



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Conceção Mecânica de um Criorrefrigerador Isento de Vibrações

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Mechanical Conception of a Vibration Free Cryocooler

Autor

João Paulo Coelho Mendes

Orientadores

Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro

Engenheiro Hugo Ricardo Marques da Silva Redondo

Júri

Presidente	Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Engenheira Maria de Fátima da Costa Paulino Assistente Convidada da Universidade de Coimbra Engenheiro Hugo Ricardo Marques da Silva Redondo
Orientador	Manufacture Assembly Integration Manager da Active Space Technologies, SA

Por questões de confidencialidade algumas figuras podem estar rasuradas.

Colaboração Institucional:



**Active Space
Technologies, SA**

Coimbra, Setembro, 2016

“Quando atingimos o nosso ponto mais baixo é quando estamos abertos para a maior mudança.”

Avatar Aang

Agradecimentos

Quero agradecer à Professora Fátima Paulino por toda a revisão e apoio ao longo deste trabalho, à Professora Doutora Ana Amaro por toda a supervisão, e ao Engenheiro Hugo Redondo pela orientação na empresa.

Quero agradecer à Active Space Technologies, SA por me ter recebido, a toda a equipa por me ter tão bem acolhido, em especial ao Eng.º Moritz Branco e ao Dr. Daniel Martins por toda a ajuda e todo o conhecimento que me transmitiram

Aos meus amigos pombalenses e académicos por todas as histórias que levo durante este percurso, e pela esperança em como eu conseguiria chegar ao final dele.

Agradeço à minha namorada, Vanessa, por toda a força que me deu nestes últimos 3 anos, e acima de tudo por ter tornado este dia possível.

À minha família por todo o apoio, em especial ao meu irmão e ao Daniel que me roubou horas preciosas, mas bem gastas.

E por último aos meus pais, por toda a compreensão, confiança, dedicação, e acima de tudo, por todo o investimento, durante todos estes anos. Esta conquista não é minha, mas sim nossa. Obrigado.

Resumo

O presente trabalho demonstra a concepção mecânica de um criorrefrigerador isento de vibração para temperaturas 40-80K, do tipo Joule-Thomson com compressor de adsorção. É feita uma introdução que descreve o ciclo, o seu funcionamento, e os seus componentes, tal como os aspetos mais importantes para garantir o seu bom funcionamento. O processo de desenho refere as várias alternativas possíveis, os critérios de seleção, o processo criativo, e por fim o desenho final. Relatam-se os processos de fabrico a tomar, aspetos de montagem e as suas implicações a nível de desenho, tendo como exemplo uma peça de teste. Como conclusão são descritos os resultados obtidos e as maiores dificuldades observadas durante o desenvolvimento.

Palavras-chave: Criorrefrigerador; compressor; adsorção; Joule-Thomson; vibração.

Abstract

The present work demonstrates the mechanical conception of a vibration free cryocooler for temperatures of 40-80K, of the Joule-Thomson type, with an adsorption compressor. The introduction describes the cycle, operation and components, as well as the most important aspects in order to guaranty a good operation. The design process presents the various possible alternatives, selection criteria, creative process and final design. Reports on the manufacturing process, assembly details and their implications at a design level are mentioned, where a test piece is used as an example. The conclusion describes the final results and major difficulties faced during the development stage.

Keywords Cryocooler; compressor; adsorption; Joule-Thomson; vibration.

Índice

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Siglas	xvii
1. Estrutura da Dissertação	1
2. Introdução	3
2.1. Enquadramento	5
2.2. Ciclo Joule-Thomson com Compressor de Adsorção.....	7
2.2.1. Célula de adsorção.....	9
2.2.2. Interruptor Térmico	10
2.2.3. Pós Refrigerador	10
2.2.4. Válvulas de retenção.....	11
2.2.5. Permutador de Calor de Contra Corrente	11
2.2.6. Válvula de Expansão (JT).....	11
2.2.7. Evaporador.....	11
3. Requisitos do Protótipo	13
3.1. Transferência Térmica	13
3.2. Ambiente Espacial	14
3.3. Cargas no lançamento	14
3.4. Fabrico	15
3.4.1. Soldadura por Feixe de Eletrões	16
3.4.2. Soldadura por TIG	16
3.4.3. Soldadura por Fricção Linear	17
3.4.4. Brasagem a Vácuo	18
3.5. Componentes Fluídicos.....	19
3.5.1. Ligações desmontáveis	19
3.5.2. Tubagem	20
3.5.3. Ligações em L	20
3.5.4. Ligações em T	21
3.5.5. Redutores	22
3.6. Materiais	22
3.6.1. Liga de Titânio de Grau 5.....	23
3.6.2. Aço Inoxidável AISI 304L	23
3.6.1. Cobre de Alta Condutividade Livre de Oxigénio	24
3.7. Software	24
4. Desenvolvimento do projeto.....	25
4.1. Unidade de Compressão	25
4.1.1. Célula de Adsorção.....	26
4.1.2. Interruptor térmico.....	31
4.1.3. Permutador de Calor da Célula de Adsorção	34

4.1.4.	Adaptador (Titânio – Cobre)	35
4.1.5.	Pós refrigerador	36
4.1.6.	União em T – Redutora	37
4.1.7.	Válvulas de Retenção	37
4.1.8.	Fixador de Válvulas de Retenção	39
4.1.9.	União 4-1	40
4.1.10,	Componentes Fluídicos.....	41
4.2.	Estágio Frio.....	42
4.2.1.	Permutador de Calor de Contra Corrente	43
4.2.2.	Válvula de Expansão	43
4.2.3.	Evaporador.....	43
4.2.4.	Componentes Fluídicos	44
4.3.	Disposição dos Componentes no Conjunto	46
5.	Peça de Teste	49
5.1.	Desenhos Técnicos	49
5.2.	Processo de Fabrico	52
5.3.	Processo de Ligação.....	52
6.	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	53
7.	Referências Bibliográficas.....	55
	APÊNDICE A	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Criorefrigerador integrado na missão Planck [5].....	6
Figura 2-2 – Esquema do ciclo Joule-Thomson com compressor de adsorção. (Adaptado de [6]).....	7
Figura 2-3 - Evolução das variáveis no interior do compressor (a) e sequência de (des) ativação dos componentes com comportamento cíclico. [7].....	9
Figura 3-1 - Processo de soldadura TIG. [9]	17
Figura 3-2 - Soldadura por fricção: rotação (a), compressão (b), aquecimento (c) e fusão (d). [9].....	18
Figura 3-3 - Linhas de fluxo do escoamento plástico dos dois tipos de soldadura por fricção. [10]	18
Figura 3-4 - Ligação do tipo VCR®. ([11] – “VCR® Metal Gasket Face Seal Fittings”) .	20
Figura 3-5 - Vista isométrica das ligações em L de 1/2'-1/4', 1/4' e 1/8', respetivamente. [11]	21
Figura 3-6 - Ligação bicónica (a), ligação em T (b) e bujão. ([11] – “Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings”).....	22
Figura 3-7 - Redutor esquematizado (a) e em vista isométrica. (a), [11] – “Weld Fittings”)	22
Figura 3-8 - Condutividades térmicas em função da temperatura, de diversos materiais [15].	24
Figura 4-1 - Ilustração do ciclo e os principais componentes utilizados e desenvolvidos. .	25
Figura 4-2 - Hemisfério superior da célula de adsorção (a) em vista isométrica e (b) em vista frontal com corte.....	27
Figura 4-3 - Hemisfério inferior da célula de adsorção (a) em vista isométrica e (b) em vista frontal com corte.....	28
Figura 4-4 - Detalhe da zona de integração do adaptador bimetálico.	28
Figura 4-5 - Orelhas da célula de adsorção em vista isométrica (esq), lateral (sup. dir.) e frontal (inf. dir.).....	29
Figura 4-6 - Vistas isométrica dos suportes estruturais e dimensões da secção.....	30
Figura 4-7 - Vistas dos suportes estruturais reforçados.....	30
Figura 4-8 - Projeção da célula de adsorção, sem e com corte.....	31
Figura 4-9 - Interruptores térmicos <i>Gas Gap</i> : Standard (a) [16], com ativação magnética (b) [17] e com alhetas (c) [18].....	31
Figura 4-10 - Processo de obtenção do espaçamento entre blocos. [19].....	33

