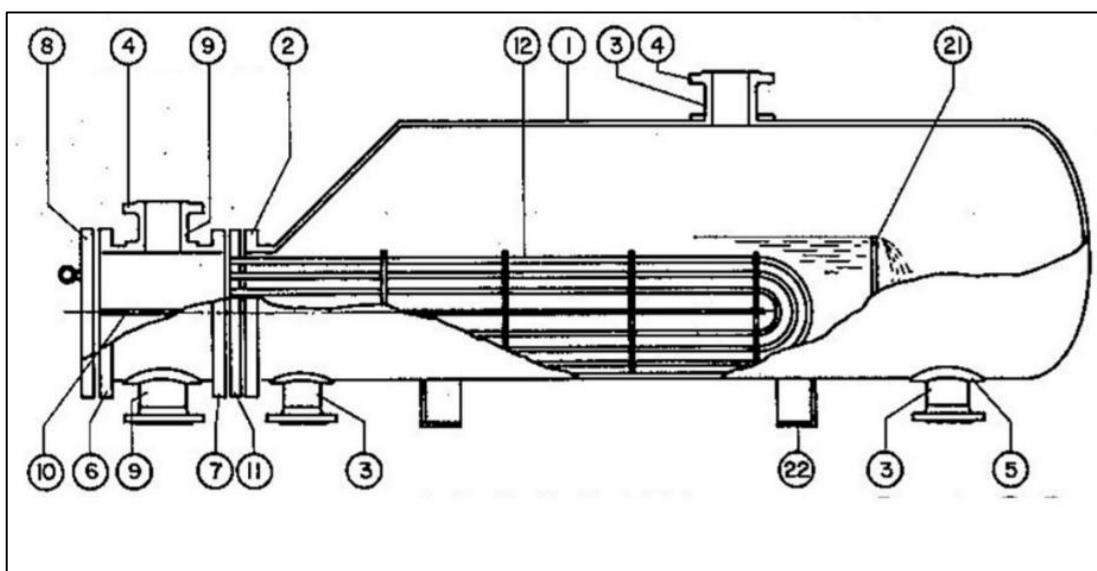
A ação inicial para o projeto detalhado foi a elaboração do procedimento de cálculo com a utilização do software Excel, aplicando as correlações adequadas. Testes iniciais com valores previamente conhecidos foram aplicados para a validação dos cálculos. Com o procedimento de cálculo aprovado, foram levantados os parâmetros de projeto e posteriormente, a bibliografia foi revisada para a elaboração do mesmo.

Na segunda etapa do trabalho, o desenvolvimento do projeto ocorreu em definitivo, onde simulações de diferentes modelos foram feitas para buscar a melhor relação entre troca térmica e perda de pressão. Nessa etapa se concentraram menos atividades, porém, maiores prazos foram necessários, por se tratar da aplicação do estudo, havendo, talvez, a busca de novas referências para a explicação de fenômenos não previstos anteriormente e eventualmente a necessidade de alterações.

Na terceira etapa foi necessário fazer análises criteriosas e expor os resultados obtidos com todo o embasamento definido e fundamentado. Por fim foi feita a organização dos resultados, análise dos dados e transcrição ao arquivo.

A configuração do equipamento que foi dimensionado, seguiu o formato da Figura 11, com a configuração “AKU”, conforme a referência da Figura 5, retirada de TEMA (2007).

Figura 11 – Trocador de calor “AKU”



Fonte: Adaptado de TEMA (2007).

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são exibidos e discutidos os resultados obtidos nos procedimentos de cálculo descritos no capítulo 3. Partindo do pré-projeto do trocador de calor, onde foram estimadas as características termo hidráulicas e, posteriormente, refinando o cálculo utilizando os dados de entrada típicos disponíveis em um projeto destinado à área da refrigeração.

### 4.1 PRÉ PROJETO DO TROCADOR DE CALOR

A sua elaboração partiu da definição dos dados de entrada e das propriedades termodinâmicas de projeto deste equipamento conhecidas, reportadas na Tabela 1. Além disso, buscou-se a configuração de um equipamento compacto, cujo comprimento não excede 2,0 metros. Os passos para a elaboração desse pré-projeto, seguiram o fluxograma proposto por Kuppan (2000), apresentado na Figura 9.

Tabela 1 – Dados de entrada para projeto termo hidráulico.

<b>Parâmetro</b>	<b>Lado dos tubos (R-744)</b>		<b>Lado do casco (R-)404A</b>	
	<b>Símb.</b>	<b>Valor</b>	<b>Símb.</b>	<b>Valor</b>
Fluxo mássico	$\dot{m}_h$	285 kg/h	$\dot{m}_c$	814,99 kg/h
Temp. de entrada	$T_{h,e}$	86 °C	$T_{c,e}$	-15 °C
Entalpia de entrada	$h_{h,e}$	539,80 kJ/kg	$h_{c,e}$	232,98 kJ/kg
Título de entrada	$x_{h,e}$	1,00	$x_{c,e}$	0,30
Est. Físico entrada	-	Vap. Superaq.	-	Mistura L+V
Dens. de entrada	$\rho_{h,e}$	49,037 kg/m³	$\rho_{c,e}$	847,05 kg/m³
Temp. de saída	$T_{h,s}$	-7 °C	$T_{c,s}$	-15 °C
Entalpia de saída	$h_{h,s}$	182,93 kJ/kg	$h_{c,s}$	357,78 kJ/kg
Título de saída	$x_{h,s}$	0	$x_{c,s}$	1,00
Est. Físico saída	-	Líq. Subresfr.	-	Vap. Saturado
Dens. de saída	$\rho_{h,s}$	969,15 kg/m³	$\rho_{c,s}$	18,89 kg/m³
Carga térmica	$\dot{Q}$	28,25 kW	$\dot{Q}$	28,25 kW

Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.1 Cálculo do fator de correção $F$

O fator  $F$  foi adotado como 1, não sendo necessário corrigir o  $\Delta T_{ML}$  quando o fluido no lado do casco possui temperatura constante (KAKAÇ, 1991).

#### 4.1.2 Cálculo do $\Delta T_{ML}$

Para situações onde ocorre a mudança de estado físico dos fluidos, Schlunder et al. (1983) sugerem adotar o MTD como sendo uma boa aproximação, utilizando a Equação 6b, e obtendo o valor de 10 K para uma temperatura de evaporação de -15 °C e condensação de -5 °C.

#### 4.1.3 Cálculo do coeficiente global de transferência de calor (U)

O coeficiente global de transferência de calor é um cálculo que depende da convergência de valores entre o dimensionamento do lado do casco (onde ocorre a evaporação do R-404A) e do lado dos tubos (onde ocorre a condensação do R-744). Este procedimento se iniciou pela determinação do coeficiente convectivo interno (lado dos tubos) por ser o resultado alvo buscado, que é a condensação do CO<sub>2</sub>.

Para tal, o dessuperaquecimento foi calculado ponto a ponto, utilizando as correlações de Gnielinski, com a temperatura variando de 1 em 1°C até atingir a de condensação, através do uso das Equações 17, 18, 19 e 21, resultando nos valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo dos parâmetros térmicos para o dessuperaquecimento

Propriedades						Eq. 17	Eq. 18	Eq. 19	Eq. 21
$T_{rb}$ K	$T_{wi}$ K	$G_r$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$d_i$ m	$\mu_b$ $\text{Pa}\cdot\text{s}$	$Pr_b$ -	$Nu_0$	$f_b$	$Nu_b$	$F_a$
359	308,50			$1,83 \cdot 10^{-5}$	0,82	40,48		42,75	
358	308,00			$1,83 \cdot 10^{-5}$	0,82	40,59		42,85	
357	307,50	49,37	0,00493	$1,82 \cdot 10^{-5}$	0,82	40,70	0,03	42,94	
356	307,00			$1,82 \cdot 10^{-5}$	0,82	40,81		43,04	
355	306,50			$1,81 \cdot 10^{-5}$	0,82	40,91		43,14	1,05
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
273	265,50			$1,43 \cdot 10^{-5}$	1,15	58,58		59,17	
272	265,00			$1,43 \cdot 10^{-5}$	1,17	59,13		59,69	
271	264,50	49,37	0,00493	$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,19	59,71	0,03	60,24	1,01
270	264,00			$1,42 \cdot 10^{-5}$	1,21	60,33		60,82	
269	263,50			$1,41 \cdot 10^{-5}$	1,23	60,99		61,45	

Fonte: O autor (2020).

Após atingir o término do dessuperaquecimento, a condensação é descrita pelas correlações de Iqbal e Bansal (2011) utilizando a Equação 22. A condensação também é calculada ponto a ponto, variando o título da mistura de 0,01 em 0,01. A Tabela 3 mostra os

resultados do número de Nusselt da zona bifásica e o coeficiente convectivo interno, através do uso das constantes:  $G_r = 49,37 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ,  $d_i = 0,00493 \text{ m}$ ,  $\mu_l = 1,09 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,  $P = 3047 \text{ kPa}$ ,  $P_{CRIT} = 7372 \text{ kPa}$ ,  $P_{RED} = 0,41$ ,  $Pr_l = 2,29$ ,  $Re_l = 2226,5$ ,  $k_L = 0,11506 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  e  $k_v = 0,018806 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .

Tabela 3 – Cálculo do coeficiente conectivo inteiro

<b>Parâmetro</b>		<b>Eq. 22</b>	<b><math>h_i</math></b>
$x$	$k_{mistura}$ W/m·K	$Nu_{tp}$ -	$h_i = h_t$ W/m <sup>2</sup> ·K
1,00	0,0193	12995,07	50839,66
0,99	0,0198	6356,45	25488,39
0,98	0,0207	3105,56	12059,14
0,97	0,0217	2040,52	8978,97
0,96	0,0227	1513,63	6955,98
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
0,04	0,1112	39,34	887,48
0,03	0,1122	38,11	867,12
0,02	0,1131	36,44	836,34
0,01	0,1141	33,75	781,08
0,00	0,1148	31,22	727,01

Fonte: O autor (2020).

Após a condensação completa do R-744, o fluido inicia o processo de subresfriamento, que também pode ser descrito pelas correlações de Gnielinski, com a temperatura variando de um em um grau Celsius até atingir a temperatura de subresfriamento desejado (2 K), através do uso das Equações 17, 18, 19 e 20, resultando nos valores da Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo dos parâmetros térmicos para o subresfriamento

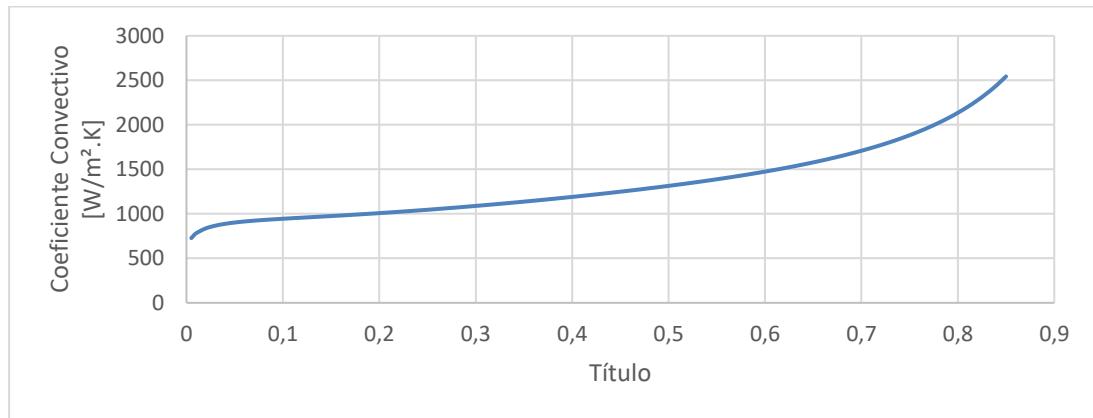
<b>Propriedades</b>						<b>Eq. 17</b>	<b>Eq. 18</b>	<b>Eq. 19</b>	<b>Eq. 20</b>
$T_{rb}$ K	$\mu_{wi}$ K	$G_r$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$d_i$ m	$\mu_b$ Pa·s	$Pr_b$ -	$Nu_0$ -	$f_b$ -	$Nu_b$ -	$F_a$ -
267	$1,21 \cdot 10^{-4}$	49,37	0,00493	$1,12 \cdot 10^{-4}$	2,28	9,80	$5,08 \cdot 10^{-2}$	9,69	0,99
266	$1,22 \cdot 10^{-4}$	49,37	0,00493	$1,14 \cdot 10^{-4}$	2,27	9,51	$5,12 \cdot 10^{-2}$	9,42	0,99

Fonte: O autor (2020).

O coeficiente convectivo interno é então definido, conhecendo o número de Nusselt para as zonas de dessuperaquecimento e subresfriamento, seguindo a equação  $Nu = h \cdot D/k$  (INCROPERA e DEWITT, 2007). Para a zona de condensação, utilizando as correlações de Iqbal e Bansal (2011), este valor é  $\phi_r$ . Os resultados dos coeficientes locais são mostrados na Tabela 5 para alguns pontos.

O coeficiente convectivo interno assumiu o comportamento do gráfico da Figura 12, em função do título da mistura. Esses valores foram similares aos obtidos por Kondou e Hrnjak (2010), que variaram entre 1000 W/m<sup>2</sup>·K e 3000 W/m<sup>2</sup>·K.

Figura 12 – Coeficiente convectivo interno (R-744)



Fonte: O autor (2020).

O coeficiente convectivo externo é definido pela correlação de Palen, Equação 14 deste trabalho. Essa equação correlaciona a 15 de Thome, e a 16 de Cooper.

Tabela 5 – Cálculo do coeficiente convectivo interno local

Zona	x -	T °C	Nu <sub>b</sub> -	k <sub>mistura</sub> W/m·K	d <sub>i</sub> m	h <sub>i</sub> W/m <sup>2</sup> ·K
<b>Dessuperaquecimento</b>	1,00	359,00	42,75	2,32·10 <sup>-2</sup>	0,00493	200,83
		329,00	46,04	2,11·10 <sup>-2</sup>	0,00493	196,84
		299,00	50,93	1,93·10 <sup>-2</sup>	0,00493	199,47
		269,00	61,45	1,88·10 <sup>-2</sup>	0,00493	233,79
<b>Condensação</b>	1,00 0,66 0,33 0,00	268,00	-	-	0,00493	50839,66
		268,00	-	-	0,00493	1601,64
		268,00	-	-	0,00493	1117,12
		268,00	-	-	0,00493	727,01
<b>Subresfriamento</b>	0,00	267,00	9,69	1,17·10 <sup>-1</sup>	0,00493	229,28
		266,00	9,42	1,18·10 <sup>-1</sup>	0,00493	225,27

Fonte: O autor (2020).

O valor de  $F_b$  pode ser adotado como 1,5 conforme Bejan e Kraus (2003), e  $h_{nc}$  assume o valor de 250 W/m<sup>2</sup>·K (COLLIER e THOME, 1984).

Como o fluxo de calor ( $\Phi$ ) é uma função da área e da transferência de calor, foi adotado um valor de fluxo para cada zona de troca térmica, em processo iterativo, até que o somatório das áreas dessa seção fosse convergente com o fluxo de calor através desta.