Figura 4-11 - Projeção do interruptor térmico, sem e com corte.....	34
Figura 4-12 - Projeção do permutador de calor, sem e com corte.....	35
Figura 4-13 - Projeção do Adaptador Bimetálico, sem e com corte.	36
Figura 4-14 - Projeção do Pós-Refrigerador	36
Figura 4-15 - Vista isométrica da ligação em T redutora.....	37
Figura 4-16 - Válvulas de retenção de elevação, de balanço e de disco inclinado, respetivamente [20].	38
Figura 4-17 - Válvula de Retenção <i>Swagelok</i> , tipo CW [11].	38
Figura 4-18 - Válvula de retenção com as ligações VCR® montadas (esq.) e em vista explodida (dir.).	39
Figura 4-19 - Fixador de válvulas de retenção.	40
Figura 4-20 - Projeção da União 4-1	40
Figura 4-21 - Componentes fluídicos do compressor de adsorção: a) ligação em T do tipo <i>Swagelok</i> ; b) redutor 1/4'-1/8'; c) ligação desmontável VCR.....	41
Figura 4-22 - Permutador de calor de tubos concêntricos de contra-corrente.....	43
Figura 4-23 – Vista isométrica do evaporador.	44
Figura 4-24 - Componentes fluídicos utilizados na parte fria.	44
Figura 4-25 - Componentes fluídicos da parte fria anteriores ao permutador (a) e vista em corte da ligação em T (b).....	45
Figura 4-26 - Componentes fluídicos da parte fria posteriores ao permutador.....	46
Figura 4-27 - Vistas da disposição final do conjunto.	48
Figura 5-1 - Interruptor térmico simplificado em vista isométrica, com corte e com vista explodida, respetivamente.	49
Figura 5-2 - Vista frontal com corte do bloco frio (a), vista da a secção frontal do bloco quente (b) e vista frontal do cilindro de afastamento (c). Desenhos não estão na mesma escala.....	50
Figura 5-3 - Tolerâncias dos blocos quente (a) e frio (b)	50
Figura 5-4 - Tolerância da altura do cilindro de afastamento.....	51
Figura 5-5 - Componentes após maquinação, isoladas e montadas, respetivamente.	52

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1 - Qualificação sinusoidal das cargas dinâmicas.	14
Tabela 3-2 - Vibrações aleatórias das cargas dinâmicas.	15
Tabela 3-3 - Espectro de choque.	15
Tabela 3-4 - Referências dos componentes <i>Swagelok</i> utilizados nas ligações desmontáveis.	20
Tabela 3-5 - Comparação de Propriedades de Ligas de Titânio [13]	23
Tabela 3-6 Composição química do aço 304L [14].	23
Tabela 3-7 - Propriedades do aço 304L [14].	24

SIGLAS

AST – Active Space Technologies

CAD – Design Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

OFHC –Cobre de Alta Condutividade Livre de Oxigénio (*Oxygen-Free High Conductivity Copper*)

TCPG1 – Titânio Comercialmente Puro Grau 1

VFC – Criorrefrigerador Isento de Vibração (*Vibration Free Cooler*)

1. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está redigida de modo a demonstrar o recorrer de todo o percurso do projeto, desde a conceção até a obtenção do produto final. Para melhor perceber o sequenciamento dos capítulos é explicada a **Estrutura da Dissertação**.

É feita uma **Apresentação da Empresa** na qual foi desenvolvido o projeto sobre a qual esta dissertação incide.

Introdução, na qual é resumido o ciclo Joule-Thomson, e descritos os componentes necessários para o seu bom funcionamento.

De seguida são descritos vários requisitos, alguns impostos pelo caderno de encargos do cliente, outros impostos pelas condições a que o equipamento estará sujeito, em **Requisitos do Protótipo**.

No capítulo **Desenvolvimento do projeto** é descrito todo o processo de desenho em software CAD (*Computer Aided Design*), desde a idealização da peça, à disposição do conjunto.

Após o desenvolvimento do projeto explica-se todo o processo de produção de uma **Peça de Teste**, as várias decisões tomadas acerca das tolerâncias e ajustes a aplicar para o correto funcionamento.

Conclusões e Trabalhos Futuros encerram a presente dissertação, propondo possíveis alterações ou indicações para posteriores trabalhos.

2. APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa Active Space Technologies, SA., a qual desenvolve projetos, componentes e equipamentos para o setor espacial, aeronáutico, nuclear, industrial, entre outros.

Esta empresa, fundada em 2004 e atualmente sediada em Taveiro , Coimbra, disponibiliza produtos e soluções nas áreas de engenharia mecânica e eletrotécnica, já teve vários projetos executados para missões espaciais, tendo a título de exemplo: Solar Orbiter, ExoMars 2018, BepiColombo, etc.

A Active Space Techonologies dispõe de 41 colaboradores em Taveiro, contando com escritórios em Lisboa e no estrangeiro, Reino Unido e Holanda.

3. INTRODUÇÃO

Seja a nível de telecomunicações, meteorologia, defesa, astronomia, etc, estamos atualmente dependentes dos satélites artificiais que rondam a terra com os seus múltiplos sensores. Estes satélites, compostos por inúmeros sensores que funcionam na gama dos infravermelhos ou em comprimentos de onda maiores (micro-ondas, Planck), necessitam de sistemas de refrigeração que mantenham estes a temperaturas criogénicas, para o seu bom funcionamento e de modo a não haver interferência com a leitura dos mesmos.

O *Large Pulse Tube Cooler 50 K*, pela Air Liquide Advanced Technologies, desenvolvido para as missões Meteosat Third Generation, MUSIS-CSO e IASI-NG [1], e o *50-80K Stirling Cooler* da Airbus Defence and Space, para a missão Sentinel-3 [2], são alguns exemplos de criorrefrigerador que podem ser utilizados nestas aplicações. O problema destes refrigeradores é que utilizam compressores mecânicos que desenvolvem vibrações que por sua vez são transferidas para os sensores.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um criorrefrigerador, para temperaturas de 40 K e de 80 K, sendo isento de vibrações.

3.1. Enquadramento

Este projeto proveio de um concurso criado pela Agência Espacial Europeia (ESA, *European Space Agency*) com o propósito de desenvolver um sistema de refrigeração para temperaturas de 40 e de 80 K, isento de vibrações, a integrar em futuros satélites espaciais.

Grande parte dos satélites espaciais são munidos de sensores de infravermelhos, tendo estes o intuito de observar a Terra e o Universo. Para garantir o bom funcionamento dos referidos sensores é necessário que estes estejam numa gama de temperaturas bastante sensível, acima da qual o próprio satélite emana radiação infravermelha que cria ruído nas leituras dos mesmos, e claro, serem completamente isentos de vibrações. Com este propósito, foi criado um concurso pela ESA para se desenvolver um criorrefrigerador isento de vibrações, sendo neste caso para uma gama de temperaturas de 40K a 80K.

Após ponderação dos vários tipos possíveis de criorrefrigeradores, foi selecionado um criorrefrigerador com compressor de adsorção integrado e ciclo de Joule Thomson (JT), tendo como exemplo o modelo utilizado na missão Planck [3], ilustrado na Figura 3-1, e os estudados pela divisão de criogenia da Universidade de Twente [4].

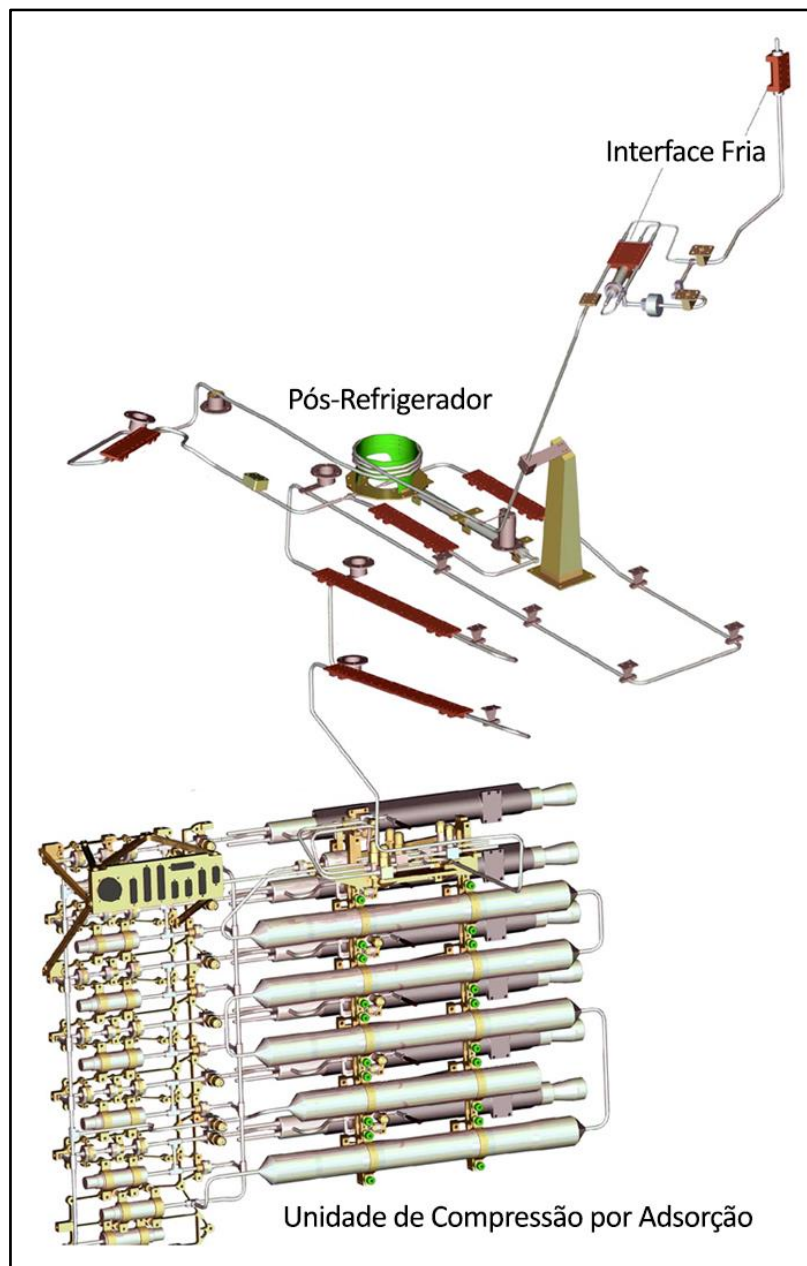


Figura 3-1 - Criorrefrigerador integrado na missão Planck [5].

O criorrefrigerador final compreenderá dois estágios de refrigeração, um para 40 K e outro para 80 K, todavia este projeto irá abordar apenas um, o estágio referente a 80 K.

3.2. Ciclo Joule-Thomson com Compressor de Adsorção

O Ciclo de Joule-Thomson (JT), nomeado em homenagem a James Prescott Joule e William Thomson, é baseado num efeito por eles descoberto em 1852, que observa uma diminuição de temperatura de um gás a alta pressão quando este é obrigado a passar por constrangimento (normalmente uma válvula ou meio poroso) dando-se uma expansão isentálpica.

Os compressores de adsorção, tal como anteriormente referido, têm como principal característica a isenção de peças móveis e consequentes vibrações. O seu funcionamento, tal como o seu nome indica, baseia-se no efeito de adsorção e dessorção de um gás num meio adsorvente. A baixas temperatura o gás é adsorvido pelo adsorvente, já no aquecimento da célula no qual estão contidos os dois materiais (célula de adsorção), o gás expelido, que não tendo espaço por onde se expandir (normalmente restringido por válvulas de retenção) aumenta a sua pressão.

Na Figura 3-2 está esquematizado o ciclo JT com compressores de adsorção, dividindo-se em duas partes: unidade de compressão e estágio frio.

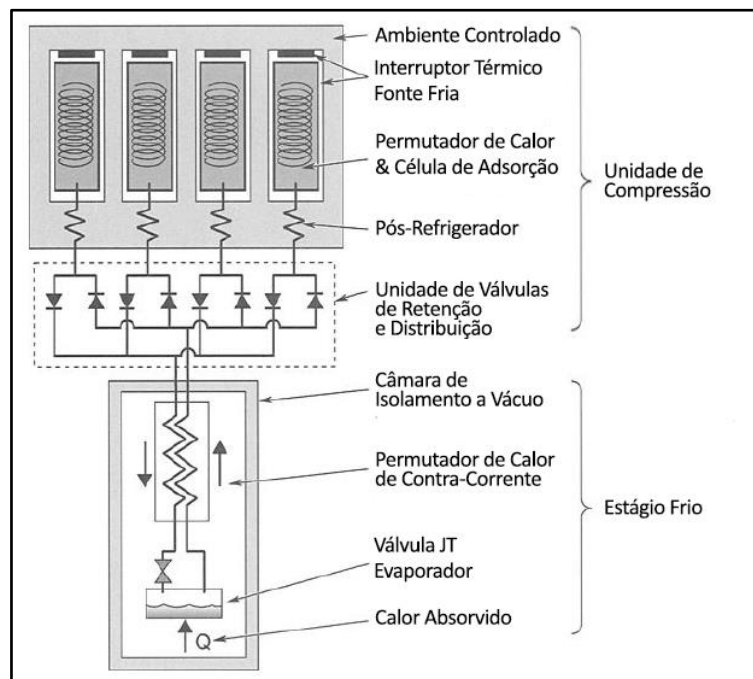


Figura 3-2 – Esquema do ciclo Joule-Thomson com compressor de adsorção (Adaptado de [6]).

Considerando a entrada do gás na célula de adsorção o ponto inicial do ciclo, este entra em contacto com o material adsorvente que se encontra arrefecido, visto o interruptor térmico assim o ter previamente arrefecido para a baixa temperatura da fonte fria à qual está conectado (radiador), possibilitando a adsorção do referido gás.

Após a entrada do gás, o interruptor é desligado, iniciando-se o aquecimento do adsorvente, que liberta o gás adsorvido (fase A, Figura 3-3). O calor distribuído é através do permutador presente no interior do reservatório de pressão. O gás ao ser libertado passa por um pós-arrefecedor que garante uma primeira fase de arrefecimento, ficando, este, retido no compressor até ultrapassar a pressão mínima que permite a passagem através da válvula de retenção.

Após a ativação da válvula (fase B, Figura 3-3), o gás vai de encontro aos gases de alta pressão provenientes dos outros 3 compressores. O aquecimento do interior da célula de adsorção mantém-se ativado até todo o gás sair de dentro deste.

O conjunto de gases de alta pressão segue pelo permutador de calor de contra corrente, onde é arrefecido ao passar pelo gás de baixa pressão, que por sua vez aquece o outro, em sentidos inversos.

O gás, ainda em alta pressão, segue para a válvula JT que garante a expansão deste de forma a originar a condensação do gás, que por sua vez é acumulado num evaporador que absorve o calor do meio envolvente de forma a evaporar o condensado. O gás evaporado passa então pelo permutador, em baixa pressão, é encaminhado pelas válvulas de retenção, visto já não haver gás de alta pressão do lado oposto, encaminhando-se assim de volta para a célula de adsorção. A célula encontra-se arrefecida, visto manter o interruptor térmico ligado após a saída de todo o gás (fase C, Figura 3-3), até se verificar a entrada de todo o gás de baixa pressão (fase D, Figura 3-3).

Para o bom funcionamento do criorrefrigerador é necessário que o estágio frio mantenha um escoamento constante, tal é conseguido através de 4 células de adsorção, mantendo sempre uma célula a enviar gás de alta pressão para o estágio frio, outra a receber o gás de baixa pressão proveniente do evaporador, estando as outras duas em fase de transição.

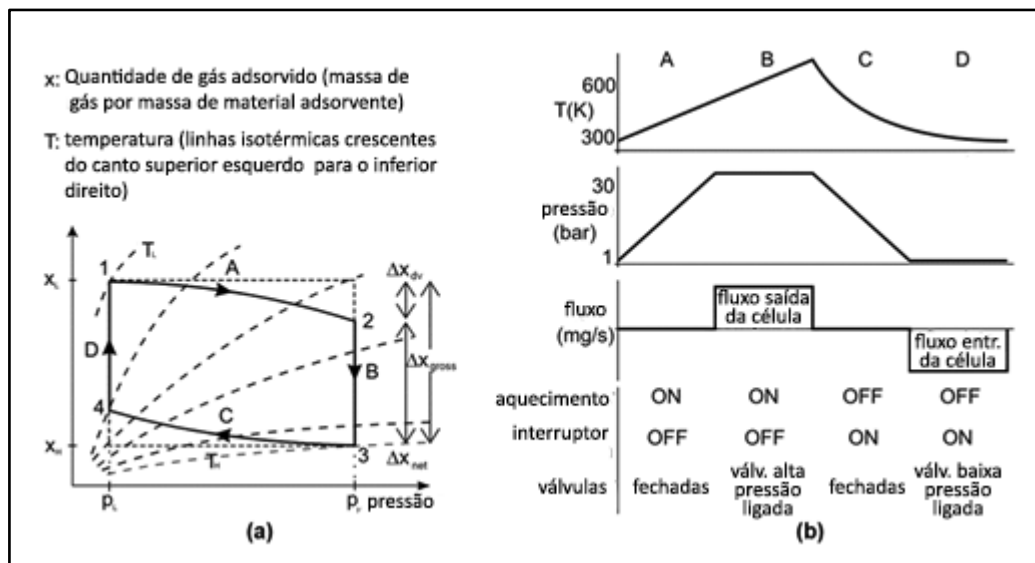


Figura 3-3 - Evolução das variáveis no interior do compressor (a) e sequência de (des) ativação dos componentes com comportamento cíclico [7].

Os componentes referidos serão resumidamente explicados nos seguintes subcapítulos, cuja ordem é definida considerando o percurso do gás a partir da entrada na célula de adsorção.

3.2.1. Célula de adsorção

Todo o ciclo de refrigeração contém compressores, ou componentes com a função equivalente. Sendo este um compressor de adsorção é necessário um reservatório de pressão (também referido neste trabalho como célula de adsorção) que contenha o material adsorvente sólido e que suporte a alta pressão criada pelo gás adsorvido após dessorção e retenção do mesmo. Para tal optou-se por um reservatório esférico com capacidade para 1L com capacidade de aproximadamente 500 g de material adsorvente.

Para homogeneizar a temperatura do gás no interior da célula, é utilizado um permutador de calor, com ligação térmica direta ao sistema de aquecimento e ao interruptor térmico no exterior da esfera, que permitem um aquecimento e arrefecimento mais uniforme de todo o material interno, respetivamente.