A Tabela 6 mostra os resultados calculados para o coeficiente convectivo ideal e o fluxo térmico, dividida por zonas de troca térmica, considerando constantes:  $\Delta T_{bp} = 0,6\text{ K}$ ,

$$\rho_v = 18,89 \text{ kg/m}^3, \quad \rho_l = 1201,98 \text{ kg/m}^3, \quad \beta_l = 0,0003 \text{ m/s}, \quad P_{RED} = 9,96 \cdot 10^{-2}, \quad M = 97,60 \text{ kg/kmol} \text{ e } h_{lv} = 178,28 \text{ kJ/kg}.$$

Tabela 6 – Cálculo do coeficiente convectivo ideal e fluxo térmico

Zona	$h_{id}$ W/m <sup>2</sup> .K	$\Phi$ W/m <sup>2</sup>
<b>Dessuperaquecimento</b>	1310,90	5250,94
<b>Condensação</b>	1359,44	5543,74
<b>Subresfriamento</b>	478,92	1168,27

Fonte: O autor (2020).

A Tabela 7 traz os resultados para o cálculo do coeficiente convectivo externo, nas diferentes zonas de troca térmica.

Tabela 7 – Cálculo do coeficiente convectivo externo

Zona	$F_b$ -	$h_{nc}$ W/m <sup>2</sup> .K	$h_s$ W/m <sup>2</sup> .K	$F_c$ -	$h_{NCB}$ W/m <sup>2</sup> .K
<b>Dessuperaquecimento</b>	1,50	250,00	1960,18	0,87	1310,90
<b>Condensação</b>	1,50	250,00	2027,61	0,87	1359,44
<b>Subresfriamento</b>	1,50	250,00	826,57	0,80	478,92

Fonte: O autor (2020).

Para a evaporação no lado do casco, Gorenflo (2000) encontrou valores em torno de 4000 W/m<sup>2</sup>.K de coeficiente convectivo externo, para uma pressão reduzida de 0,1 e um fluxo de calor específico de 20000 W/m<sup>2</sup>. Os valores obtidos neste projeto foram inferiores, ou seja, em média de 1937 W/m<sup>2</sup>.K. Essa diferença pode ser explicada pela diferença de fluxo térmico específico obtido neste projeto, com valor de 5170 W/m<sup>2</sup>, resultado da divisão da carga térmica pela área de troca.

O coeficiente global de transferência de calor pode então ser estimado com base nos valores de coeficientes convectivos interno e externo calculados ponto a ponto, utilizando a Equação 9.

Os coeficientes de incrustação seguem o Anexo B, indicados na norma TEMA. A Tabela 8 traz alguns valores calculados de U, para diferentes pontos das zonas de dessuperaquecimento, condensação e subresfriamento, considerando constantes:  $R_{f,s} = 0,000176 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,  $R_{f,t} = 0,000176 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ,  $t_w = 0,00071 \text{ m}$ ,  $k_w = 14,90 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $A_i/A_m = 0,44$ , e  $A_e/A_i = 1,29$ .

**Tabela 8 - Coeficiente global local de transferência de calor**

$h_i = h_t$ W/m <sup>2</sup> .K	$h_e = h_s$ W/m <sup>2</sup> .K	$U$ W/m <sup>2</sup> .K
200,83	1960,18	137,05
196,84	1960,18	134,65
199,47	1960,18	136,23
233,79	1960,18	156,43
50839,66	2027,61	1121,61
1601,64	2027,61	598,65
1117,12	2027,61	495,24
727,01	2027,61	379,09
229,28	826,57	138,88
225,27	826,57	136,97

Fonte: O autor (2020).

A superfície de troca térmica requerida é determinada através do uso da Equação 10, conhecidos todos os valores, o valor da área é calculado para cada seção, segmentada pela variação de um em um grau Celsius para as zonas sem mudança de fase, e pela variação de título da mistura de 0,01 em 0,01 para a zona com mudança de fase. O somatório das áreas resulta na superfície total de troca térmica requerida para o trocador.

O valor de DTML foi substituído pelo MTD, conforme sugerem Schlunder et al. (1983), pois o fluido do lado do casco está constantemente em evaporação.

A Tabela 9 mostra os valores médios de superfície de troca requerida para cada zona de troca térmica (dessuperaquecimento, condensação e subresfriamento).

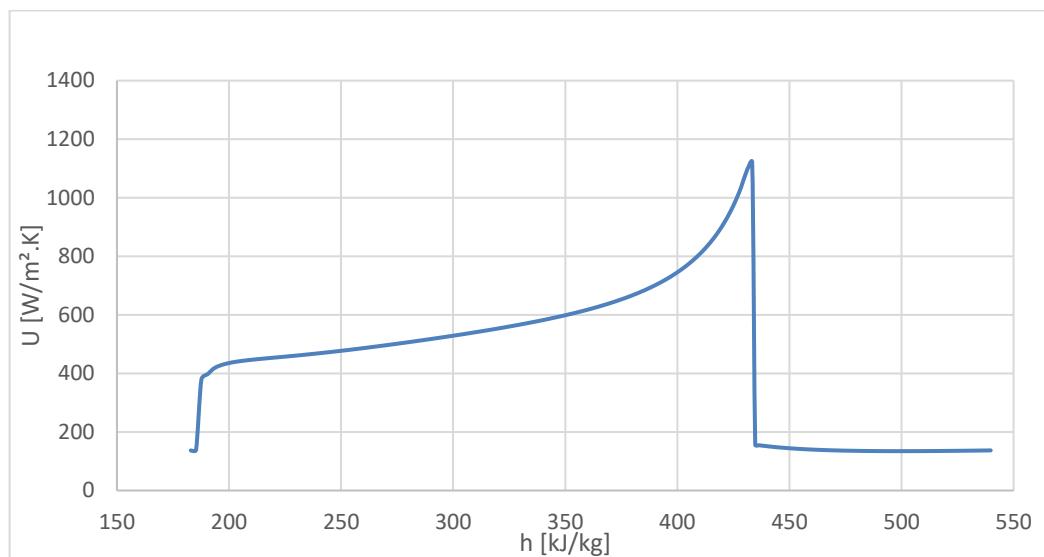
**Tabela 9 – Características térmicas do trocador de calor**

Zona	$\dot{Q}$ W	$U$ W/m <sup>2</sup> .K	$A$ m <sup>2</sup>	$F$ -	MTD °C
<b>Dessuperaquecimento</b>	8424,92	139,44	1,60		37,66
<b>Condensação</b>	19559,71	593,23	3,53		9,34
<b>Subresfriamento</b>	376,04	137,92	0,32	1	8,47
<b>Totais</b>	28360,67	432,88	5,45		12,01

Fonte: O autor (2020).

A curva gerada pelo cálculo ponto a ponto do coeficiente global de transferência de calor é exibida na Figura 13, mostrando um comportamento similar ao obtido por Kondou e Hrnjak (2010), embora se obteve menores valores em consequência de um menor fluxo mássico de R-744, que por consequência, reduz a troca térmica.

Figura 13 – Coeficiente global de transferência de calor



Fonte: O autor (2020).

#### 4.1.4 Geometria aproximada do casco

Para finalizar o pré-dimensionamento do trocador de calor, foi definida sua configuração geométrica, considerando um comprimento limite de 2,0 metros para o equipamento e utilizando as Equações 11, 12 e 13.

A geometria adotada foi a triangular de 30°, por resultar em uma maior densidade de tubos, e um equipamento mais compacto. Essa configuração é de difícil limpeza, e só deve ser usado quando o fluido do lado do casco for limpo (KAKAÇ e LIU, 2002). A norma TEMA (2007) especifica que a distância mínima entre centro dos tubos deve ser de 1,25 vezes o diâmetro do tubo de troca térmica utilizado.

Os tubos de troca térmica foram de aço inoxidável 304, SA-249 TP304 (Anexo C) conforme ASME (2017), com diâmetro externo de 6,35 mm (1/4") e espessura de 0,71 mm (B.W.G 22), conforme Anexo A.

Como consequência desses valores adotados, o trocador de calor casco e tubos ficou pré-definido pela configuração da Tabela 10. Foi prevista a fabricação do casco com o uso de um tubo de aço sem costura schedule 40, e material ASTM A-106 Gr.B, de diâmetro 8" (219,08 mm externo), presente na norma ASME VIII – I para o projeto de vasos de pressão.

Tabela 10 – Geometria do trocador de calor

$A_e$ $\text{m}^2$	$d_e$ m	$L_t$ m	$N_t$ un	$D_i$ m	$C_l$ -	$L_{tp}$ mm	$L/D$ -
5,45	0,00635	1,63	168,00	0,20272	0,86	14,89	8,03

Fonte: O autor (2020).

## 4.2 PROJETO MECÂNICO DO TROCADOR DE CALOR

O projeto detalhado do trocador de calor parte do pré-projeto, seguindo o fluxograma da Figura 10. Nesta etapa, deve-se definir por completo a geometria do equipamento, considerando o casco, banco de tubos e chicanas (KUPPAN, 2000).

A Tabela 11 traz as propriedades dos materiais utilizados para o dimensionamento que se seguirá ao longo deste capítulo.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas dos materiais

Material	Tensão mínima de ruptura $S_u$ [MPa]	Tensão mínima de escoamento $S_v$ [MPa]	Tensão máxima admissível $S$ [MPa]	Faixa de temperatura de aplicação $T$ [°C]
<b>SA-515 Grade 60 (Chapa)</b>	415	220	118	-29 a 200
<b>SA-105 (Forjado)</b>	485	250	138	-29 a 200
<b>SA-106 Gr.B (Tubo S/C)</b>	415	240	118	-29 a 325
<b>SA-234 WPB (conexões)</b>	415	240	118	-29 a 325
<b>SA-249 TP304 (Tubo C/C)</b>	515	205	118	-29 a 100
<b>SA-193 Gr. B7 (conexões)</b>	690	515	130	-29 a 325

Fonte: Adaptado de ASME (2017).

### 4.2.1 Casco e cabeçotes

O cabeçote frontal foi do tipo “C”, com feixe tubular removível para permitir a limpeza do feixe (KUPPAN, 2000). O casco foi do tipo “K”, mais indicado para situações com ebulação no lado do casco. Já o cabeçote posterior foi do tipo “U”. Essa configuração caracteriza um trocador de calor do tipo “AKU”, conforme a Figura 11, adaptada de TEMA (2007).

O diâmetro interno do casco menor foi de 202,72 mm, com comprimento entre soldas de 1600 mm, de material ASTM A-106 Gr.B. De acordo com a parte UG-27 (c)(1) (ASME,2017), a espessura do casco é definida por:

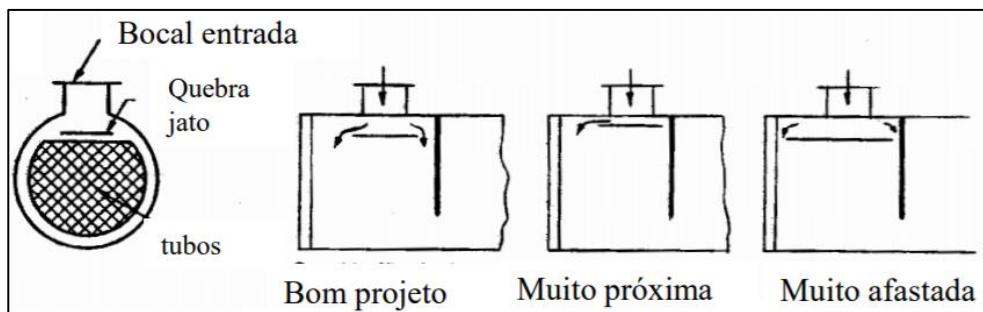
$$t_c = \frac{P_{proj} \cdot (D_i / 2)}{S \cdot E - 0,6 \cdot P_{proj}} + c \quad (36)$$

Onde  $P_{proj}$  é a pressão de projeto de 1,62 MPa,  $D_i$  é o diâmetro interno do casco subtraída a tolerância de espessura na fabricação de tubos schedule (12,5%) e calculado na condição corroída, sendo igual a 200,68 mm,  $S$  é a tensão admissível do material de 118 MPa,  $E$  é a eficiência da junta soldada (com base na norma ASME VIII-I, em função dos

ensaios não destrutivos realizados e o tipo de junta), igual a 0,6 e  $c$  é a sobre-espessura para corrosão, considerada de 1,60 mm apenas para o lado externo. Conforme a tabela R-3.13 (TEMA, 2007), para o caso de diâmetro nominal de 8" (219,08 mm), a espessura mínima para o casco fabricado em tubo de aço carbono segue o padrão schedule 30. O resultado obtido para  $t_C$  foi de 3,93 mm.

Os bocais do casco não poderão ter projeção interna, mas os do carretel (cabeçotes) sim. Quebra jato é obrigatório ser instalado no bocal de entrada do casco para evitar o impacto da corrente fluida sobre os tubos do feixe tubular (TEMA, 2007). A Figura 14 mostra a forma de um quebra jato.

Figura 14 – Quebra jato



Fonte: Adaptado de Kuppan (2000).

Demais dimensionamentos mecânicos/ estruturais, com tampos, bocais, reforços de bocais, suportes, soldas, transições cônicas, flanges e etc., devem ser elaborados seguindo a norma ASME VIII-I, e não são o objetivo principal deste trabalho. Para este trabalho foram dimensionados apenas os itens que impactam diretamente no dimensionamento termo hidráulico do equipamento.

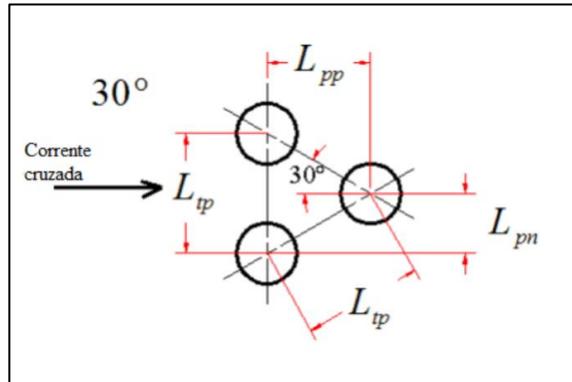
#### 4.2.2 Banco de tubos

Os tubos de troca térmica foram de aço inoxidável 304, SA-249 TP304 (Anexo C) conforme ASME (2017), com diâmetro externo de 6,35 mm (1/4") e espessura de 0,71 mm (B.W.G 22), conforme Anexo A. A espessura dos tubos pode ser definida pelo código ASME VIII-I, pela Equação 36.

A configuração dos tubos foi triangular rotacionado, conforme a Figura 15, para uma maior densidade de tubos de troca térmica. Sabendo que o fluido do lado do casco é limpo, não trará problemas de limpeza (KAKAÇ e LIU, 2002).

O passe entre os tubos de troca térmica deverá ser de no mínimo 1,50 vezes o diâmetro externo deste, o passe é medido entre os centros dos tubos  $L_{tp}$ .

Figura 15 – Geometria triangular rotacionada



Fonte: Adaptado de Thome (2004).

#### 4.2.3 Chicanas

As chicanas serão posicionadas equidistantes, não excedendo 50 mm de espaçamento entre elas, e com espessura mínima de 3,20 mm, conforme a tabela R-4.41 (TEMA, 2007). A folga máxima entre a chicana e o casco foi de 3,20 mm, conforme tabela RCB-4.3 (TEMA, 2007). O diâmetro dos furos foi de 6,58 mm conforme a tabela RCB-7.21M (TEMA, 2007). Quatro tirantes de 3/8" (9,525 mm), material (parafusos) SA-193 Gr B7, serão utilizados para enrijecer o banco de tubos junto com as chicanas e espelho, conforme a tabela R-4.71 (TEMA, 2007). Esses tirantes devem ser de aço inoxidável com um percentual mínimo de 12% de cromo em sua composição, a fim de evitar a corrosão. O corte das chicanas transversais varia entre 20% e 30% da altura total do casco, e foi disposta na orientação vertical (TEMA, 2007).

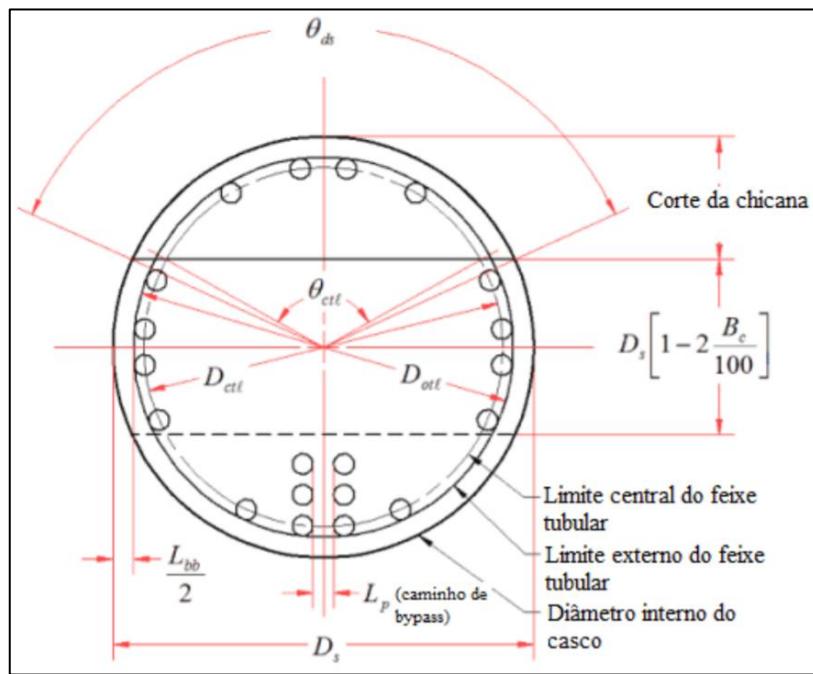
As constantes da Figura 16 podem ser encontradas com os dados levantados até o momento, e são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Geometria do banco de tubos e chicanas

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Espaçamento entre chicanas	$L_{bc}$	50	mm
Espaço do compartimento de entrada	$L_{bi}$	85	mm
Espaço do compartimento de saída	$L_{bo}$	85	mm
Espessura das chicanas	$t_b$	3,2	mm
Diâmetro interno do casco	$D_s = D_i$	202,72	mm
Corte das chicanas	$B_s$	20 a 30	%
Número de passes	$N_p$	2	passes
Passo dos tubos	$L_{tp}$	13	mm
Diâmetro interno dos tubos	$d_i$	4,93	mm
Diâmetro externo dos tubos	$d_e$	6,35	mm

Fonte: O autor (2020).

Figura 16 – Geometria das chicanas



Fonte: Adaptado de Thome (2004).

#### 4.2.4 Espelhos

O espelho flutuante é calculado conforme o parágrafo R-7.11 da TEMA, não devendo ser em situação alguma inferior a 3/4" (19,1 mm). De acordo com a seção A.131 do apêndice da norma TEMA (2007), o espelho deve ser calculado pela Equação 37.

$$t_E = \frac{F \cdot G}{3} \cdot \sqrt{\frac{P_{proj}}{\eta \cdot S}} + c \quad (37)$$

Onde  $F = 1,5$  e  $G = D_i$  [mm] são fatores que dependem da construção do trocador,  $P_{proj} = 1,621 \text{ MPa}$ ,  $\eta = 0,7836$ ,  $S = 118 \text{ MPa}$  e  $c = 1,6 \text{ mm}$ . O valor obtido para  $t_E$  foi de 15,02 mm.

#### 4.2.5 Determinação da perda de pressão do lado dos tubos

A perda de pressão no lado dos tubos foi calculada através das correlações de Coulburn, pelas Equações 25 e 26 e Friedel, pelas Equações 27 e 28, apresentando valores satisfatórios nos estudos de Kondou e Hrnjak (2010).

O procedimento de cálculo adotado foi similar ao elaborado para os coeficientes convectivos interno e externo do trocador de calor. Para as zonas onde não ocorre mudança

de fase (dessuperaquecimento e subresfriamento), foi calculada a perda de pressão constante na seção. Na zona bifásica (condensação), o cálculo foi elaborado ponto a ponto, variando o título da mistura de 0,01 em 0,01.

A Tabela 13 traz os valores de perda de pressão calculados para as diferentes zonas de resfriamento.

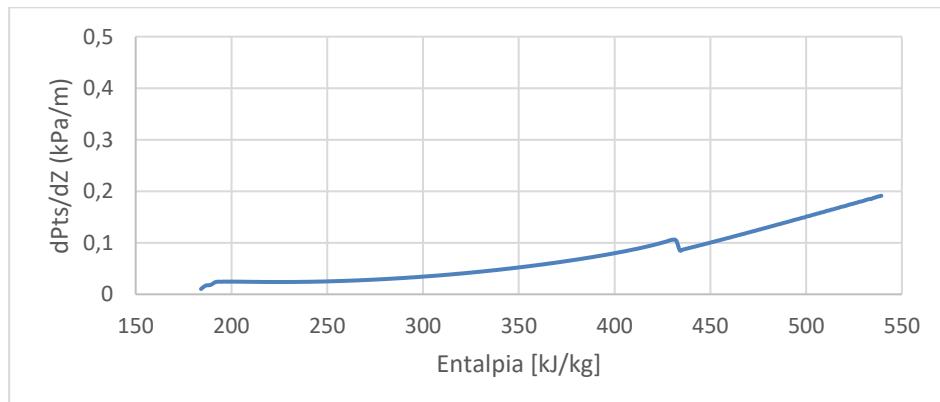
Tabela 13 – Perda de pressão no lado dos tubos

Zona	$dZ$ m	$\Delta P_M$ Pa	$dP_F/dZ$ Pa/m	$\Delta P_{TS}$ Pa
<b>Dessuperaquecimento</b>	0,96	20,48	97,84	114,16
<b>Condensação</b>	2,11	26,55	28,43	86,41
<b>Subresfriamento</b>	0,19	0,02	10,16	1,97
<b>Totais</b>	3,26	47,04	136,44	202,54

Fonte: O autor (2020).

A perda de pressão no lado dos tubos apresentou resultados inferiores aos obtidos por Kondou e Hrnjack (2010), porém, os autores utilizaram em seus experimentos um fluxo mássico específico de 100 kg/m<sup>2</sup>·s, praticamente o dobro do utilizado neste trabalho (49,37 kg/m<sup>2</sup>·s). Esse fator impacta significativamente na perda de pressão, devido ao maior atrito com as paredes do tubo, além da diferença entre a pressão de saturação de 6,0 MPa para 3,05 MPa. O gráfico da Figura 17 mostra os resultados para este trabalho.

Figura 17 – Perda de pressão para 49,37 kg/m<sup>2</sup>·s e pressão de 3,05 MPa



Fonte: O autor (2020).

#### 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em comparação ao trocador a placas do Anexo E, de mesma carga térmica usada aqui, o trocador de calor casco e tubos deste projeto apresentou um coeficiente global de transferência de calor médio de 431 W/m<sup>2</sup>·K devido à baixa velocidade de escoamento do CO<sub>2</sub> no interior dos tubos, contra 963 W/m<sup>2</sup>·K do trocador a placas. Por consequência, o

equipamento necessitou de maior superfície de troca térmica, sendo necessário 5,49 m<sup>2</sup> para o trocador casco e tubos realizar a troca térmica, contra 2,88 m<sup>2</sup> do trocador a placas.

A perda de pressão do trocador a placas apresentou um valor mais elevado, devido ao maior fluxo mássico escoando pela área de passagem disponível, com valores de 40,8 kPa no lado do R-404A e 1,82 kPa no lado do R-744. Para o trocador casco e tubos, no lado do R-404A (carcaça) a perda de pressão foi desprezada por apresentar um valor insignificante. Para o lado do R-744, o valor obtido foi de 204 Pa.

O trocador a placas, como já era esperado, se apresentou mais compacto, com medidas de 528 x 160 x 120 mm (1,014·10<sup>-2</sup> m<sup>3</sup>), contra um dimensional estimado de diâmetro 500 mm por 2000 mm de comprimento (0,50 m<sup>3</sup>) para o trocador de calor deste projeto.

Calculando o COP do sistema ( $COP = \dot{Q}_{ev}/\dot{W}_e$ ), onde  $\dot{Q}_{ev}$  é a carga térmica de refrigeração e  $\dot{W}_e$  a potência de eixo consumida no compressor, foram obtidos os valores de 2,73 para a condição do vapor de sucção saturado, e 2,67 para a condição com superaquecimento de 10 K.

A tabela 14 mostra uma análise comparativa dos resultados comentados acima.

Tabela 14 – Comparativo entre os resultados dos trocadores de calor

Parâmetro avaliado	Trocador casco e tubos	Trocador a placas
Coeficiente global de transferência de calor	431 W/m <sup>2</sup> ·K	963 W/m <sup>2</sup> ·K
Superfície de troca térmica	5,49 m <sup>2</sup>	2,88 m <sup>2</sup>
Perda de pressão do R-744	204 Pa	1.820 Pa
Perda de pressão do R-404 <sup>a</sup>	0 Pa	40.800 Pa
Estado físico do fluido na sucção	Vapor saturado	Vapor superaq.
COP	2,73	2,67
Área de base ocupada	1 m <sup>2</sup>	0,0192 m <sup>2</sup>

Fonte: O autor (2020).

## 5 CONCLUSÕES

Através do procedimento de cálculo realizado, foi dimensionado um trocador de calor do tipo casco e tubos para realizar a condensação de 285 kg/h de CO<sub>2</sub>, através da energia cedida para a evaporação de 815 kg/h de R-404A.

O equipamento apresentou uma superfície de troca térmica 91% superior ao trocador de calor a placas, o que remete à um menor rendimento. Esse reflexo no aumento da área de troca térmica se dá devido à um menor coeficiente global de transferência de calor, este apresentando um valor 45% inferior ao trocador de calor a placas.

Devido ao trocador de calor casco e tubos realizar a evaporação saturada do R-404A do lado da carcaça, sua perda de pressão é praticamente nula. O trocador a placas, devido à sua forma construtiva, faz com que ocorra o escoamento de ambos os fluidos nos canais, e por isso apresenta um valor de perda de pressão significativo de 40,8 kPa. Para o R-744 condensando, o trocador de calor a placas apresentou um valor de perda de pressão quase 9 vezes superior ao casco e tubos devido ao fluxo mássico mais elevado no primeiro.

Em vantagem, a forma construtiva do trocador de calor a placas permite garantir um superaquecimento do R-404A, garantindo a evaporação total do fluido e protegendo o compressor quanto à sucção de gotículas do refrigerante no estado líquido. Em contrapartida, a forma construtiva do trocador casco e tubos do tipo “K” permite que seu excesso de seção transversal de área trabalhe como um “separador de fases”, garantindo ao compressor a sucção de vapor saturado livre dessas gotículas.

Avaliando o rendimento do sistema de refrigeração no lado do CO<sub>2</sub>, o equipamento dimensionado nesse projeto garante um maior aproveitamento da energia, pois a menor perda de pressão gerada permite que essa energia seja aproveitada para a geração de frio, além também de garantir vapor saturado na sucção do compressor, que também aumenta seu rendimento. O COP do compressor para uma condição considerando superaquecimento de 10 K e subresfriamento de 2 K é de 2,67. Para a condição de sucção com superaquecimento igual a 0 K e subresfriamento de 2 K, o COP é de 2,73.

O trocador de calor a placas é conhecido na bibliografia como “trocador de calor compacto”, e isso pode ser observado ao comparar o dimensional dos equipamentos. O trocador de calor a placas ocupa uma área de base de 0,0192m<sup>2</sup>, enquanto o casco e tubos ocuparia em torno de 1 m<sup>2</sup>, sendo este último 52 vezes superior. Quanto ao volume ocupado, o condensador dimensionado neste projeto assume um valor 49 vezes maior.

Quanto à limpeza do equipamento, o trocador casco e tubos permite a remoção completa do feixe de tubos, podendo-se realizar a limpeza mecânica deste. Já o trocador a placas, na forma construtiva apresentada possui suas placas soldadas ao corpo, permitindo apenas sua limpeza química.

## 6 PROPOSTAS PARA NOVOS TRABALHOS

O grande número de variáveis envolvidas neste estudo, além da pouca bibliografia específica disponível permite que sejam sugeridas algumas alternativas de trabalhos futuros em torno deste tema. Abaixo estão listadas algumas sugestões identificadas:

- a) validar experimentalmente os procedimentos de cálculo adotados neste trabalho;
- b) buscar procedimentos de cálculo para a evaporação no lado do casco que permitam considerar os efeitos geométricos do banco de tubos, oferecendo maior precisão aos cálculos;
- c) dimensionar o mínimo excesso de área da seção transversal deste trocador de calor para realizar a separação das gotículas de líquido succionadas;
- d) determinar com precisão a temperatura da parede do tubo de troca térmica;
- e) refinar o cálculo nas zonas de transição entre os estados de vapor superaquecido e início da condensação.

## REFERÊNCIAS

- AGARWAL, R.; HRNJAK, P. Condensation in two phase and desuperheating zone for R1234ze(E), R134a and R32 in horizontal smooth tubes. **International Journal of Refrigeration**, [S. l.], p. 172-183, 22 ago. 2014.
- ASHRAE (1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329). **ASHRAE Handbook: Refrigeration**. Atlanta, GA, EUA: Mowen, 2018.
- ASME. **Boiler and Pressure Vessel Code**: An International Code. Two Park Avenue, New York, NY 10016-5990: ASME, 2017.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. **Heat Transfer Handbook**. EUA, New Jersey: John Wiley & sons, inc., 2003.
- BELL, K. J. Approximate sizing of shell and tube heat exchangers. In: SCHLUNDER, E. U. **Heat Exchanger Design Handbook**. Washington, D. C.: Hemisphere, 1983. v. 3, cap. 3.
- BELL, K. J. Delaware method for shellside design. In: SHAH, R. K.; SUBBARAO, E. C.; MASHELKAR, R. A. **Heat Transfer Equipment Design**. Washington, D.C.: Hemisphere, 1988. p. 145-166.
- BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. São Paulo: E. Blücher, 2013.
- CAVALLINI, A. et al. Condensation in Horizontal Smooth Tubes: A New Heat Transfer Model for Heat Exchanger Design. **Heat Transfer Engineering**, Italy, p. 31-38, 21 set. 2006.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014.
- CLETO, L. T. Aplicações de CO<sub>2</sub> como fluido refrigerante no setor de refrigeração industrial. In: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA (Brasil). **Uso de Fluidos Naturais em Sistemas de Refrigeração e Ar-condicionado**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2008.
- COLLIER, J. G.; THOME, J. R. **Convective Boiling and Condensation**. 3. ed. EUA, New York: Oxford University Press, 1994.
- SILVA, Alessandro da. **Dióxido de Carbono em Sistemas de Refrigeração Comercial e Industrial**. São Paulo: Nova Técnica Editorial, 2009.
- DOSSAT, R. J. **Principles of Refrigeration**. Houston, Texas: John Wiley & Sons, inc., 2004.
- GAS SERVEI S.A. (Espanha, Barcelona). **Dados Técnicos**: R-404A. [S. l.: s. n.], [entre 2019 e 2000]. Disponível em: [https://www.gas-serv ei.com/images/Dados\\_tecnicos\\_R404A.pdf](https://www.gas-serv ei.com/images/Dados_tecnicos_R404A.pdf). Acesso em: 5 set. 2019.
- GORENFLO, D. State of the art in pool boiling heat transfer of new refrigerants. **International Journal of Refrigeration**, [S. l.], p. 6-14, 8 jun. 2000.
- INCROPERA, F.; DEWITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

IQBAL, Ossama; BANSAL, Pradeep. In-tube condensation heat transfer of CO<sub>2</sub> at low temperatures in a horizontal smooth tube. **International Journal of Refrigeration**, Auckland, New Zealand, 2012, v. 35, p. 270-277, 4 nov. 2011.