3.2.2. Interruptor Térmico

O arrefecimento da célula de adsorção dá-se pela ligação térmica feita entre esta e a base arrefecida do conjunto (fonte fria). Esta ligação necessita que seja cíclica, de modo a que seja interrompida durante a fase de aquecimento, caso contrário originaria dissipação de calor para a base, e assim, um desperdício de energia. Por esta razão a ligação térmica entre a célula e a fonte fria é feita através de um interruptor de calor. Estes interruptores podem ser [8]:

- Mecânicos – a condução térmica é feita através do contacto, com força elevada, exercido entre dois corpos. Este tipo de interruptores pode ser atuado electromagneticamente, utilizando ligas de memória de forma ou então utilizando materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica:
- *Fluid Loop* – O controlo da condução térmica é feita através do controlo do transporte de um fluido de trabalho entre as fontes quente e fria. Este deslocamento do fluido pode ser controlado por bombeamento mecânico ou por capilaridade;
- *Gas Gap* (Espaçamento gasoso) – a ligação térmica é assegurada pela presença de gás entre dois componentes muito próximos. O controlo da pressão do gás entre estes dois componentes permite regular a condução térmica. A gestão do gás pode ser feita utilizando carvões adsorventes (mesmo principio de funcionamento da célula de adsorção). Este tipo de interruptor é isento de partes móveis.

O tipo de interruptor seleccionado foi o referido em último, *Gas Gap*, devido à sua isenção de partes móveis e consequentes vibrações.

3.2.3. Pós Refrigerador

O pós-refrigerador, tal como anteriormente descrito, serve para arrefecer o gás proveniente da célula de adsorção. Este é formado por um dissipador de calor (bloco de cobre) fixo à base arrefecida do conjunto que se mantém à temperatura da mesma; e por um tubo termalizado, percorrido pelo gás, envolto nesse mesmo bloco.

3.2.4. Válvulas de retenção

As válvulas de retenção têm como função a separação dos gases de alta e baixa pressão, consoante a fase a que se encontra cada compressor. Tal é possível ao garantirem o escoamento num único sentido de forma automática, sendo impedido de se efetuar no sentido contrário. Dispondo duas destas válvulas em paralelo e com sentidos contrários, permitem que o gás em alta pressão saia da célula, enquanto a outra válvula permite a entrada do de baixa pressão.

3.2.5. Permutador de Calor de Contra Corrente

O permutador de calor de contra corrente garante, através do cruzamento sem mistura dos dois gases, um arrefecimento do gás de alta pressão, de forma a chegar a temperaturas suficientemente baixas de modo a garantir a liquefação através de uma expansão, e aquecimento no gás de baixa pressão, não sendo, assim, necessária tanta energia para aquecer o gás na célula de adsorção.

3.2.6. Válvula de Expansão (JT)

A válvula de expansão é, de forma simplificada, uma válvula que contém um constrangimento no seu interior, de forma a aumentar a velocidade de escoamento, e a maximizar a diminuição de pressão do gás entre a passagem pelo orifício e a entrada no evaporador, que tendo um maior volume propícia a expansão do gás.

3.2.7. Evaporador

O evaporador terá como função a retenção do condensado gerado na mudança de fase gerada pela válvula JT, até ocorrer a transformação de volta ao estado gasoso através do calor absorvido à envolvente, gerando-se assim, um arrefecimento na área desejada.

4. REQUISITOS DO PROTÓTIPO

Nesta secção são referidos vários aspetos importantes a ter em conta, desde as transferências térmicas aos processos de fabrico.

4.1. Transferência Térmica

Sendo um refrigerador, as transferências térmicas dos vários componentes do conjunto, entre os mesmos e com a envolvente, desempenham um papel fundamental no seu funcionamento, tanto a favor como contra este, dependendo da sua função.

Consoante a função desejada ou a fase do ciclo térmico em que se encontra, pode ser necessário maximizar ou minimizar as trocas de calor entre componentes. Este controlo é feito através da criação, otimização ou anulação das condições necessárias para se verificar tais efeitos.

Começando pelo compressor, a ligação térmica fonte fria – interruptor térmico é necessária, pois é ela que garante o arrefecimento do material adsorvente, tal como a ligação interruptor térmico – célula de adsorção. Todas as ligações térmicas entre o material adsorvente e a fonte fria que não passem pelo interruptor são a evitar, e em último caso, minimizar, como é o caso dos suportes estruturais. Os suportes estruturais da célula de adsorção, numa liga de titânio devido à sua baixa condutividade térmica, foram projetados de forma a garantir a integridade estrutural tendo o rácio comprimento/secção otimizado, minimizando a transferência térmica entre a célula e a fonte fria.

Ainda no compressor, é necessário assegurar as ligações térmicas da fonte fria para os pós refrigeradores e válvulas de retenção, pois ajudam a arrefecer o gás de alta pressão de modo a facilitar a sua condensação.

Após a unidade de compressão, todos os componentes do estágio frio necessitam de estar isolados da fonte fria, de forma a otimizar a eficiência do refrigerador minimizando possíveis fontes de potências parasitas condutivas e/ou radiativas.

4.2. Ambiente Espacial

A envolvente, de qualquer projeto, é um fator de extrema importância, visto poder limitar opções devido a temperatura, pressão, exposição a substâncias corrosivas, etc.

O presente projeto tem em vista a sua utilização no espaço, desse modo, a corrosão devido a exposição de substâncias é um fator que não é tido em conta neste estágio do projeto. A pressão será quase nula devido ao facto de se encontrar em vácuo quase perfeito. A diferença de pressão nesta ordem, pode levar a outros aspetos importantes. A nível geométrico (criação de bolsas de obstruídas) sendo necessário a utilização de furos passantes ou adicionados furos de menor diâmetro que permitam a ventilação dos mesmos, garantindo que não se formas bolsas de ar entre o fundo do furo e o parafuso. Já a nível molecular é possível verificar a desgaseificação dos materiais utilizados (perda de moléculas presentes nos materiais, tais como oxigénio proveniente do ar, azoto, água, dióxido de carbono – desgaseificação) podendo levar a perda de propriedades das peças e enfraquecimento das ligações soldadas.

Relativamente às transferências térmicas, são desprezáveis a nível convectivo mas altamente relevantes quanto à radiação e condução.

4.3. Cargas no lançamento

Visto esta ser uma aplicação espacial, necessita de ser lançada e suportar as cargas a que está sujeita durante o lançamento. As solicitações máximas admitidas são: cargas quase estáticas, 25Gs em todas as direções e cargas dinâmicas com a qualificação sinusoidal presente na Tabela 4-1 e vibrações aleatórias descritas na Tabela 4-2 e o espetro de choque da Tabela 4-3.

Tabela 4-1 - Qualificação sinusoidal das cargas dinâmicas.

	\perp ao Plano de Montagem	// ao Plano de Montagem
5-25 Hz	± 10 mm	± 10 mm
25-100 Hz	25 g (consideração futura)	25 g (consideração futura)

Tabela 4-2 - Vibrações aleatórias das cargas dinâmicas.

Intervalo de Vibração	⊥ ao Plano de Montagem	// ao Plano de Montagem
	Níveis de Qualificação	Níveis de Qualificação
20-100 Hz	+3 dB/Oct	+3 dB/Oct
100-300 Hz	0,3 g ² /Hz	0,3 g ² /Hz
300-2000 Hz	-5 dB/Oct	-5 dB/Oct
GLOBAL	13,1 grms	13,1 grms

Tabela 4-3 - Espectro de choque.

Segundo todos os eixos	
Frequência (Hz)	SRS (Q=10) Níveis de qualificação (g)
100	20
1000	2000
10000	2000

4.4. Processos Fabrico

Todas as peças desenvolvidas tiveram em vista a sua possibilidade de fabrico consoante a tecnologia disponível na indústria.

Os componentes contemplados na secção 6 foram maquinados na empresa através de processos de **torneamento e fresagem**.

Já os processos de ligação (soldadura e brasagem), previstos para certas peças, tiveram que ser tidos em conta de modo a serem preparados na empresa de forma a viabilizar os referidos processos, consoante cada tipo de ligação.

- **Soldadura por feixe de eletrões**
- **Soldadura TIG, manual e orbital**
- **Soldadura por fricção linear**
- **Brasagem a vácuo**

Todos estes processos serão explicados, de forma breve, de seguida.

4.4.1. Torneamento

Processo de maquinação no qual é retirada material de uma peça em rotação através da fricção contra uma ferramenta estática (apenas se movendo segundo o eixo de rotação da peça, movimento de avanço, e perpendicularmente a este, movimento de profundidade). Nos tornos manuais é estipulada uma velocidade de rotação, podendo a velocidade de avanço feita manual ou automaticamente. Existe uma grande variedade de ferramentas, sendo selecionadas consoante as propriedades do material base e a geometria pretendida para o componente.

4.4.2. Fresagem

Este processo é realizado friccionando uma ferramenta, com múltiplas arestas de corte, em rotação contra uma peça estática. Nas fresadoras CNC, todos os parâmetros são estipulados em antemão (velocidades, percurso, tipo de fresa, etc) sendo todo o processo prático executado de forma automática, podendo este ser realizado por partes ou de uma só vez, consoante as especificidades da peça a maquinar. À semelhança do torneamento existe um grande número de ferramentas dedicadas a este processo, sendo elas selecionadas por: tipo de material base, geometria da peça base, geometria a obter, etc.