KAKAÇ, S. **Boilers, Evaporators and Condensers**. Coral Gables, Florida: John Wiley & Sons, Inc., 1991.

KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat Exchangers: Selection, rating and thermal design**. 2. ed. EUA: CRC PRESS, 2002.

KONDOU, C.; HRNJAK, P. Heat rejection from R744 flow under uniform temperature cooling in a horizontal smooth tube around the critical point. **International Journal of Refrigeration**, EUA, p. 719-731, 5 nov. 2010.

KONDOU, C.; HRNJAK, P. Heat rejection in condensers: desuperheating, condensation in superheated region and two phase zone. **International Journal of Refrigeration**, EUA, 16 jul. 2012.

KUPPAN, T. **Heat Exchanger Design Handbook**. Southern Railway Madras, India: Marcel Dekker, 2000.

LADEIRA, H. M. S.; BANDARRA FILHO, E. P. Estudo do dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, operando como fluido refrigerante em sistemas de refrigeração. In: Simpósio do programa de pós-graduação em engenharia mecânica, 2005, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

MESSINEO, A. R744-R717 Cascade refrigeration system: Performance evaluation compared with a HFC two-stage system. **Energy Procedia**, [s. l.], ano 2012, n. 14, p. 56-65, 2011. DOI 10.1016/j.egypro.2011.12.896. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211043128>. Acesso em: 23 out. 2019.

MOTA-BABILONI, Adrián; NAVARRO-ESBRÍ, Joaquín; PERIS, Bernardo; MOLÉS, Francisco; VERDÚ, Gumersindo. Experimental evaluation of R448A as R404A lower-GWP alternative in refrigeration systems. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], p. 756-762, 27 ago. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415007803?via%3Dihub>. Acesso em: 14 ago. 2019.

NASRUDDIN, SHOLAHUDIN, S.; GIANNETTI, N.; ARNAS, Optimization of a cascade refrigeration system using refrigerant C3H8 in high temperature circuits (HTC) and a mixture of C2H6/CO<sub>2</sub> in low temperature circuits (LTC). **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], p. 96-103, 9 maio 2016.

SCHIRMER, Waldir Nagel; LISBOA, Henrique de Melo. Química da atmosfera: Constituintes naturais, poluentes e suas reações. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, 20 dez. 2008. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/563/447>. Acesso em: 14 ago. 2019.

SCHLUNDER, E. U. *et al.* **Heat exchanger design handbook**. EUA: Hemisphere, 1983.

SHAH, R. K. Classification of heat exchangers. In: KAKAÇ, S.; BERGLES, A. E.; MAYINGER, F. **Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals and Design**. Washington, D.C.: Hemisphere, 1981. p. 9-46.

SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. São Paulo: [s. n.], 2002.

STOECKER, W.; JONES, J. **Refrigeração e Ar Condicionado**. Tradução: Jabardo, José. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

TARAWNEH, M. Two phase frictional pressure drop of carbon dioxide in horizontal micro tubes. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, [s. l.], ano 2013, v. 7, n. 5, 2013.

TARRAD, A. H. Perspective performance evaluation technique for a cascade heat pump plant functions at low temperature heat source. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, [S. l.], v. 2, n. 2, 5 jun. 2017. DOI 10.11648/i.ijeee.20170202.11. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/317380919\\_Perspective\\_Performance\\_Evaluation\\_Technique\\_for\\_a\\_Cascade\\_Heat\\_Pump\\_Plant\\_Functions\\_at\\_Low\\_Temperature\\_Heat\\_Source](https://www.researchgate.net/publication/317380919_Perspective_Performance_Evaluation_Technique_for_a_Cascade_Heat_Pump_Plant_Functions_at_Low_Temperature_Heat_Source). Acesso em: 7 set. 2019.

TEMA (25 North Broadway Tarrytown, New York 10591). **Tubular Exchanger Manufacturers Association**. New York, NY, EUA, 2007.

THOME, J. R., **Engineering Data Book III**, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Switzerland, 2004.

TURGUT, M.; TURGUT, O. Comparative investigation and multi objective design optimization of R744/R717, R744/R134a and R744/R1234yf cascade refrigeration systems. **Heat and Mass Transfer**, [s. l.], 24 jul. 2018.

VENTURINI, O.; PIRANI, M. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2005.

## ANEXO A – TEMA TABELA RCB-2.21

TABLE RCB-2.21

O.D. In. (mm)	BARE TUBE DIAMETERS AND GAGES		
	Copper and Copper Alloys	Carbon Steel, Aluminum and Aluminum Alloys	Other Alloys
	B.W.G.	B.W.G.	B.W.G.
1/4 (6.4)	27	-	27
	24	-	24
	22	-	22
3/8 (9.5)	22	-	22
	20	-	20
	18	-	18
1/2 (12.7)	20	-	20
	18	-	18
5/8 (15.9)	20	18	20
	18	16	18
	16	14	16
3/4 (19.1)	20	16	18
	18	14	16
	16	12	14
7/8 (22.2)	18	14	16
	16	12	14
	14	10	12
	12	-	-
1 (25.4)	18	14	16
	16	12	14
	14	-	12
1-1/4 (31.8)	16	14	14
	14	12	12
1-1/2 (38.1)	16	14	14
	14	12	12
2 (50.8)	14	14	14
	12	12	12

## Notes:

1. Wall thickness shall be specified as either minimum or average.
2. Characteristics of tubing are shown in Tables D-7 and D-7M.

## ANEXO B – TEMA TABELA RGP-T-2.4

### RGP-T-2.4 DESIGN FOULING RESISTANCES (HR FT<sup>2</sup> °F/BTU)

The purchaser should attempt to select an optimal fouling resistance that will result in a minimum sum of fixed, shutdown and cleaning costs. The following tabulated values of fouling resistances allow for oversizing the heat exchanger so that it will meet performance requirements with reasonable intervals between shutdowns and cleaning. These values do not recognize the time related behavior of fouling with regard to specific design and operational characteristics of particular heat exchangers.

#### Fouling Resistances for Industrial Fluids

Oils:	
Fuel Oil #2	0.002
Fuel Oil #6	0.005
Transformer Oil	0.001
Engine Lube Oil	0.001
Quench Oil	0.004
Gases And Vapors:	
Manufactured Gas	0.010
Engine Exhaust Gas	0.010
Steam (Non-Oil Bearing)	0.0005
Exhaust Steam (Oil Bearing)	0.0015-0.002
Refrigerant Vapors (Oil Bearing)	0.002
Compressed Air	0.001
Ammonia Vapor	0.001
CO <sub>2</sub> Vapor	0.001
Chlorine Vapor	0.002
Coal Flue Gas	0.010
Natural Gas Flue Gas	0.005
Liquids:	
Molten Heat Transfer Salts	0.0005
Refrigerant Liquids	0.001
Hydraulic Fluid	0.001
Industrial Organic Heat Transfer Media	0.002
Ammonia Liquid	0.001
Ammonia Liquid (Oil Bearing)	0.003
Calcium Chloride Solutions	0.003
Sodium Chloride Solutions	0.003
CO <sub>2</sub> Liquid	0.001
Chlorine Liquid	0.002
Methanol Solutions	0.002
Ethanol Solutions	0.002
Ethylene Glycol Solutions	0.002

## ANEXO C – ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS TEMA

### SECTION 9

### GENERAL INFORMATION

TABLE D-4 (continued)

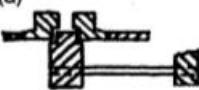
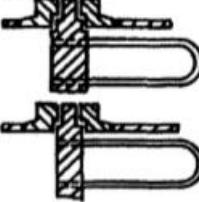
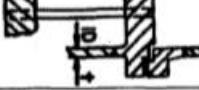
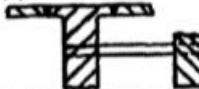
INTERNATIONAL MATERIAL SPECIFICATIONS									
Nominal Composition EN / DIN	USA ASME	UNI Number	U.K. BS	GERMANY DIN	JAPAN JIS	CHINA GB	EUROPE EN	FRANCE AFNOR	ITALY UNI
Numerical Designator  304 S.S. Smis or Weld Pipe (18 Cr-8 Ni) ENDIN 1.4301	SA-312 TP04	S30403	BS 3605 (CFS - Smis) (LWHT - Wld) Grade 801 304 S 18 304 S 25 304 S 31 EN58E	DIN 2462 5 CrNi 18 9 DIN 17458/57 (38-Smis/37-Wld) 5 CrNi 18 10 SEW 680 5 CrNi 18 10	JIS G 3459 SUS 304TP 5 CrNi 18 9 5 CrNi 18 10 SEW 680 5 CrNi 18 10	0Cr18Ni9 1Cr18Ni9			
304 S.S. Smis Tube (18 Cr-8 Ni) ENDIN 1.4301	SA-213 TP04	S30400	BS 3059 304S1	5CrNi189 DIN 17458 5 CrNi 18 10 SEW 680 5CrNi1810	JIS G 3463 SUS 304TB-SC 5CrNi189 DIN 17458 5 CrNi 18 10 SEW 680 5CrNi1810	GB 5310 0Cr18Ni9 1Cr18Ni9	NFA 49-217 TU6CN18-09	UNI 6904 X 5 CrNi 18 10	
304 S.S. Weld Tube (18 Cr-8 Ni) ENDIN 1.4301	SA-249 TP04	S30400	BS 3605 (LWHT) 304 S 31	DIN 2465 5 CrNi 18 9 BS 3606 (CFS) 304 S 31	JIS G 3463 SUS 304 TB-AC 0Cr18Ni9				
304L S.S. Plate (18 Cr-8 Ni) ENDIN 1.4306	SA-240-304L	S30403	BS 1501 304 S 11 304 S 12 304 S 14	DIN 17440 2 CrNi 18 9 S CrNi 19 11	JIS G 4304 SUS 304L 0Cr19Ni10 2 CrNi 19 11		NFA 36-209 2 CN 18.10 2 CrNi 19 11	UNI 7500 X 2 CrNi 18 11 UNI 7660 X 2 CrNi 18 11	

## ANEXO D – ESPELHOS

## APPENDIX A

## TUBESHEETS

TABLE A.131

	TUBESHEET THICKNESS FOR BENDING			$S = \text{Code allowable stress}$ in tension, psi (kPa), for tubesheet material at design metal temperature. (See Paragraph RCB- 1.42.)
	$T = \frac{FG}{3} \sqrt{\frac{P}{\eta S}}$	Note: Must be calculated for shell side or tube side pressure, whichever is controlling.		
	For Tube pattern □◊, $\eta = 1 - \left[ \frac{0.785}{(\text{Pitch}/\text{Tube OD})^2} \right]$ For integrally finned tubes, the OD of the tube in the tubesheet shall be used	For Tube pattern ▷△, $\eta = 1 - \left[ \frac{0.907}{(\text{Pitch}/\text{Tube OD})^2} \right]$ For integrally finned tubes, the OD of the tube in the tubesheet shall be used		
	<i>F</i>	<i>G</i>		<i>P</i>
		Shell Side Pressure	Tube Side Pressure	
(a)		1.0	Gasket <i>G</i> shell side  See note 1	Gasket <i>G</i> tube side  See note 1  Design pressure, psi (kPa), shell side or tube side, per Paragraph A.131 corrected for vacuum when present on opposite side or differential pressure when specified by customer.
(b)		1.25	Gasket <i>G</i> shell side  See note 1	Gasket <i>G</i> tube side  See note 1  Design pressure, psi (kPa), shell side or tube side, per Paragraph A.131 corrected for vacuum when present on opposite side or differential pressure when specified by customer.
(c)		See Figure A.131 $F = \left[ 17 - 100 \left( \frac{t}{ID} \right) \right] / 15$	Gasket <i>G</i> shell side  See note 1	Channel ID  Design pressure, psi (kPa), shell side or tube side, per A.131 corrected for vacuum when present on opposite side or differential pressure when specified by customer.
(d)		Note: $F_{\text{Max}} = 1.0$ $F_{\text{Min}} = 0.8$	Shell ID or port inside diameter for kettle type exchangers	Gasket <i>G</i> (shell ID if fixed tubesheet type unit)  See note 1  Design pressure, psi (kPa), shell side or tube side, per A.131 corrected for vacuum when present on opposite side or differential pressure when specified by customer, or fixed tubesheet type units, as defined in Paragraphs A.153 thru A.155
(e)			Shell ID or port inside diameter for kettle type exchangers	Channel ID (shell ID if fixed tubesheet type unit)

## ANEXO E – DATASHEET DE TROCADOR A PLACAS

<b>DUTY REQUIREMENTS</b>		<b>LADO 1</b>	<b>LADO 2</b>
Fluido	R404A	R744 (Carbon Dioxide)	
Tipo de Fluxo			
O circuito		I interno	E externo
Carga Térmica	kW	0.507	28.33
Título do Vapor de Entrada		1.000	
Título do Vapor de Saída		-12.39	85.00
Temperatura de entrada	°C	-15.00	
Temperatura de Evaporação (orvalho)	°C	0.00	
Superaquecimento	K		-5.00
Temperatura de Condensação (orvalho)	°C		3.00
Subresfriamento	K		-8.02
Temperatura de saída	°C	-15.00	
Vazão	kg/h	1154	285.0
• Vapor de Entrada	kg/h	585.0	
Fluido Vaporizado	kg/h	569.5	
Fluido Condensado	kg/h		285.0

<b>Trocador de Calor a Placas</b>		<b>LADO 1</b>	<b>LADO 2</b>
Área de Transferência Térmica	m²	2.88	
Fluxo de Calor	kW/m²	9.8	
Coeficiente de transferência de calor (calculado/solicitado)	W/m², °C	963/955	
Perda de carga - Total*	kPa	40.8	1.82
- do Bocal	kPa	-3.46	-0.0447
Perda de Carga nos Distribuidores	kPa	414 - 636	
Pressão de Operação - Saída	kPa	364	3050
Número de canais por passagem		24	25
Número de placas		50	
Excesso de Área	%	1	
Diâmetro do Bocal (cima/baixo)	mm	33.0/20.0	33.0/33.0
Diâmetro recomendado da conexão de entrada	mm		
Diâmetro recomendado da conexão de saída	mm		
Saída Veloc. bocal	m/s	20.1	
Veloc. bocal	m/s		1.88
Velocidade no Canal	m/s	3.17	0.282
Maior diferença de temperatura na parede	K	0.40	
Mín./Máx. temperatura na parede	°C	-12.03/17.86	-11.83/18.26

\*Excluindo perda de carga nas conexões.

<b>REQUISITOS DE OPERAÇÃO</b>		<b>LADO 1</b>	<b>LADO 2</b>
Temperatura de Referência	°C	-13.54	-5.00
Líquido • Viscosidade Dinâmica	cP	0.216	0.108
• Densidade	kg/m³	1201	956.2
• Capacidade Térmica	J/kg, °C	1.333	2.409
• Conduktividade Térmica	W/m, °C	0.07858	0.1165
Vapor • Viscosidade Dinâmica	cP	0.0105	0.0143
• Densidade	kg/m³	19.72	83.37
• Capacidade Térmica	J/kg, °C	0.9250	2.409
• Conduktividade Térmica	W/m, °C	0.01158	0.01817

<b>TOTAIS</b>		<b>LADO 1</b>	<b>LADO 2</b>
Peso Total (sem conexões)*	kg	10.29 - 15.27	
Volume de Retenção (Interno O circuito)	dm³	2.57	
Volume de Retenção (Externo O circuito)	dm³	2.68	
Tamanho da Porta F1/P1	mm	33	
Tamanho da Porta F2/P2	mm	33	
Tamanho da Porta F3/P3	mm	20	
Tamanho da Porta F4/P4	mm	33	
Pegada de Carbono	kg	72.33	

\*O peso depende do produto selecionado.

<b>DIMENSÕES</b>		A	mm	526 ±2
FRONT	BACK	B	mm	119 ±1
F1	F2	C	mm	470 ±1
F3	F4	D	mm	63 ±1
		E	mm	27 (opt. 45) ±1
		F	mm	116 - 124 ±2.5%
		G	mm	2 - 6 ±1
		O	mm	4
		R	mm	23

## ANEXO F – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE DESSUPERAQUECIMENTO

$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{wi}$	$m_h$	$N$	$d_e$	$t_w$	$d_i$	$G_r$	$\mu_b$	$\mu_{wi}$	$Pr_b$	$T_{rb}$	$f_b$	$Nu_0$	$F_a$	$Nu_b$	$k_{-744}$	$h_t$
K	K	K	kg/s	tubos	mm	mm	m	kg/m <sup>2</sup> .s	Pa.s	Pa.s	-	K	-	-	-	W/m.K	W/m <sup>2</sup> .K	
359	258	308,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,83E-05	-	0,81982	359	0,029067	40,48283	1,056093	42,75364	0,023158	200,8294
358	258	308	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,83E-05	-	0,82085	358	0,029048	40,58996	1,055649	42,84876	0,023086	200,6504
357	258	307,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,82E-05	-	0,82189	357	0,029028	40,69602	1,055204	42,94259	0,023014	200,4626
356	258	307	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,82E-05	-	0,82296	356	0,029008	40,80507	1,054756	43,03941	0,022942	200,286
355	258	306,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,81E-05	-	0,82404	355	0,028989	40,91483	1,054307	43,13681	0,022871	200,118
354	258	306	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,81E-05	-	0,82514	354	0,028969	41,02376	1,053856	43,23316	0,022799	199,9336
353	258	305,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,8E-05	-	0,82627	353	0,028949	41,13573	1,053404	43,33253	0,022728	199,7691
352	258	305	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,8E-05	-	0,82741	352	0,02893	41,24843	1,052949	43,4323	0,022657	199,6045
351	258	304,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,79E-05	-	0,82857	351	0,02891	41,36212	1,052499	43,53333	0,022586	199,441
350	258	304	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,79E-05	-	0,82976	350	0,02888	41,47522	1,052035	43,63334	0,022516	199,2797
349	258	303,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,78E-05	-	0,83096	349	0,02887	41,5909	1,051574	43,73593	0,022445	199,1182
348	258	303	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,78E-05	-	0,8322	348	0,02885	41,70811	1,051112	43,83991	0,022375	198,9692
347	258	302,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,78E-05	-	0,83345	347	0,02883	41,82607	1,050649	43,9451	0,022304	198,811
346	258	302	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,77E-05	-	0,83473	346	0,02881	41,94532	1,050183	44,05025	0,022234	198,664
345	258	301,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,77E-05	-	0,83603	345	0,02879	42,06559	1,049715	44,15689	0,022165	198,5269
344	258	301	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,76E-05	-	0,83736	344	0,02877	42,18716	1,049245	44,26469	0,022095	198,383
343	258	300,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,76E-05	-	0,83871	343	0,02875	42,30977	1,048774	44,37338	0,022026	198,2491
342	258	300	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,75E-05	-	0,84009	342	0,028729	42,43368	1,0483	44,48324	0,021957	198,1174
341	258	299,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,75E-05	-	0,8415	341	0,028709	42,5589	1,047825	44,59428	0,021888	197,9877
340	258	299	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,74E-05	-	0,84294	340	0,028688	42,6874	1,047347	44,70854	0,021819	197,8693
339	258	298,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,74E-05	-	0,8444	339	0,028668	42,81502	1,046868	44,82161	0,02175	197,7427
338	258	298	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,73E-05	-	0,84559	338	0,028648	42,99423	1,046387	44,93627	0,021682	197,6284
337	258	297,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,73E-05	-	0,84743	337	0,028628	43,07479	1,045903	45,05205	0,021614	197,5163
336	258	297	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,72E-05	-	0,84899	336	0,028607	43,20869	1,045418	45,17112	0,021546	197,4152
335	258	296,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,72E-05	-	0,85058	335	0,028586	43,34196	1,04493	45,28932	0,021479	197,3163
334	258	296	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,72E-05	-	0,85221	334	0,028566	43,47685	1,044441	45,40898	0,021412	197,2205
333	258	295,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,71E-05	-	0,85388	333	0,028545	43,61541	1,043949	45,53225	0,021345	197,1371
332	258	295	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,71E-05	-	0,85558	332	0,028524	43,75332	1,043455	45,65463	0,021278	197,0465
331	258	294,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,71E-05	-	0,85732	331	0,028503	43,89494	1,042959	45,78064	0,021212	196,9775
330	258	294	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,7E-05	-	0,85891	330	0,028483	43,06317	1,042461	45,90602	0,021145	196,8939
329	258	293,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,69E-05	-	0,86092	329	0,028462	44,18114	1,041961	46,03504	0,02108	196,8395
328	258	293	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,69E-05	-	0,86278	328	0,028441	44,32572	1,041459	46,16343	0,021014	196,7704
327	258	292,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,68E-05	-	0,86468	327	0,02842	44,47409	1,040955	46,29552	0,020949	196,7231
326	258	292	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,68E-05	-	0,86664	326	0,028399	44,6247	1,040448	46,42969	0,020884	196,6811
325	258	291,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,67E-05	-	0,86863	325	0,028378	44,77464	1,03994	46,56292	0,020819	196,6315
324	258	291	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,67E-05	-	0,87068	324	0,028357	44,92898	1,039429	46,70045	0,020755	196,606
323	258	290,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,66E-05	-	0,87278	323	0,028335	45,08528	1,038916	46,8398	0,020691	196,5847
322	258	290	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,66E-05	-	0,87493	322	0,028314	45,42362	1,0384	46,98098	0,020628	196,5769
321	258	289,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,65E-05	-	0,87713	321	0,028293	45,4018	1,037883	47,12175	0,020565	196,5636
320	258	289	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,65E-05	-	0,87939	320	0,028272	45,56445	1,037363	47,26688	0,020502	196,565
319	258	288,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,65E-05	-	0,88171	319	0,028285	45,75242	1,036841	47,41413	0,02044	196,5811
318	258	288	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,64E-05	-	0,88409	318	0,028229	45,89671	1,036317	47,56352	0,020378	196,6023
317	258	287,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,64E-05	-	0,88653	317	0,028207	46,06632	1,035797	47,71504	0,020316	196,6285
316	258	287	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,63E-05	-	0,88904	316	0,028186	46,23855	1,032038	47,86897	0,020255	196,6706
315	258	286,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,63E-05	-	0,89162	315	0,028164	46,41339	1,03473	48,02532	0,020195	196,7285
314	258	286	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,62E-05	-	0,89426	314	0,028143	46,5906	1,034196	48,18382	0,020135	196,7913
313	258	285,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,62E-05	-	0,89698	313	0,028121	46,77071	1,030394	49,37091	0,01973	197,5838
312	258	285	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,61E-05	-	0,898978	312	0,028099	46,95374	1,033122	48,50893	0,020016	196,9482
311	258	284,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	1,61E-05	-	0,90266	311	0,028078	47,1397	1,032581	48,67555	0,019958	197,0521
310	258																	

**ANEXO G – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 1)**

$T_{\text{cond}}$	$T_{\text{wp}}$	$T_{\text{ui}}$	$\eta_{\text{h}}$	$N$	$d_e$	$d_i$	$G_r$	$\mu_0$	$x$	$q$	$\rho_p$	$\rho_t$	$\rho_s$	$\mu_t$	$\mu_s$	$P$	$P_{\text{corr}}$	$P_{\text{red}}$	$R_{\ell}$	$C_{\ell}$	$p_{\ell}$	$k_{\ell}$	$k_s$	$k_{\text{c}}$	$k_{\text{p}} = 744$	$N^{\text{h}}_{\ell, \text{tp}}$	$h_{\ell}$
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.41E-05	0.995	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.019287	5039,07	5039,66	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.5E-05	0.99	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.019287	5156,45	2548,39	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.6E-05	0.98	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.020731	3105,558	13059,14	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.69E-05	0.97	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.021694	2040,521	897,965	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.79E-05	0.96	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.022656	1513,228	695,983	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.88E-05	0.95	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.023616	1,199,33	748,638	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	1.98E-05	0.94	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.024581	912,0697	496,512	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.07E-05	0.93	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.025544	844,3425	4374,787	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.17E-05	0.92	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.026506	734,0186	396,477	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.27E-05	0.91	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.027469	648,5274	3613,45	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.36E-05	0.9	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.028431	580,3558	3346,923	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.46E-05	0.89	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.029394	524,7396	3128,634	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.55E-05	0.88	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.030356	478,5121	296,439	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.55E-05	0.87	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.031319	429,4873	2791,95	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.74E-05	0.86	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.032522	406,1076	2659,188	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.84E-05	0.85	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.033244	377,2342	2543,775	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	2.94E-05	0.84	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.034207	352,0135	244,434	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.04E-05	0.83	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.035169	329,7952	232,663	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.14E-05	0.82	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.036132	310,074	227,517	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.24E-05	0.81	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.037094	292,4519	220,464	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.34E-05	0.8	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.038057	276,6108	2135,278	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.44E-05	0.79	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.039019	262,2938	207,597	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.54E-05	0.78	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.039802	249,291	201,728	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.64E-05	0.77	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.040944	237,4291	197,886	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.74E-05	0.76	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.041907	226,5641	192,885	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.79E-05	0.75	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.04287	216,5757	183,259	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.88E-05	0.74	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.043832	207,3599	183,612	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	3.98E-05	0.73	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.044795	198,8316	180,609	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	4.08E-05	0.72	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.045757	190,9158	177,959	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	4.18E-05	0.71	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.046772	183,5484	173,416	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	4.28E-05	0.7	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.047682	176,674	170,763	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	4.38E-05	0.69	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.048645	164,2441	167,814	
268	258	263	0.079167	84	6.35	0.71	0.00493	49.37184	4.48E-05	0.68	9.80665	83.394	956.13	0.000109	1.41E-05	3047/03	7372	0.413325	2226,52	2408,8	2,288,632	0.11506	0.018806	0.049607	154,2168	165,404	
268	258</																										

## ANEXO H – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 2)

$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{wi}$	$m_h$	$N$	$d_e$	$t_w$	$d_i$	$G_r$	$\mu_b$	$x$	$g$	$\rho_b$	$\rho_t$	$\mu_t$	$P$	$P_{crit}$	$P_{red}$	$R_{el}$	$G_P$	$P_{ti}$	$k_v$	$k_r - 744$	$N_{tip}$	$h_t$	
K	K	K	kg/s	tubos	mm	mm	kg/m <sup>3</sup>	Pa.s	-	mm <sup>2</sup> /s	kg/m <sup>3</sup>	Pa.s	Pa.s	Pa.s	kPa	-	1/k <sub>v</sub> , K	-	W/m.K	W/m.K	-	W/m <sup>2</sup> .K	-		
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,17E-05	0,5	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,06933	96,79158	134,108
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,27E-05	0,49	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,067896	94,42612	130,028
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,36E-05	0,48	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,068858	92,15005	1287,074
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,46E-05	0,47	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,068821	89,93841	1274,047
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,55E-05	0,46	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,070783	87,84665	1261,27
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,65E-05	0,45	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,071746	85,81054	1248,791
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,74E-05	0,44	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,072708	83,84621	1236,574
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,84E-05	0,43	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,073671	81,95026	1224,009
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	6,93E-05	0,42	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,074633	80,11877	1212,386
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,02E-05	0,41	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,075556	78,34928	1201,396
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,12E-05	0,4	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,076558	76,65876	1190,13
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,22E-05	0,39	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,077521	74,98457	1179,082
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,31E-05	0,38	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,078483	73,38429	1168,246
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,41E-05	0,37	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,079446	71,83567	1157,618
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,5E-05	0,36	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,080409	70,33663	1147,194
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,6E-05	0,35	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,081371	68,88524	1136,971
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,72E-05	0,34	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,082334	67,84971	1126,947
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,82E-05	0,33	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,083296	66,11837	1117,721
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	7,92E-05	0,32	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,084259	67,7997	1107,493
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8E-05	0,31	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,085221	63,52226	1098,062
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,07E-05	0,3	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,086806	61,88441	1088,83
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,17E-05	0,29	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,088109	59,93443	1079,98
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,27E-05	0,28	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,0898697	58,79942	1062,342
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,37E-05	0,27	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,0904847	52,758	1014,994
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,47E-05	0,26	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,090597	56,6545	1045,712
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,57E-05	0,24	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,091599	54,82662	1037,712
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,67E-05	0,23	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,092922	54,64321	1029,26
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,77E-05	0,22	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,093884	53,6852	1022,353
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,87E-05	0,21	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,0948697	52,139	1047,388
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	8,97E-05	0,2	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,095435	50,15435	1044,703
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	9,07E-05	0,19	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,1036397	49,5188	1038,1459
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	9,17E-05	0,18	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,10736	42,75348	931,0344
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	9,27E-05	0,17	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,107322	42,01002	923,0464
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	9,37E-05	0,16	9,80665	83,394	956,13	0,000109	1,41E-05	3047,03	7372	0,413325	2226,52	2,288632	0,11506	0,018806	0,107477	44,7388	950,9262
268	258	263	0,079167	84	6,35	0,71	0,0093	49,37184	9,47E-05	0,															