4.4.3. Soldadura por Feixe de Eletrões

A soldadura por feixe de eletrões é um processo que leva os materiais base a uma temperatura de fusão, na zona desejada, através da projeção de eletrões, através de lentes eletromagnéticas, contra as superfícies a ligar. A colisão destes eletrões, no material, gera calor. Este processo garante uma boa penetração e altas velocidades de avanço. Este processo precisa de ser executado em vácuo.

4.4.4. Soldadura por TIG

A soldadura com eléctrodo não consumível de tungsténio, protegido por gás inerte (Ar e/ou He), TIG (*Tungsten Inert Gas*) é um processo de ligação que permite um grande controlo dos parâmetros necessários à sua execução, tais como: o fluxo de gás protetor; velocidade de avanço. Este controlo pode tanto ser feito pelo operador, soldadura manual, ou pelo programador, soldadura automatizada. O controlo de

todos estes parâmetros garantem uma soldadura de boa qualidade, especialmente em espessuras muito finas, e ótimo acabamento superficial.

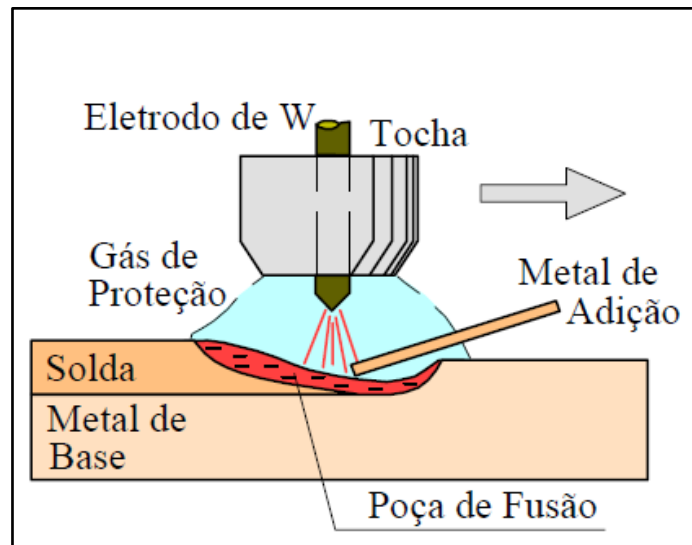


Figura 4-1 - Processo de soldadura TIG [9].

4.4.5. Soldadura por Fricção Linear

A soldadura por fricção linear utiliza a dissipação de energia através do atrito entre componentes, para gerar calor e chegar às temperaturas de fusão dos materiais a ligar, na zona de contacto. Este processo de ligação tem como principal característica a possibilidade de unir materiais dissimilares. A soldadura inicia-se dispondo as duas peças de forma a ter o seu eixo de rotação colinear (Figura 4-2), rodando uma peça (a) e comprimindo-a contra a outra (b), ao se transformar a energia cinética em energia calorífica, através do atrito, inicia-se o aquecimento das peças (c) que levará à fusão do material e consequente ligação (d).

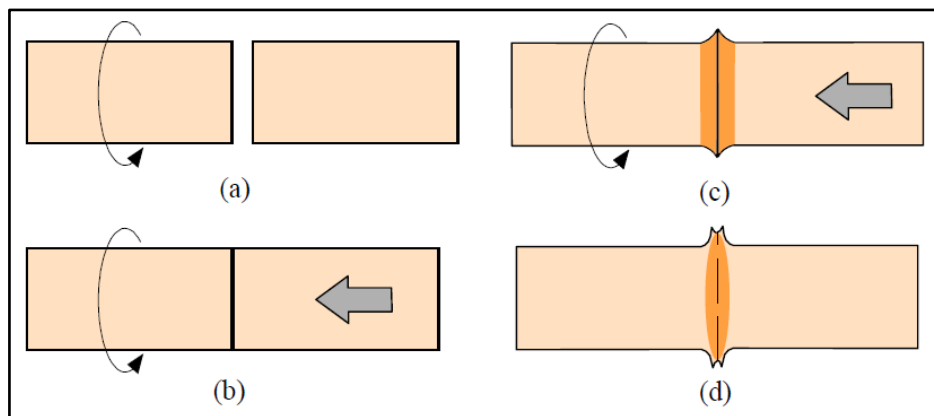


Figura 4-2 - Soldadura por fricção: rotação (a), compressão (b), aquecimento (c) e fusão (d) [9].

Existem dois tipos de fricção linear: inercial e convencional. A soldadura convencional aplica a rotação enquanto aplica uma pressão axial em simultâneo, já a inercial aplica uma rotação, que é mantida apenas inercialmente (desacoplado do motor, rodando através de um volante de inércia) enquanto a pressão axial é aplicada.

O tipo de soldadura utilizado no projeto é do tipo inercial, pois este garante uma maior resistência na zona soldada devido às suas linhas de fluxo em espiral, enquanto a convencional cria linhas de fluxo radiais, tal como ilustrado na Figura 4-3 [10]

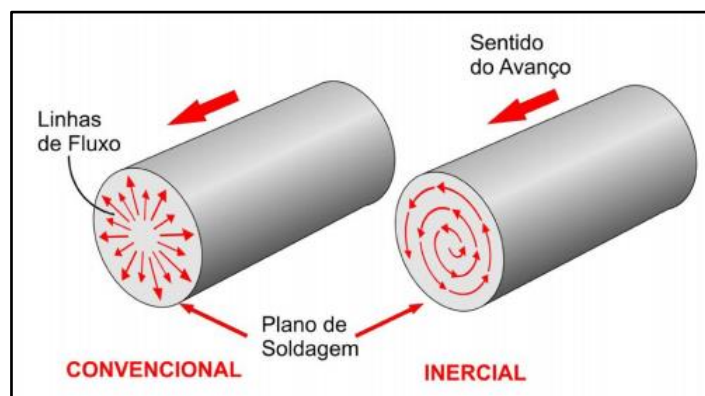


Figura 4-3 - Linhas de fluxo do escoamento plástico dos dois tipos de soldadura por fricção [10].

4.4.6. Brasagem a Vácuo

A brasagem é um processo de ligação, no qual se funde apenas o material adicionado, solda, que se difunde por ação da capilaridade nos materiais base, formando uma solução sólida responsável pela união.

Nas brasagens a vácuo, ao contrário da brasagem manual, a fusão da solda dá-se de forma simultânea em toda a zona a unir, visto todos os componentes estarem à mesma

temperatura, cria também uma ligação mais forte. O facto o processo se executar em alto-vácuo garante uma proteção contra a formação de óxidos, dando à peça um excelente acabamento visual e limpeza.

Este processo é feito numa câmara de vácuo, que facilita o controlo da temperatura no seu interior e garante um aquecimento e arrefecimento homogéneos, diminuindo as tensões internas das peças, visto que toda a peça sofre o mesmo ciclo térmico uniformemente.

4.5. Componentes Fluídicos

A *Swagelok* é uma empresa privada com bastante relevo em variadas indústrias, nomeadamente a química e farmacêutica, oferecendo variadas soluções de componentes para projetos de distribuição e controlo de fluídos de baixa e alta pressão. Um grande número de peças não desenvolvidas pelo autor, são fornecidas por esta empresa, podendo ser consultados na sua página da web [11]. Os diâmetros de entradas e saídas dos componentes utilizados são de 1/8", 1/4" e 1/2", sendo estas medidas standard nas unidades imperiais, A medição em polegadas é geralmente utilizada em equipamentos com escoamento gasoso, tais como circuitos pneumáticos.

4.5.1. Ligações desmontáveis

As ligações desmontáveis garantem uma montagem e manutenção por partes. Este é um aspeto de extrema importância e que requer algum cuidado no seu posicionamento. Poder-se-ia colocar ligações não permanentes entre todos os componentes, garantindo uma maior facilidade na manutenção de, por exemplo, um único componente, ou uma montagem por partes, porém tal iria aumentar a massa do conjunto, o volume ocupado e o custo do projeto. Outra solução extrema seria usar ligações permanentes em todo o conjunto, porém aí ter-se-ia que mover o conjunto como um só, e a manutenção seria muito mais laboriosa.

Este tipo de ligações permite também reduções e aumentos de diâmetro de tubo, entre os quais se estabelece a ligação, excluindo-se a soldadura necessária para a ligação dos componentes específicos para este efeito, de difícil execução em peças de tão diminuta

dimensão. Os componentes utilizados nestas ligações estão representados na Figura 4-4 e as suas referências listadas na Tabela 4-4.



Figura 4-4 - Ligação do tipo VCR® ([11] – “VCR® Metal Gasket Face Seal Fittings”).

Tabela 4-4 - Referências dos componentes *Swagelok* utilizados nas ligações desmontáveis.