## **ANEXO I – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO INTERNO LOCAL NA ZONA DE SUBRESFRIAMENTO**

$T_{cond}$	$T_{evap}$	$T_{wi}$	$\dot{m}_h$	$N$	$d_e$	$t_w$	$d_i$	$G_r$	$\mu_b$	$\mu_{wi}$	$P_{rb}$	$T_{rb}$	$f_b$	$Nu_0$	$F_a$	$Nu_b$	$k_{R-744}$	$h_i$
K	K	K	kg/s	tubos	mm	mm	mm	kg/m <sup>2</sup> s	Pa.s	Pa.s	-	K	-	-	-	W/m.K	W/m <sup>2</sup> .K	
267	258	262,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000112	0,000121	2,277	267	0,050826	9,804201	0,988775	9,694145	0,1166	229,2774
266	258	262	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000114	0,000122	2,2689	266	0,051158	9,5133773	0,990099	9,419573	0,1179	225,2673
265	258	261,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000116	0,000123	2,2622	265	0,05149	9,232533	0,99139	9,15304	0,1192	221,3068
264	258	261	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000118	0,000124	2,2568	264	0,05182	8,959883	0,992661	8,894125	0,1205	217,3919
263	258	260,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000112	0,000125	2,2526	263	0,052153	8,692817	0,993935	8,640097	0,12178	213,4262
262	258	260	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000122	0,000126	2,2495	262	0,052484	8,433393	0,995168	8,392641	0,12306	209,4926
261	258	259,5	0,079167	84	6,35	0,71	0,00493	49,37184	0,000124	0,000128	2,2475	261	0,052815	8,180076	0,996392	8,150566	0,12433	205,5497

## **ANEXO J – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 1)**

## **ANEXO K – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 2)**

## **ANEXO L – CÁLCULO DO COEFICIENTE CONVECTIVO EXTERNO LOCAL (PARTE 3)**

## ANEXO M – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 1)

$Q_{local}$	$d_e$	$t_w$	$A_e/A_i$	$A_i/A_m$	$k_w$	$t_w/k_w$	$h_b = h_s$	$h_i$	$R_{f,s}$	$R_{f,t}$	$U$	MTD	$A_e$	L
W	mm	mm	-	-	W/m.K	-	W/m <sup>2</sup> .K	W/m <sup>2</sup> .K	m <sup>2</sup> .K/W	m <sup>2</sup> .K/W	W/m <sup>2</sup> .K	°C	m <sup>2</sup>	m
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	200,8294	0,000176	0,000176	137,0469	100,4992	0,005978	0,003567
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	200,6504	0,000176	0,000176	136,9396	99,49917	0,006043	0,003606
81,54167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	200,4626	0,000176	0,000176	136,8269	98,49917	0,00605	0,003611
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	200,286	0,000176	0,000176	136,7209	97,49917	0,006176	0,003686
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	200,118	0,000176	0,000176	136,6201	96,49917	0,006245	0,003727
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,9336	0,000176	0,000176	136,5094	95,49917	0,006376	0,003805
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,7691	0,000176	0,000176	136,4106	94,49917	0,006387	0,003812
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,6045	0,000176	0,000176	136,3117	93,49917	0,00646	0,003855
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,441	0,000176	0,000176	136,2135	92,49917	0,006535	0,0039
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,2797	0,000176	0,000176	136,1166	91,49917	0,006674	0,003983
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	199,1182	0,000176	0,000176	136,0195	90,49917	0,006753	0,00403
82,33333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,9692	0,000176	0,000176	135,9299	89,49917	0,006768	0,004039
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,811	0,000176	0,000176	135,8348	88,49917	0,006915	0,004126
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,664	0,000176	0,000176	135,7464	87,49917	0,006998	0,004176
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,5269	0,000176	0,000176	135,5774	85,49917	0,007171	0,004279
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,383	0,000176	0,000176	135,4969	84,49917	0,00726	0,004333
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,2491	0,000176	0,000176	135,4176	83,49917	0,007351	0,004387
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,9877	0,000176	0,000176	135,3396	82,49917	0,007516	0,004485
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,8693	0,000176	0,000176	135,2683	81,49917	0,007612	0,004543
83,125	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,7427	0,000176	0,000176	135,1921	80,49917	0,007638	0,004558
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,6284	0,000176	0,000176	135,1233	79,49917	0,007812	0,004662
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,5163	0,000176	0,000176	135,0557	78,49917	0,007915	0,004724
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,4152	0,000176	0,000176	134,9949	77,49917	0,008021	0,004787
84,70833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,3163	0,000176	0,000176	134,9353	76,49917	0,008206	0,004897
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,2205	0,000176	0,000176	134,8776	75,49917	0,008241	0,004918
84,70833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,1371	0,000176	0,000176	134,8274	74,49917	0,008433	0,005033
83,91667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,0465	0,000176	0,000176	134,7728	73,49917	0,008472	0,005055
84,70833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,9775	0,000176	0,000176	134,7312	72,49917	0,008672	0,005175
85,5	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,893	0,000176	0,000176	134,6803	71,49917	0,008879	0,005299
84,70833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,8395	0,000176	0,000176	134,6468	70,49917	0,008924	0,005325
85,5	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,7704	0,000176	0,000176	134,6064	69,49917	0,009139	0,005454
84,70833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,7231	0,000176	0,000176	134,5779	68,49917	0,009189	0,005484
85,5	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,6811	0,000176	0,000176	134,5525	67,49917	0,009414	0,005618
85,5	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,6315	0,000176	0,000176	134,5227	66,49917	0,009558	0,005704
86,29167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,606	0,000176	0,000176	134,5073	65,49917	0,009795	0,005845
86,29167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,5847	0,000176	0,000176	134,4944	64,49917	0,009947	0,005936
85,5	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,5769	0,000176	0,000176	134,4897	63,49917	0,010012	0,005975
87,08333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,5636	0,000176	0,000176	134,4817	62,49917	0,010361	0,006183
86,29167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,565	0,000176	0,000176	134,4826	61,49917	0,010434	0,006226
87,08333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,5811	0,000176	0,000176	134,4923	60,49917	0,010703	0,006387
87,08333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,6023	0,000176	0,000176	134,5051	59,49917	0,010881	0,006494
87,08333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,6285	0,000176	0,000176	134,5209	58,49917	0,011066	0,006604
87,08333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,6706	0,000176	0,000176	134,5462	57,49917	0,011256	0,006717
87,875	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,7285	0,000176	0,000176	134,5811	56,49917	0,011557	0,006897
87,875	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,7913	0,000176	0,000176	134,6119	55,49917	0,011762	0,007019
88,66667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,8613	0,000176	0,000176	134,6612	54,49917	0,012082	0,00721
88,66667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	196,9482	0,000176	0,000176	134,7136	53,49917	0,012303	0,007342
88,66667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,0521	0,000176	0,000176	134,7763	52,49917	0,012531	0,007478
89,45833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,163	0,000176	0,000176	134,8429	51,49917	0,012882	0,007688
89,45833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,2919	0,000176	0,000176	134,9206	50,49917	0,01313	0,007835
89,45833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,4277	0,000176	0,000176	135,0024	49,49917	0,013387	0,007989
90,25	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,5838	0,000176	0,000176	135,0964	48,49917	0,013774	0,00822
90,25	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,7578	0,000176	0,000176	135,2012	47,49917	0,014053	0,008386
91,04167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	197,9409	0,000176	0,000176	135,3114	46,49917	0,014477	0,008635
91,04167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	198,1451	0,000176	0,000176	135,4343	45,49917	0,014774	0,008817
91,83333	6,35</													

## ANEXO N – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 2)

$Q_{local}$	$d_e$	$t_w$	$A_e/A_i$	$A_i/A_m$	$k_w$	$t_w/k_w$	$h_b = h_s$	$h_i$	$R_{f,s}$	$R_{f,t}$	$U$	MTD	$A_e$	L
W	mm	mm	-	-	W/m.K	-	W/m <sup>2</sup> .K	W/m <sup>2</sup> .K	m <sup>2</sup> .K/W	m <sup>2</sup> .K/W	W/m <sup>2</sup> .K	°C	m <sup>2</sup>	m
97,375	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	202,3692	0,000176	0,000176	137,9697	33,49917	0,021068	0,012573
97,375	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	202,9182	0,000176	0,000176	138,2983	32,49917	0,021665	0,012929
98,95833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	203,5116	0,000176	0,000176	138,6532	31,49917	0,022658	0,013521
98,95833	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	204,1297	0,000176	0,000176	139,0226	30,49917	0,023339	0,013928
100,5417	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	204,804	0,000176	0,000176	139,4253	29,49917	0,024445	0,014588
101,3333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	205,5261	0,000176	0,000176	139,8561	28,49917	0,025424	0,015172
101,3333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	206,2773	0,000176	0,000176	140,304	27,49917	0,026264	0,015673
102,9167	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	207,1002	0,000176	0,000176	140,7941	26,49917	0,027585	0,016461
103,7083	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	207,9837	0,000176	0,000176	141,3197	25,49917	0,02878	0,017174
105,2917	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	209,9545	0,000176	0,000176	142,4903	23,49917	0,031445	0,018765
107,6667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	211,0404	0,000176	0,000176	143,1341	22,49917	0,033433	0,019951
107,6667	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	212,2197	0,000176	0,000176	143,8323	21,49917	0,034818	0,020778
110,0417	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	213,4805	0,000176	0,000176	144,5778	20,49917	0,03713	0,022157
110,8333	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	214,8331	0,000176	0,000176	145,3762	19,49917	0,039099	0,023332
113,2083	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	216,3086	0,000176	0,000176	146,2457	18,49917	0,041845	0,024971
114	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	217,8876	0,000176	0,000176	147,1744	17,49917	0,044264	0,026415
116,375	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	219,611	0,000176	0,000176	148,1862	16,49917	0,047598	0,028404
117,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	221,4786	0,000176	0,000176	149,2802	15,49917	0,050982	0,030424
119,5417	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	223,5132	0,000176	0,000176	150,4693	14,49917	0,054793	0,032698
122,7083	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	225,7355	0,000176	0,000176	151,7649	13,49917	0,059896	0,035743
124,2917	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	228,1631	0,000176	0,000176	153,1762	12,49917	0,064919	0,038741
128,25	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	230,8413	0,000176	0,000176	154,7284	11,49917	0,072081	0,043015
108,4583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	1960,181	233,7903	0,000176	0,000176	156,432	10,49917	0,066036	0,039408
108,4583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	50839,66	0,000176	0,000176	1121,613	10	0,00967	0,005771
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	25488,39	0,000176	0,000176	1090,784	10	0,017782	0,010611
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	13059,14	0,000176	0,000176	1036,411	10	0,018791	0,011214
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	8978,965	0,000176	0,000176	990,4052	10	0,019584	0,011687
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	6955,983	0,000176	0,000176	951,1067	10	0,020393	0,01217
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	5748,638	0,000176	0,000176	917,1818	10	0,021234	0,012671
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	4946,512	0,000176	0,000176	887,603	10	0,021852	0,01304
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	4374,787	0,000176	0,000176	861,5791	10	0,022512	0,013434
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	3946,477	0,000176	0,000176	838,495	10	0,023226	0,01386
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	3613,45	0,000176	0,000176	817,8669	10	0,023715	0,014152
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	3346,923	0,000176	0,000176	799,3103	10	0,024266	0,014481
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	3128,634	0,000176	0,000176	782,5158	10	0,024888	0,014852
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2946,439	0,000176	0,000176	767,2321	10	0,02528	0,015086
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2791,95	0,000176	0,000176	753,2527	10	0,025749	0,015366
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2659,188	0,000176	0,000176	740,4071	10	0,026196	0,015633
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2543,775	0,000176	0,000176	728,5525	10	0,026731	0,015952
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2442,434	0,000176	0,000176	717,5692	10	0,02703	0,01613
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2352,663	0,000176	0,000176	707,3555	10	0,02742	0,016363
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2272,517	0,000176	0,000176	697,8248	10	0,027908	0,016654
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2200,464	0,000176	0,000176	688,9028	10	0,028155	0,016801
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2135,278	0,000176	0,000176	680,5253	10	0,028501	0,017008
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2075,97	0,000176	0,000176	672,6369	10	0,028953	0,017278
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	2021,728	0,000176	0,000176	665,1889	10	0,029158	0,0174
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1971,886	0,000176	0,000176	658,1389	10	0,029471	0,017587
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1925,885	0,000176	0,000176	651,4497	10	0,029773	0,017767
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1883,259	0,000176	0,000176	645,0882	10	0,030119	0,018016
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1843,612	0,000176	0,000176	639,0251	10	0,030352	0,018113
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1806,609	0,000176	0,000176	633,2345	10	0,03063	0,018279
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1771,959	0,000176	0,000176	627,6932	10	0,031026	0,018515
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1739,416	0,000176	0,000176	622,3802	10	0,031164	0,018597
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1708,763	0,000176	0,000176	617,277	10	0,031422	0,018751
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1679,814	0,000176	0,000176	612,3666	10	0,031803	0,018979
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1652,404	0,000176	0,000176	607,6339	10	0,03192	0,019049
193,9583	6,35</													

## ANEXO O – CÁLCULO DOS PARÂMETROS TÉRMICOS LOCAIS (PARTE 3)

$Q_{local}$	$d_e$	$t_w$	$A_e/A_i$	$A_i/A_m$	$k_w$	$t_w/k_w$	$h_b = h_s$	$h_i$	$R_{f,s}$	$R_{f,t}$	$U$	MTD	$A_e$	L
W	mm	mm	-	-	W/m.K	-	W/m².K	W/m².K	m².K/W	m².K/W	W/m².K	°C	m²	m
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1420,898	0,000176	0,000176	564,1018	10	0,034384	0,020519
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1404,264	0,000176	0,000176	560,7056	10	0,034592	0,020643
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1388,143	0,000176	0,000176	557,3766	10	0,03494	0,020851
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1372,5	0,000176	0,000176	554,1103	10	0,035004	0,020889
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1357,303	0,000176	0,000176	550,9027	10	0,035207	0,02101
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1342,522	0,000176	0,000176	547,75	10	0,035555	0,021217
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1328,132	0,000176	0,000176	544,6488	10	0,035612	0,021251
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1314,108	0,000176	0,000176	541,5959	10	0,035812	0,021371
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1300,428	0,000176	0,000176	538,5884	10	0,036159	0,021578
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1287,074	0,000176	0,000176	535,6237	10	0,036212	0,02161
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1274,027	0,000176	0,000176	532,6995	10	0,03641	0,021728
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1261,27	0,000176	0,000176	529,8137	10	0,036609	0,021847
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1248,791	0,000176	0,000176	526,9643	10	0,036957	0,022054
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1236,574	0,000176	0,000176	524,1498	10	0,037004	0,022083
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1224,609	0,000176	0,000176	521,3688	10	0,037202	0,0222
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1212,886	0,000176	0,000176	518,62	10	0,037552	0,022409
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1201,396	0,000176	0,000176	515,9024	10	0,037596	0,022436
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1190,13	0,000176	0,000176	513,2154	10	0,037793	0,022553
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1179,082	0,000176	0,000176	510,5582	10	0,038145	0,022763
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1168,246	0,000176	0,000176	507,9307	10	0,038186	0,022788
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1157,618	0,000176	0,000176	505,3325	10	0,038382	0,022905
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1147,194	0,000176	0,000176	502,7639	10	0,038578	0,023022
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1136,971	0,000176	0,000176	500,2249	10	0,038932	0,023233
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1126,947	0,000176	0,000176	497,7162	10	0,03897	0,023255
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1117,121	0,000176	0,000176	495,2382	10	0,039165	0,023372
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1107,493	0,000176	0,000176	492,7919	10	0,03952	0,023584
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1098,062	0,000176	0,000176	490,3781	10	0,039553	0,023603
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1088,83	0,000176	0,000176	487,9981	10	0,039746	0,023719
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1079,798	0,000176	0,000176	485,6531	10	0,040101	0,02393
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1070,968	0,000176	0,000176	483,3445	10	0,040128	0,023947
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1062,342	0,000176	0,000176	481,0738	10	0,040318	0,02406
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1053,923	0,000176	0,000176	478,8425	10	0,040506	0,024172
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1045,712	0,000176	0,000176	476,6523	10	0,040858	0,024382
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1037,712	0,000176	0,000176	474,5047	10	0,040876	0,024393
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1029,926	0,000176	0,000176	472,4011	10	0,041058	0,024502
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1022,353	0,000176	0,000176	470,3429	10	0,041406	0,024709
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1014,994	0,000176	0,000176	468,3308	10	0,041415	0,024715
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1007,848	0,000176	0,000176	466,3656	10	0,041589	0,024819
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	1000,911	0,000176	0,000176	464,4447	10	0,041932	0,025023
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	994,1761	0,000176	0,000176	462,5742	10	0,04193	0,025022
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	987,6338	0,000176	0,000176	460,7451	10	0,042097	0,025121
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	981,2683	0,000176	0,000176	458,9561	10	0,042261	0,025219
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	975,0574	0,000176	0,000176	457,2016	10	0,042596	0,025419
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	968,9699	0,000176	0,000176	455,4734	10	0,042584	0,025412
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	962,9624	0,000176	0,000176	453,7595	10	0,042745	0,025508
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	956,9752	0,000176	0,000176	452,043	10	0,043082	0,02571
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	950,9262	0,000176	0,000176	450,3002	10	0,043073	0,025704
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	944,7023	0,000176	0,000176	448,498	10	0,043246	0,025807
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	938,1459	0,000176	0,000176	446,5895	10	0,043608	0,026024
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	931,0344	0,000176	0,000176	444,5076	10	0,043634	0,026039
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	923,0464	0,000176	0,000176	442,1546	10	0,043867	0,026178
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	913,7033	0,000176	0,000176	439,3825	10	0,044143	0,026343
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	902,2604	0,000176	0,000176	435,9579	10	0,044672	0,026658
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	887,4831	0,000176	0,000176	431,4865	10	0,044951	0,026825
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	867,1177	0,000176	0,000176	425,2323	10	0,045612	0,027219
194,75	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	836,3449	0,000176	0,000176	415,5739	10	0,046863	0,027966
193,9583	6,35	0,71	1,288032	0,437057	14,9	4,77E-05	2027,612	781,077	0,000176	0,000176	397,5693	10	0,048786	0,029113
225,625	6,35	0,71	1,288032	0,43										

## ANEXO P – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE DESSUPERAQUECIMENTO

$G_r$	$x$	$\rho_{r,inlet}$	$\rho_{r,outlet}$	$\rho_r$	$Re_{r,inlet}$	$Re_{r,outlet}$	$d_i$	$\mu_{r,inlet}$	$\mu_{r,outlet}$	$dZ$	$\Delta P_M$	$dP_r/dZ$	$\Delta P_{TS}$
kg/m <sup>2</sup> .s	-	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	-	m	Pa.s	Pa.s	m	Pa	Pa/m	Pa
49,37184	1	49,037	49,222	49,1295	13299,99	13333,51	0,00493	1,83E-05	1,83E-05	0,003567	0,18683	138,5727	0,681162
49,37184	1	49,222	49,409	49,3155	13333,51	13366,46	0,00493	1,83E-05	1,82E-05	0,003605	0,187428	137,9812	0,684987
49,37184	1	49,409	49,597	49,503	13366,46	13400,31	0,00493	1,82E-05	1,82E-05	0,003611	0,187006	137,3899	0,683058
49,37184	1	49,597	49,787	49,692	13400,31	13434,33	0,00493	1,82E-05	1,81E-05	0,003686	0,18756	136,7981	0,691777
49,37184	1	49,787	49,979	49,883	13434,33	13467,78	0,00493	1,81E-05	1,81E-05	0,003727	0,188086	136,2059	0,695696
49,37184	1	49,979	50,172	50,0755	13467,78	13502,15	0,00493	1,81E-05	1,8E-05	0,003805	0,187615	135,614	0,70364
49,37184	1	50,172	50,368	50,27	13502,15	13536,69	0,00493	1,8E-05	1,8E-05	0,003812	0,18906	135,0203	0,70369
49,37184	1	50,368	50,566	50,467	13536,69	13571,41	0,00493	1,8E-05	1,79E-05	0,003855	0,189501	134,4245	0,707716
49,37184	1	50,566	50,766	50,666	13571,41	13605,54	0,00493	1,79E-05	1,79E-05	0,0039	0,189914	133,8286	0,711786
49,37184	1	50,766	50,968	50,867	13605,54	13640,62	0,00493	1,79E-05	1,78E-05	0,003983	0,1903	133,232	0,720951
49,37184	1	50,968	51,172	51,07	13640,62	13675,87	0,00493	1,78E-05	1,78E-05	0,004003	0,19066	132,634	0,725147
49,37184	1	51,172	51,378	51,275	13675,87	13711,31	0,00493	1,78E-05	1,78E-05	0,004039	0,190993	132,0354	0,72424
49,37184	1	51,378	51,586	51,482	13711,31	13746,93	0,00493	1,78E-05	1,77E-05	0,004126	0,191299	131,4364	0,733667
49,37184	1	51,586	51,797	51,6915	13746,93	13782,74	0,00493	1,77E-05	1,77E-05	0,004176	0,192488	130,8357	0,738904
49,37184	1	51,797	52,009	51,903	13782,74	13818,73	0,00493	1,77E-05	1,76E-05	0,004227	0,191828	130,2347	0,742355
49,37184	1	52,009	52,224	52,1165	13818,73	13854,92	0,00493	1,76E-05	1,76E-05	0,004279	0,192952	129,6334	0,747701
49,37184	1	52,224	52,442	52,333	13854,92	13891,29	0,00493	1,76E-05	1,75E-05	0,004333	0,194029	129,0296	0,75306
49,37184	1	52,442	52,661	52,5515	13891,29	13927,85	0,00493	1,75E-05	1,75E-05	0,004387	0,193301	128,4256	0,756709
49,37184	1	52,661	52,883	52,772	13927,85	13965,41	0,00493	1,75E-05	1,74E-05	0,004485	0,194315	127,821	0,767603
49,37184	1	52,883	53,108	52,9955	13965,41	14002,37	0,00493	1,74E-05	1,74E-05	0,004543	0,195283	127,214	0,773155
49,37184	1	53,108	53,335	53,2215	14002,37	14039,52	0,00493	1,74E-05	1,73E-05	0,004558	0,19535	126,6068	0,772439
49,37184	1	53,335	53,565	53,45	14039,52	14076,87	0,00493	1,73E-05	1,73E-05	0,004662	0,196243	125,9987	0,783622
49,37184	1	53,565	53,797	53,681	14076,87	14115,24	0,00493	1,73E-05	1,72E-05	0,004724	0,196249	125,389	0,788529
49,37184	1	53,797	54,032	53,9145	14115,24	14152,99	0,00493	1,72E-05	1,72E-05	0,004787	0,197069	124,7787	0,794339
49,37184	1	54,032	54,247	54,151	14152,99	14190,95	0,00493	1,72E-05	1,72E-05	0,004897	0,197845	124,1673	0,805907
49,37184	1	54,247	54,511	54,3905	14190,95	14229,94	0,00493	1,72E-05	1,71E-05	0,004918	0,198578	123,5535	0,806179
49,37184	1	54,511	54,754	54,6325	14229,94	14268,32	0,00493	1,71E-05	1,71E-05	0,005033	0,198456	122,9393	0,817163
49,37184	1	54,754	55,001	54,8775	14268,32	14307,74	0,00493	1,71E-05	1,70E-05	0,005058	0,199926	122,3238	0,818329
49,37184	1	55,001	55,25	55,1255	14307,74	14346,53	0,00493	1,7E-05	1,7E-05	0,005175	0,199735	121,7069	0,829586
49,37184	1	55,25	55,503	55,3765	14346,53	14386,38	0,00493	1,7E-05	1,69E-05	0,005299	0,201109	121,0889	0,842706
49,37184	1	55,503	55,759	55,631	14386,38	14425,6	0,00493	1,69E-05	1,69E-05	0,005325	0,201636	120,4687	0,84316
49,37184	1	55,759	56,018	55,8885	14425,6	14465,9	0,00493	1,69E-05	1,68E-05	0,005454	0,202123	119,8475	0,855776
49,37184	1	56,018	56,28	56,149	14465,9	14506,42	0,00493	1,68E-05	1,68E-05	0,005484	0,202571	119,2249	0,856351
49,37184	1	56,28	56,545	56,4125	14506,42	14546,3	0,00493	1,68E-05	1,67E-05	0,005618	0,202981	118,6022	0,869275
49,37184	1	56,545	56,815	56,688	14546,3	14587,27	0,00493	1,67E-05	1,67E-05	0,005704	0,204864	117,9769	0,877761
49,37184	1	56,815	57,087	56,951	14587,27	14628,47	0,00493	1,67E-05	1,66E-05	0,005845	0,204422	117,3494	0,890329
49,37184	1	57,087	57,364	57,2255	14628,47	14669,91	0,00493	1,66E-05	1,66E-05	0,005938	0,206187	117,67205	0,890962
49,37184	1	57,364	57,644	57,504	14669,91	14710,7	0,00493	1,66E-05	1,65E-05	0,005975	0,206406	116,0902	0,899994
49,37184	1	57,644	57,927	57,7855	14710,7	14752,6	0,00493	1,65E-05	1,65E-05	0,006183	0,206569	115,4597	0,92047
49,37184	1	57,927	58,215	58,071	14752,6	14794,75	0,00493	1,65E-05	1,65E-05	0,006226	0,208178	114,8261	0,923124
49,37184	1	58,215	58,507	58,361	14794,75	14837,13	0,00493	1,65E-05	1,64E-05	0,006387	0,208977	114,1908	0,938294
49,37184	1	58,507	58,803	58,655	14837,13	14879,74	0,00493	1,64E-05	1,64E-05	0,006494	0,209722	113,5533	0,947087
49,37184	1	58,803	59,103	58,953	14879,74	14922,64	0,00493	1,64E-05	1,63E-05	0,006604	0,210412	112,9143	0,956075
49,37184	1	59,103	59,408	59,2555	14922,64	14965,76	0,00493	1,63E-05	1,63E-05	0,006717	0,211741	112,2733	0,965921
49,37184	1	59,408	59,717	59,5625	14965,76	15009,14	0,00493	1,63E-05	1,62E-05	0,006897	0,212312	111,6301	0,982182
49,37184	1	59,717	60,03	59,8735	15009,14	15052,76	0,00493	1,62E-05	1,62E-05	0,007019	0,212832	110,9859	0,991832
49,37184	1	60,03	60,349	60,1895	15052,76	15096,64	0,00493	1,62E-05	1,61E-05	0,00721	0,21464	110,339	1,010166
49,37184	1	60,349	60,672	60,5105	15096,64	15140,74	0,00493	1,61E-05	1,61E-05	0,007342	0,215032	109,6897	1,020346
49,37184	1	60,672	61,001	60,8365	15140,78	15185,18	0,00493	1,61E-05	1,61E-05	0,007478	0,216685	109,0382	1,032085
49,37184	1	61,001	61,334	61,1675	15185,18	15229,83	0,00493	1,61E-05	1,60E-05	0,007688	0,216953	108,3845	1,050167
49,37184	1	61,334	61,673	61,5035	15229,83	15274,75	0,00493	1,60E-05	1,59E-05	0,007835	0,218455	107,729	1,062544
49,37184	1	61,673	62,018	61,8455	15274,75	15319,94	0,00493	1,59E-05	1,59E-05	0,007989	0,219869	107,0701	1,075225
49,37184	1	62,018	62,368	62,193	15319,94	15365,39	0,00493	1,59E-05	1,58E-05	0,008022	0,22057	106,4089	1,09524
49,37184	1	62,368	62,724	62,546	15365,39	15411,12	0,00493	1,58E-05	1,58E-05	0,008386	0,221826	105,7456	1,108656
49,37184	1	62,724	63,086	62,905	15411,12	15457,12	0,00493	1,58E-05	1,57E-05	0,008635	0,222998	105,0795	1,13035
49,37184	1	63,086	63,454	63,27	15457,12	15503,39	0,00493	1,57E-05	1,57E-05	0,008817	0,224086	104,411	1,144644
49,37184	1	63,454	63,829	63,6415	15503,39	15550,93	0,00493	1,57E-05	1,57E-05	0,009084	0,225669	103,7387	1,168068
49,37184	1	63,829	64,211	64,02	15550,93	15597,77	0,00493	1,57E-05	1,56E-05	0,009283	0,227193	103,0628	1,183911
49,37184	1	64,211	64,599	64,405	15597,77	15644,89	0,00493	1,56E-05	1,55E-05	0,009572	0,228011	102,385	1,208028
49,37184	1	64,599	64,995	64,797	15644,89	15692,3	0,00493	1,55E-05	1,55E-05	0,00979	0,229905		