Peça	1/8'	1/4'
Porca	SS-2-VCR-1	SS-4-VCR-1
Junta Retentora	SS-2-VCR-2	SS-4-VCR-2
Flange	1/8': SS-2-VCR-3-2MTW	1/8': SS-4-VCR-3-2MTW 1/4': SS-4-VCR-3-4MTW
Parafuso	SS-2-VCR-4	SS-4-VCR-4

4.5.2. Tubagem

Os tubos de ligação permitem a transmissão de fluido entre componentes espaçados, podendo ter variados diâmetros e adquirir variadas formas de percurso consoante o espaço livre entre os componentes a conectar. Este percurso é, contudo, limitado pelo raio de curvatura mínimo para que o material se deforme plasticamente sem entrar em regime de ruptura e sem restringir o escoamento no interior do tubo. O raio de curvatura mínimo usualmente utilizado em tubos desta gama de dimensões é o sêxtuplo do diâmetro externo do tubo a curvar.

4.5.3. Ligações em L

Como descrito na secção 4.5.2, os raios de curvatura limitam o percurso feito pelos tubos de ligação, tornando o projeto mais volumoso e de difícil montagem e manutenção. Por esta razão surgem as ligações em L, que garantem um ângulo de 90° num

espaço bastante menor. Estas ligações necessitam de duas soldadura (uma à entrada e outra à saída) o que encarece o projeto, porém permite cumprir os requisitos dimensionais e mecânicos. No entanto a sua grande mais valia reside no facto de poder integrar nessas mesmas peças um redutor, garantindo um diâmetro de saída diferente do diâmetro da entrada. As ligações utilizadas foram:

- Ligação 90° 1/4': 6LV-4MW-9
- Ligação 90° 1/8': 6LV-2MW-9
- Ligação 90° 1/4' – 1/2': 6LV-8MW-9-4

Os componentes são observáveis na Figura 4-5.

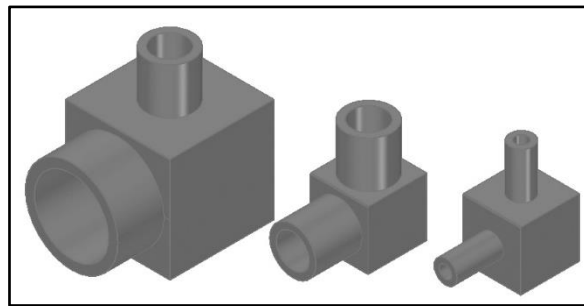


Figura 4-5 - Vista isométrica das ligações em L de 1/2'-1/4', 1/4' e 1/8', respetivamente [11].

4.5.4. Ligações em T

As ligações em T são componentes que permitem a ligação de 3 tubos, permitindo a conjugação entre diâmetros iguais e/ou diferentes.

Os tipos de fixação das ligações à tubagem, utilizadas neste projeto, foram dos tipos: bicónico e soldada.

A ligação bicónica, ilustrada na Figura 3-1 (a), garante a estanquidade deformando as paredes dos tubos, sendo necessário substituir o tubo após cada desmontagem. As ligações utilizadas têm um diâmetro de saída igual, 1/4', tendo como referência SS-400-3 que inclui os 3 parafusos, estando o conjunto ilustrado na Figura 4-6 (b). Para se tapar uma destas saídas utiliza-se uma tampa, com ligação bicónica de 1/4', com a referência SS-400-P, representado na Figura 4-6 (c).

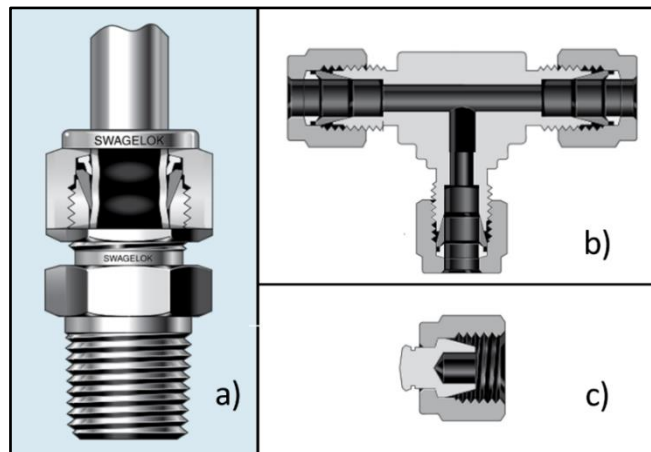


Figura 4-6 - Ligação bicónica (a), ligação em T (b) e tampa ([11] – “Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings”).

4.5.5. Redutores

Os redutores são adaptadores que têm como função a mudança da dimensão da secção, de forma estanque. Tal como ilustrado na Figura 4-7 (a), garantem uma espessura de igual entrada e saída, de 0,73 mm no presente caso, e permite a soldadura manual. O tamanho utilizado foi o de redução 1/8' para 1/4', com a referência 6LV-4MW-6-2, como ilustrado na Figura 4-7 (b).

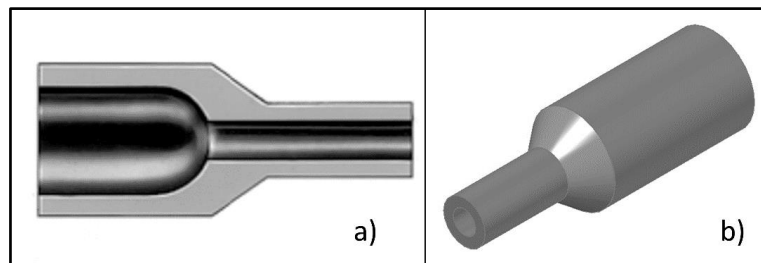


Figura 4-7 - Redutor esquematizado (a) e em vista isométrica (b), [11] – “Weld Fittings”).

4.6. Materiais

Os materiais a seguir apresentados, foram selecionados, consoante os componentes onde são aplicados, tendo em conta varios parâmetros, tais como: solicitações mecânicas, a necessidade de transmitir calor a outros componentes ou isolá-lo e os coeficientes de expansão (previstos de modo a não afetar outros componentes).

4.6.1. Liga de Titânio Grau 5

O titânio é um material predominante no sector aeroespacial devido à sua grande resistência mecânica e relativa baixa massa volúmica quando comparada a outros metais.

A liga de titânio ASTM Ti6Al4V grau 5 (Ti com adição de 5,5-6,75%Al, 3,5-4,5%V, 0,2%O, 0,08%C, 0,05%N, 0,03%Fe, 0,042%Outros) é uma liga mais resistente mecanicamente quando comparada com titânio em estado puro, como por exemplo o titânio comercialmente designado por grau 1 (TCPG1), mantendo a rigidez, perdendo, porém, cerca de metade da sua capacidade de condução (coeficiente de condutividade [12]) sendo favorável para o presente projeto. Na Tabela 4-5, observam-se as diferenças entre os dois materiais relativamente às características mecânicas.

Tabela 4-5 - Comparação de Propriedades de Ligas de Titânio [13].

	Massa Volúm.	Resist. à Tracção	Tensão Cedência	Módulo Elast.	Coef. Expansão	Condut. Térmica	Resist. Elétr.
	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	(0-100°C)	[W/m.K]	[ohm.cm]
TI6AL4V	4 429	896	828	114	8,8	7,2	170
TCPG1	4 510	241	172	103	8,6	16,3	56

Esta liga é indicada para peças solicitadas por cargas elevadas, e que necessitem de isolamento térmico.

4.6.2. Aço Inoxidável AISI 304L

O aço inoxidável AISI 304L, é uma liga cromo-níquel austenítica, de boa maquinabilidade, tendo uma excelente resistência à corrosão. A sua composição, pode ser consultada na Tabela 4-6, e as suas propriedades mecânicas na Tabela 4-7.

Tabela 4-6 Composição química do aço 304L [14].

Liga	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)
AISI 304L	0,03	1,0	2,0	0,045	0,03	18-20	8-10,5

Tabela 4-7 - Propriedades do aço 304L [14].

	Massa Volúm.	Resist. à Tracção	Tensão Cedência	Módulo Elast.	Coef. Expansão	Condut. Térmica
	kg/m ³	MPa	MPa			
AISI 304L	7 900	700	220	200	16,5	15

4.6.3. Cobre de Alta Condutividade Livre de Oxigénio

O cobre é altamente reconhecido pelas suas altas condutividades térmica e elétrica, sendo desse modo um material de extrema relevância em ciclos térmicos, já a sua resistência mecânica não permite que o material seja sujeito a esforços de nível estrutural.

A liga de cobre utilizada neste projeto é a liga designada por ASTM OFHC (Livre de Oxigénio, Alta Condutividade), que tal como o seu nome indica apresenta um elevado coeficiente de condutividade, em especial a baixas temperaturas. Na Figura 4-8 estão apresentados os coeficientes de condutividade dos materiais mais utilizados em criogenia, inclusivamente a liga de titânio apresentada na secção 4.6.1, ASTM Ti6Al4V (identificada como Ti-6Al-4V).