## ANEXO Q – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 1)

$G_r$	$x$	$\rho_v$	$\rho_l$	$\rho_h$	$Re_{LO}$	$d_i$	$\mu_v$	$\mu_l$	$\Phi_{LO}^2$	$\xi$	$Fr_h$	$\sigma$	$We_l$	$C_{F1}$	$C_{F2}$	$dZ$	$\Delta P_M$	$dP_F/dZ$	$\Delta P_{TS}$
kg/m <sup>2</sup> .s	-	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	m	Pa.s	Pa.s	W/m <sup>2</sup>	-	-	N/m	-	-	-	m	Pa	Pa/m	Pa
49,37184	0,995	83,394	956,13	83,77635	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,817435	0,999562	12,18962	0,005406	26,53237	6,80019	1,721392	0,005771	0,133401	81,19246	0,601926
49,37184	0,99	83,394	956,13	84,16222	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,752341	0,99912	12,13374	0,005406	26,41072	6,732094	2,002645	0,010611	0,266802	80,41722	1,12013
49,37184	0,98	83,394	956,13	84,94472	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,620981	0,998223	12,02196	0,005406	26,16743	6,597081	2,320575	0,011214	0,266802	78,85278	1,151021
49,37184	0,97	83,394	956,13	85,7419	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,490095	0,99731	11,91019	0,005406	25,92414	6,463642	2,520958	0,011687	0,266802	77,29399	1,170116
49,37184	0,96	83,394	956,13	86,5542	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,360296	0,996379	11,79841	0,005406	25,68085	6,331776	2,667113	0,01217	0,266802	75,74815	1,188627
49,37184	0,95	83,394	956,13	87,38203	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,231794	0,995543	11,68664	0,005406	25,43755	6,201484	2,781008	0,012671	0,266802	74,21774	1,207233
49,37184	0,94	83,394	956,13	88,22585	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	6,104688	0,994464	11,57486	0,005406	25,19426	6,072766	2,873122	0,01303	0,266802	72,70397	1,214882
49,37184	0,93	83,394	956,13	89,08612	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,979032	0,993478	11,46309	0,005406	24,95097	5,945622	2,949356	0,013434	0,266802	71,20747	1,223415
49,37184	0,92	83,394	956,13	89,96334	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,854863	0,992473	11,35132	0,005406	24,70768	5,820051	3,013388	0,013388	0,266802	69,72867	1,233266
49,37184	0,91	83,394	956,13	90,858	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,732009	0,991448	11,23954	0,005406	24,46438	5,696054	3,067687	0,014152	0,266802	68,26783	1,23294
49,37184	0,9	83,394	956,13	91,77064	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,611065	0,990402	11,12777	0,005406	24,22109	5,573631	3,113993	0,014481	0,266802	66,82515	1,234479
49,37184	0,89	83,394	956,13	92,70179	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,491465	0,989335	11,01599	0,005406	23,9779	5,452782	3,153586	0,014852	0,266802	65,40077	1,238127
49,37184	0,88	83,394	956,13	93,65204	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,37341	0,988246	10,90422	0,005406	23,74351	5,333509	3,187437	0,015086	0,266802	63,99479	1,232238
49,37184	0,87	83,394	956,13	94,62197	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,256909	0,987135	10,79244	0,005406	23,49121	5,215804	3,216302	0,015366	0,266802	62,6073	1,228835
49,37184	0,86	83,394	956,13	95,6122	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,141964	0,986	10,68067	0,005406	23,24792	5,099678	3,240783	0,015633	0,266802	61,29388	1,224126
49,37184	0,85	83,394	956,13	96,62338	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	5,028581	0,984841	10,56889	0,005406	23,04633	4,985122	3,261367	0,015952	0,266802	59,88803	1,222134
49,37184	0,84	83,394	956,13	97,65617	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,916769	0,983658	10,45712	0,005406	22,76134	4,872141	3,278455	0,016163	0,266802	58,55641	1,211333
49,37184	0,83	83,394	956,13	98,71128	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,806525	0,982449	10,34534	0,005406	22,51804	4,760734	3,29238	0,016363	0,266802	57,24346	1,203488
49,37184	0,82	83,394	956,13	99,78944	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,697854	0,981214	10,23357	0,005406	22,7475	4,650901	3,303424	0,016654	0,266802	55,94924	1,198602
49,37184	0,81	83,394	956,13	100,8914	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,59076	0,979951	10,1218	0,005406	22,03146	4,542641	3,311827	0,016801	0,266802	54,6738	1,185403
49,37184	0,8	83,394	956,13	102,018	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,485243	0,97865	10,01002	0,005406	21,78817	4,435956	3,317794	0,017008	0,266802	53,41714	1,175338
49,37184	0,79	83,394	956,13	103,17	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,381307	0,97734	9,898247	0,005406	21,54847	4,330844	3,321504	0,017278	0,266802	52,17931	1,168358
49,37184	0,78	83,394	956,13	104,3484	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,278953	0,97599	9,786472	0,005406	21,30158	4,227305	3,323112	0,0174	0,266802	50,96032	1,153535
49,37184	0,77	83,394	956,13	105,5539	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,178183	0,974609	9,674698	0,005406	21,05829	4,125341	3,322755	0,017587	0,266802	49,7602	1,141928
49,37184	0,76	83,394	956,13	106,7877	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	4,078999	0,973195	9,562923	0,005406	20,815	4,02495	3,320553	0,017767	0,266802	48,57896	1,129926
49,37184	0,75	83,394	956,13	108,0506	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,981407	0,971748	9,451149	0,005406	20,5717	3,926133	3,316613	0,018016	0,266802	47,41663	1,121055
49,37184	0,74	83,394	956,13	109,3438	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,885394	0,970266	9,339374	0,005406	20,32841	3,828889	3,311031	0,018113	0,266802	46,27323	1,104944
49,37184	0,73	83,394	956,13	110,6682	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,790977	0,968749	9,2276	0,005406	20,08512	3,73322	3,303892	0,018279	0,266802	45,14876	1,092055
49,37184	0,72	83,394	956,13	112,0252	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,698153	0,967194	9,115825	0,005406	19,84183	3,639124	3,295272	0,018515	0,266802	44,04326	1,08227
49,37184	0,71	83,394	956,13	113,4159	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,60692	0,9656	9,04045	0,005406	19,59854	3,546602	3,28524	0,018597	0,266802	42,95673	1,065681
49,37184	0,7	83,394	956,13	114,8415	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,517284	0,963967	8,892276	0,005406	19,35524	3,455653	3,273786	0,018751	0,266802	41,8892	1,052269
49,37184	0,69	83,394	956,13	116,3034	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,429243	0,962292	8,780501	0,005406	19,11915	3,366279	3,261188	0,018979	0,266802	40,84608	1,041899
49,37184	0,68	83,394	956,13	117,803	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,428401	0,960573	8,668677	0,005406	18,86866	3,278478	3,247275	0,019049	0,266802	39,81119	1,025151
49,37184	0,67	83,394	956,13	119,3418	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,257958	0,95881	8,556952	0,005406	18,62537	3,192251	3,232168	0,019193	0,266802	38,80075	1,011503
49,37184	0,66	83,394	956,13	120,9213	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,174716	0,957	8,445178	0,005406	18,38207	3,107597	3,215911	0,019335	0,266802	37,80938	0,997831
49,37184	0,65	83,394	956,13	122,542	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,093077	0,955142	8,333403	0,005406	18,13878	3,024518	3,198543	0,019553	0,266802	36,83711	0,987086
49,37184	0,64	83,394	956,13	124,2092	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	3,013042	0,953233	8,221629	0,005406	17,89594	3,243012	3,180099	0,019611	0,266802	35,88391	0,970507
49,37184	0,63	83,394	956,13	125,9212	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	2,934612	0,951271	8,109854	0,005406	17,65522	3,165229	3,160613	0,019745	0,266802	34,94985	0,9569
49,37184	0,62	83,394	956,13	127,6809	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	2,85779	0,949255	7,99808	0,005406	17,4089	2,784721	3,140115	0,019959	0,266802	34,03494	0,946171
49,37184	0,61	83,394	956,13	129,4906	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	2,365198	0,933391	7,215658	0,005406	17,16561	2,707936	3,118633	0,020009	0,266802	33,13	

## ANEXO R – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE CONDENSAÇÃO (PARTE 2)

$G_r$	$x$	$\rho_v$	$\rho_l$	$\rho_h$	$Re_{LO}$	$d_i$	$\mu_v$	$\mu_l$	$\Phi_{\rho,h}^2$	$\xi$	$Fr_h$	$\sigma$	$We_l$	$C_{F1}$	$C_{F2}$	$dZ$	$\Delta P_M$	$dP_f/dZ$	$\Delta P_{TS}$
kg/m <sup>2</sup> .s	-	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	-	m	Pa.s	Pa.s	W/m <sup>2</sup>	-	-	N/m	-	-	-	m	Pa	Pa/m	Pa
49,37184	0,49	83,394	956,13	156,0276	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	0,016775	6,54501	0,005406	14,2461	1,90927	2,79162	0,021578	0,266802	23,8938	0,782391	
49,37184	0,48	83,394	956,13	158,7385	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,952178	0,913669	6,433236	0,005406	14,00281	1,852944	2,759062	0,021261	0,266802	23,24953	0,769214
49,37184	0,47	83,394	956,13	161,5453	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,899724	0,910453	6,321461	0,005406	13,75952	1,798192	2,725729	0,021278	0,266802	22,62483	0,758399
49,37184	0,46	83,394	956,13	164,4531	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,848918	0,907121	6,209687	0,005406	13,51622	1,745013	2,691630	0,021847	0,266802	22,01974	0,747857
49,37184	0,45	83,394	956,13	167,4675	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,799761	0,903667	6,097912	0,005406	13,27293	1,693408	2,656779	0,022054	0,266802	21,43432	0,739521
49,37184	0,44	83,394	956,13	170,5945	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,75226	0,900084	5,986138	0,005406	13,02964	1,643377	2,621173	0,022083	0,266802	20,86859	0,727635
49,37184	0,43	83,394	956,13	173,8405	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,706417	0,896364	5,874363	0,005406	12,78635	1,594919	2,584817	0,02222	0,266802	20,32263	0,717973
49,37184	0,42	83,394	956,13	177,2124	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,662238	0,892501	5,762589	0,005406	12,54305	1,548035	2,547715	0,022409	0,266802	19,79647	0,710424
49,37184	0,41	83,394	956,13	180,7177	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,619726	0,888484	5,650814	0,005406	12,29976	1,502725	2,509867	0,022436	0,266802	19,29017	0,699589
49,37184	0,4	83,394	956,13	184,3645	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,578887	0,884306	5,53904	0,005406	12,05647	1,458989	2,471276	0,022553	0,266802	18,8038	0,690886
49,37184	0,39	83,394	956,13	188,1615	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,539726	0,879955	5,427265	0,005406	11,81318	1,416826	2,43194	0,022763	0,266802	18,33741	0,684217
49,37184	0,38	83,394	956,13	192,1182	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,502248	0,875421	5,315491	0,005406	11,56988	1,376237	2,391858	0,022788	0,266802	17,89107	0,674499
49,37184	0,37	83,394	956,13	196,2448	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,46646	0,870693	5,203716	0,005406	11,32659	1,337222	2,35103	0,022905	0,266802	17,46486	0,666833
49,37184	0,36	83,394	956,13	200,5526	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,432368	0,865757	5,091941	0,005406	11,0833	1,299781	2,309451	0,023022	0,266802	17,05883	0,659593
49,37184	0,35	83,394	956,13	205,0538	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,399978	0,8606	4,980167	0,005406	10,84001	1,263913	2,267118	0,023233	0,266802	16,67308	0,654172
49,37184	0,34	83,394	956,13	209,7617	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,369297	0,855205	4,868392	0,005406	10,59672	1,229619	2,224026	0,023255	0,266802	16,30769	0,646044
49,37184	0,33	83,394	956,13	214,6908	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,340334	0,849557	4,756618	0,005406	10,35342	1,196898	2,180161	0,023372	0,266802	15,96274	0,63988
49,37184	0,32	83,394	956,13	219,8572	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,313094	0,843637	4,648483	0,005406	10,10103	1,165753	2,135538	0,023584	0,266802	15,63834	0,635612
49,37184	0,31	83,394	956,13	225,2783	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,287588	0,837426	4,533069	0,005406	9,866838	1,13618	2,090128	0,023603	0,266802	15,33457	0,62875
49,37184	0,3	83,394	956,13	230,9736	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,263823	0,8309	4,421294	0,005406	9,623546	1,108181	2,043925	0,023719	0,266802	15,05154	0,623803
49,37184	0,29	83,394	956,13	236,9643	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,214809	0,824036	4,30952	0,005406	9,380253	1,081756	1,996921	0,02393	0,266802	14,78936	0,620716
49,37184	0,28	83,394	956,13	243,2744	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,221554	0,816806	4,197745	0,005406	9,136961	1,056905	1,949101	0,023947	0,266802	14,54814	0,615185
49,37184	0,27	83,394	956,13	249,9289	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,203071	0,809181	4,085971	0,005406	8,893668	1,033627	1,90045	0,02406	0,266802	14,32801	0,611533
49,37184	0,26	83,394	956,13	256,9582	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,186367	0,801126	3,974196	0,005406	8,650376	1,019123	1,850954	0,024171	0,266802	14,12907	0,608331
49,37184	0,25	83,394	956,13	264,3943	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,171454	0,792606	3,862421	0,005406	8,407083	0,991793	1,800592	0,024382	0,266802	13,95147	0,60697
49,37184	0,24	83,394	956,13	272,2736	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,158343	0,783578	3,750647	0,005406	8,163791	0,973236	1,749345	0,024393	0,266802	13,79532	0,603312
49,37184	0,23	83,394	956,13	280,637	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,147043	0,773995	3,638872	0,005406	7,920499	0,956253	1,697180	0,024502	0,266802	13,66075	0,601513
49,37184	0,22	83,394	956,13	289,5305	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,137561	0,763804	3,527098	0,005406	7,677206	0,940844	1,644097	0,024709	0,266802	13,54787	0,601561
49,37184	0,21	83,394	956,13	299,000	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,129919	0,752947	3,415323	0,005406	7,433914	0,927009	1,59004	0,024715	0,266802	13,4568	0,599381
49,37184	0,2	83,394	956,13	309,1228	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,124111	0,741535	3,303549	0,005406	7,190621	0,914747	1,534985	0,024819	0,266802	13,38764	0,599066
49,37184	0,19	83,394	956,13	311,9481	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,120148	0,728951	3,191774	0,005406	6,947329	0,904059	1,478898	0,025023	0,266802	13,34044	0,60062
49,37184	0,18	83,394	956,13	331,5592	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,118032	0,715647	3,08	0,005406	6,704036	0,894945	1,421724	0,025022	0,266802	13,31523	0,599978
49,37184	0,17	83,394	956,13	344,0447	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,11776	0,701341	2,968225	0,005406	6,460744	0,887447	1,363428	0,025121	0,266802	13,312	0,601219
49,37184	0,16	83,394	956,13	357,5074	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,119323	0,685915	2,856451	0,005406	6,217452	0,881438	1,303948	0,025129	0,266802	13,33061	0,602992
49,37184	0,15	83,394	956,13	372,0666	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,122701	0,669233	2,744676	0,005406	5,974159	0,877045	1,243224	0,025419	0,266802	13,37084	0,606682
49,37184	0,14	83,394	956,13	387,8619	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,127859	0,651134	2,632902	0,005406	5,730876	0,874226	1,1818	0,025412	0,266802	13,43228	0,608146
49,37184	0,13	83,394	956,13	405,0578	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,134743	0,631431	2,521127	0,005406	5,487574	0,872981	1,117729	0,025508	0,266802	13,51425	0,615127
49,37184	0,12	83,394	956,13	423,8493	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,143261	0,609899	2,409352	0,005406	5,244282	0,873309	1,052771	0,02571	0,266802	13,61575	0,616858
49,37184	0,11	83,394	956,13	444,469	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,153296	0,586272	2,297578	0,005406	5,000989	0,875211	0,986184	0,025704	0,266802	13,73521	0,619855
49,37184	0,1	83,394	956,13	467,1977	2226,52	0,00493	1,41E-05	0,000109	1,164641	0,560229	2,185803	0,005406	4,757697	0,878687	0,917823	0,025807	0,266802		

**ANEXO S – CÁLCULO DA PERDA DE PRESSÃO LOCAL NA ZONA DE SUBRESFRIAMENTO**

$G_r$ kg/m <sup>2</sup> .s	$\chi$ -	$\rho_{r,inlet}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{r,outlet}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_r$ kg/m <sup>3</sup>	$Re_{r,inlet}$ -	$Re_{r,outlet}$ -	$d_i$ m	$\mu_{r,inlet}$ Pa.s	$\mu_{r,outlet}$ Pa.s	$dZ$ m	$\Delta P_M$ Pa	$dP_F/dZ$ Pa/m	$\Delta P_{TS}$ Pa
49,37184	0	957,14	963,21	960,175	2219,819	2179,08	0,00493	0,00011	0,000112	0,192085	0,016049	10,16451	1,968498