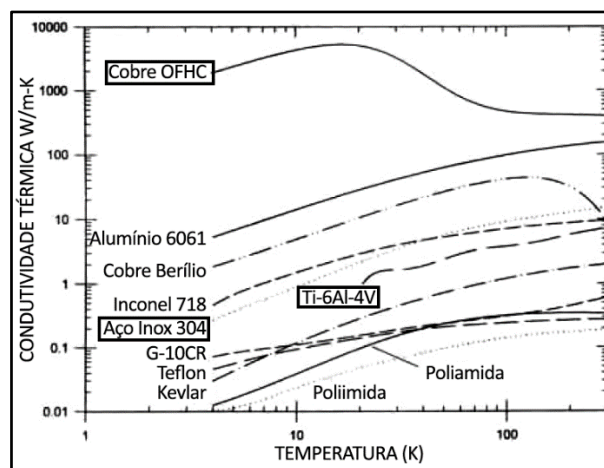


Figura 4-8 - Condutividades térmicas em função da temperatura, de diversos materiais [15].

4.7. Software

O software de design assistido por computador (CAD - *Computer Aided Design*) utilizado neste projeto foi o Solid Edge ST7. Este software, desenvolvido pela Siemens, permite o desenvolvimento de sólidos, superfícies, montagem de componentes, e análises mecânicas e térmicas.

5. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo é exposto todo o processo iterativo para a obtenção da geometria final das peças pertencentes ao crio-refrigerador, tais como: aspetos fundamentais, sequência de desenvolvimento do design, alterações do mesmo, razões por detrás dessas mesmas alterações, avaliação estrutural e/ou térmica, etc.

Tal como exposto na secção 3.2, o refrigerador será composto, de forma simplificada, por 2 subconjuntos de peças, apresentados na Figura 5-1: unidade de compressão (A,...,G) e estágio frio (H,I,J).

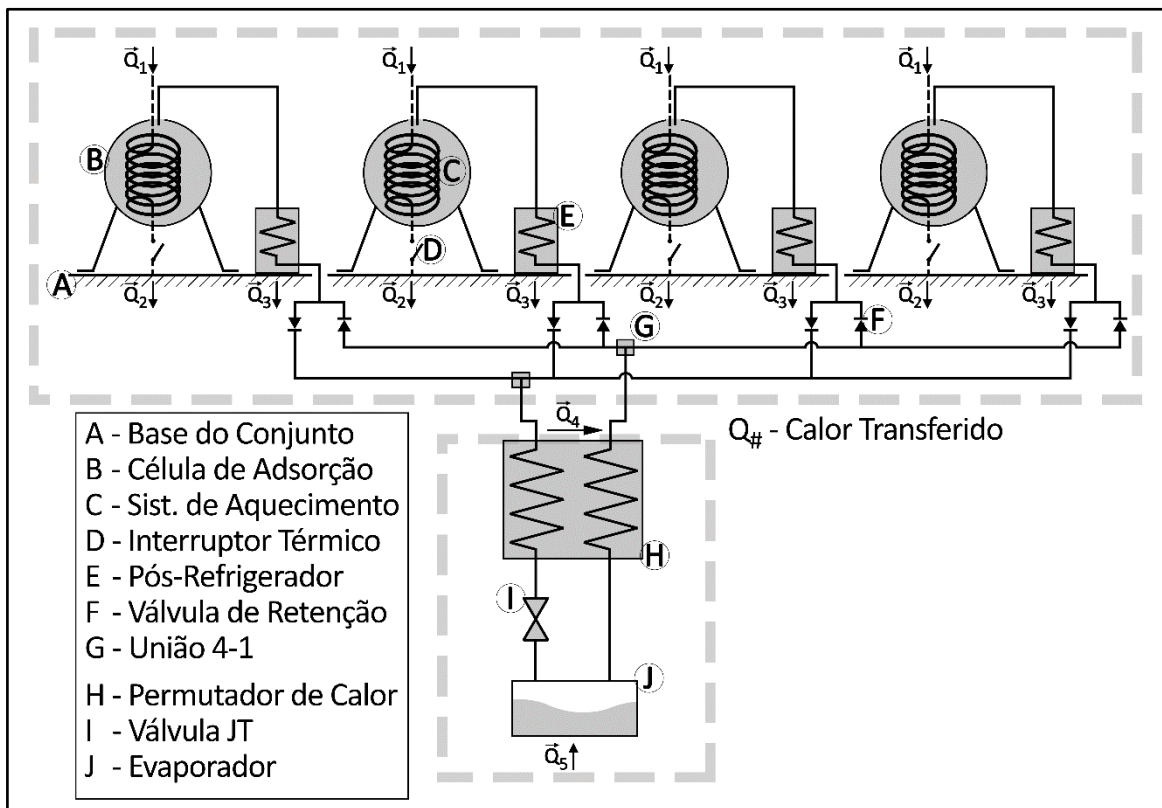


Figura 5-1 - Ilustração do ciclo e os principais componentes utilizados e desenvolvidos.

5.1. Unidade de Compressão

Admite-se como fazendo parte da unidade de compressão os seguintes componentes:

- Célula de Adsorção (5.1.1)
 - Hemisfério Superior
 - Hemisfério Inferior
 - Suportes Estruturais
- Interruptor térmico (5.1.2)
 - Bloco Quente
 - Cilindro de Afastamento
 - Bloco Frio
- Permutador de Calor (5.1.3)
 - Corpo Central
 - Faces de Transmissão
- Adaptador Bimetálico (5.1.4)
- Pós Refrigerador (5.1.5)
 - Bloco Frio
 - Tubo Envolvente
- Componentes Fluídicos

Neste subconjunto as relações térmicas entre as peças tem um fator de extrema relevância, que definem o material a ser utilizado, a sua geometria, e as interações entre componentes.

5.1.1. Célula de Adsorção

Após alguns estudos feitos antes do início do presente trabalho, foram estipulados alguns parâmetros, a seguir expostos e justificados:

- Célula esférica – é a geometria que otimiza as relações volume/superfície externa e espessura de parede/pressão interna máxima suportada. Estas relações permitem otimizar a massa do recipiente;
- Diâmetro interno de 124 mm – dimensionado de forma a conter a quantidade ideal de material adsorvente permitindo um ciclo contínuo de acordo com a potência frigorífica disponível para arrefecer as células;
- Parede com uma espessura mínima de 1,5 mm – suficiente para suportar uma pressão interna de 10 MPa;

- Saída através de um tubo com diâmetro interno de 4,95 mm e externo de 6,35 mm – compatível com os componentes *Swagelok* selecionados;
- Possibilidade de integração de um permutador de calor no interior da célula, tendo este ligação a um interruptor térmico sob a célula.
- Fixo à fonte fria.

Visto não ser acessível, de forma viável, o fabrico da esfera oca sendo uma só peça, foi necessário dividir esta em dois hemisférios, necessitando, posteriormente de uma ligação permanente de forma a garantir uma estanquidade. Para a integração de um sistema de suportes que garantam uma suspensão da célula relativamente à fonte fria, foi necessária a criação de 3 apoios que estabelecessem a ligação aos suportes, designadas por fixações da esfera.

Para a criação do hemisfério superior (Figura 5-2), começou-se pela criação da semiesfera e pela saída superior, tendo sido estes os elementos diretamente especificados. Devido ao comprimento da saída, foi necessário criar uma sobre-espessura de modo a não solicitar a base da mesma, e na parte superior da esfera de forma a não se verificar uma grande descontinuidade de parede da peça, estando estas sobre-espessuras em destaque na Figura 5-2 b).

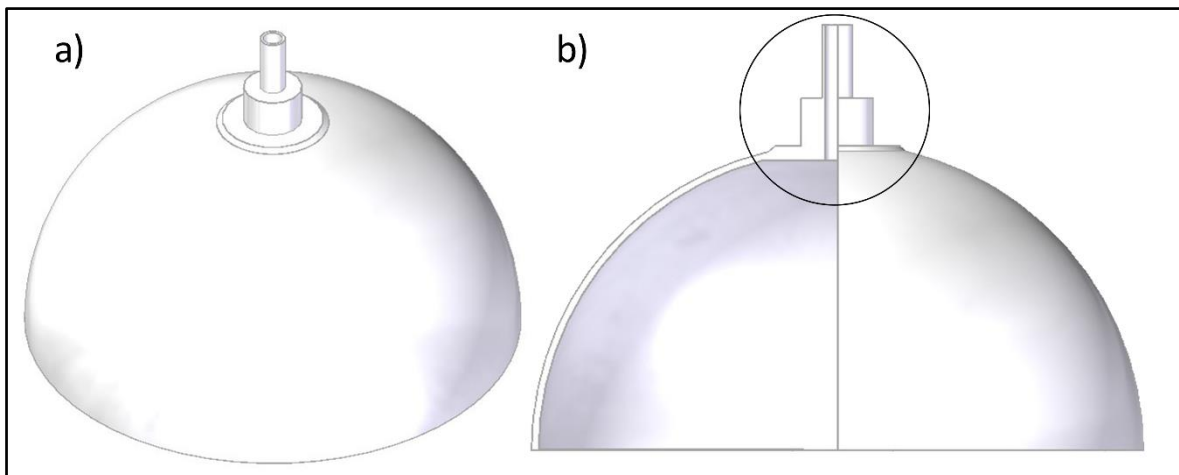


Figura 5-2 - Hemisfério superior da célula de adsorção (a) em vista isométrica e (b) em vista frontal com corte.

Relativamente ao hemisfério inferior, teve também como ponto de partida a forma esférica, necessitando ainda de integrar um adaptador para fazer a ligação permutador-

interruptor térmico, e as respetivas fixações aos suportes estruturais. Deste modo chegou-se à forma ilustrada na Figura 5-3.

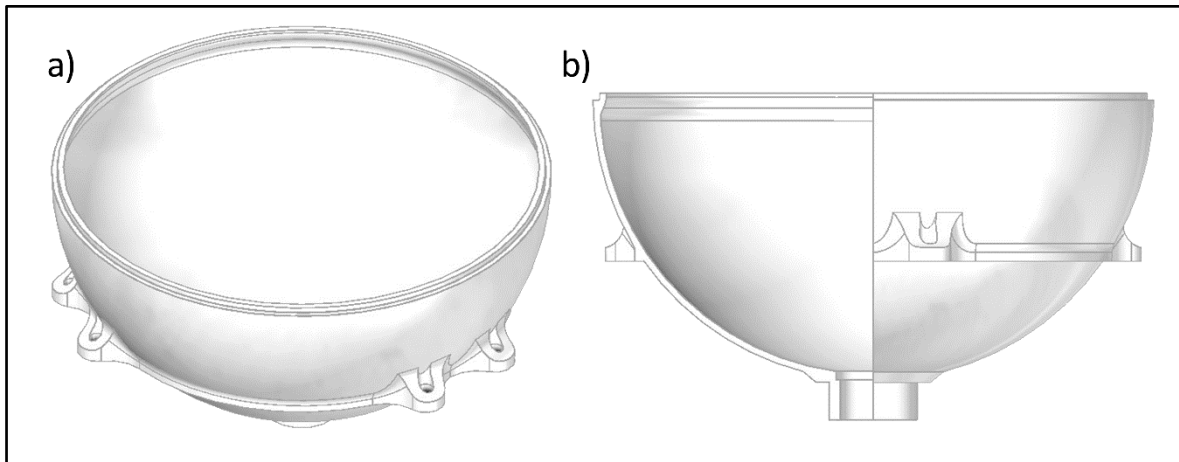


Figura 5-3 - Hemisfério inferior da célula de adsorção (a) em vista isométrica e (b) em vista frontal com corte.

A parte inferior do hemisfério homónimo está desenhado de forma a ser possível ser soldado o adaptador bimetálico (descrito na Secção 5.1.4), tendo também uma sobre-espessura pelos motivos anteriormente descritos quanto ao hemisfério superior, ilustrados na Figura 5-4.

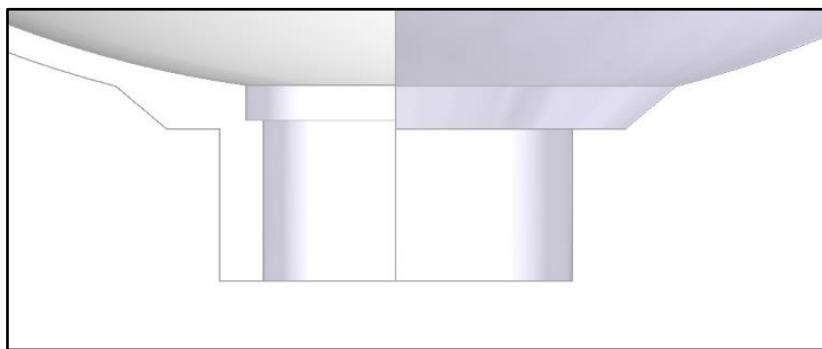


Figura 5-4 - Detalhe da zona de integração do adaptador bimetálico.

As orelhas, observáveis com melhor detalhe na Figura 5-5, estão integradas num “anel” de suporte de forma a distribuir as tensões em toda a envolvente da semiesfera. As orelhas propriamente ditas estão também desenhadas de forma a atenuar as diferenças de espessura da parede da célula para as orelhas. A fixação aos suportes foi inicialmente idealizada através de uma ligação roscada, em que o furo roscado estaria nos suportes, porém esta solução iria aumentar bastante a distância dos furos ao eixo da esfera, o que iria enfraquecer o conjunto, devido à dimensão da cabeça do parafuso a utilizar (parafuso

sextavado interior – ISO 23249) e correspondente anilha (anilha plana estreita - ISO 7092), optou-se por fazer o aperto pela parte de baixo, passando o furo roscado para a orelha e o liso para os suportes, pois apesar de tornar a montagem mais complexa, tornou-se o conjunto mais rígido. Foi ainda necessário garantir que o furo roscado fosse passante, de modo a impossibilitar a criação de bolsas de ar, aquando no espaço.

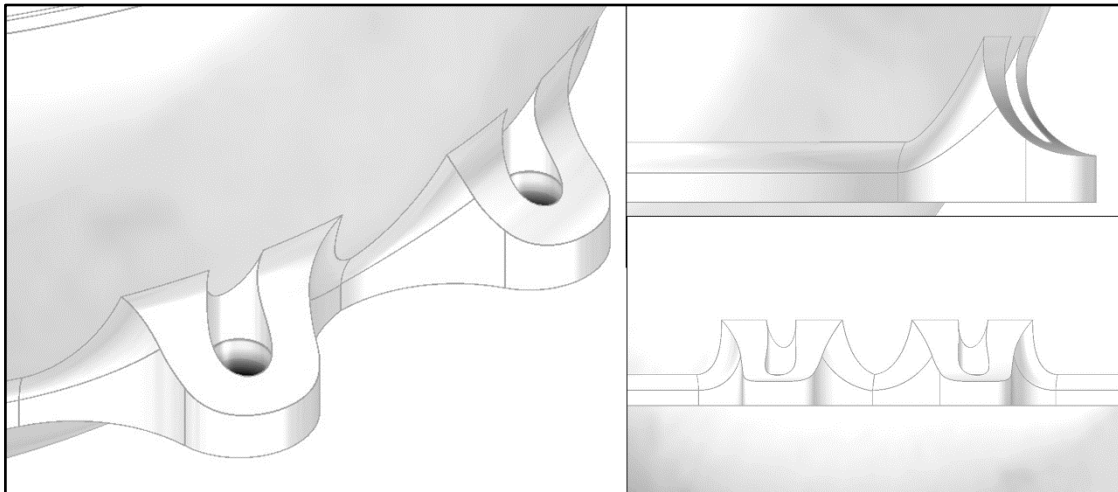


Figura 5-5 - Orelhas da célula de adsorção em vista isométrica (esq), lateral (sup. dir.) e frontal (inf. dir.).

A zona de ligação entre hemisférios necessitou também de algum cuidado de modo a garantir o seu encaixe e máximo contacto de forma a se otimizar o processo de soldadura por feixe de elétrons, através do toleranciamento de forma de cilindridade na parede vertical da zona de ligação, e planeza na horizontal.

Para a definição da geometria e dimensões dos suportes estruturais, foi elaborado um estudo em paralelo, não executado pelo autor deste trabalho, e portanto não contemplado no presente documento, que permitiu seleccionar o melhor perfil para o corpo das mesmas, considerando o material Ti6Al4V, e os tipos de cargas a suportar. Desse modo chegou-se ao perfil em “T”, com um banzo de 15 mm de largura e 3.5 mm de espessura, e alma com uma altura de 4 mm e 4 mm de espessura, com a adição de duas bases em cada extremo para possibilitar a fixação aparafusada à base e às orelhas, tal como ilustrado na Figura 5-6.

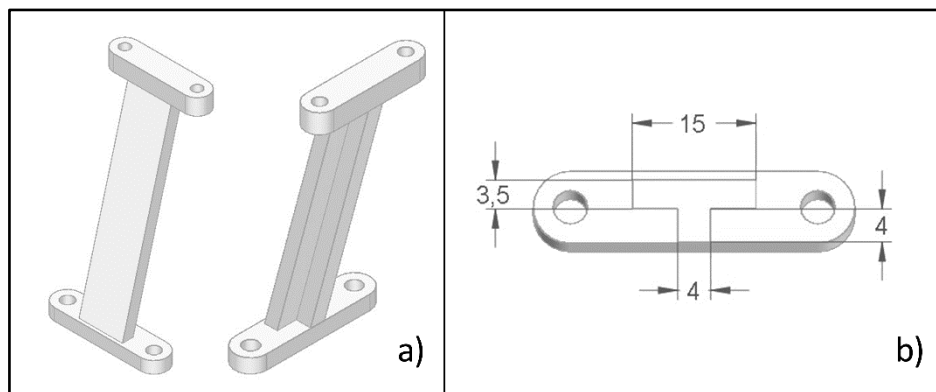


Figura 5-6 - Vistas isométrica dos suportes estruturais (a) e as dimensões da sua secção (b).

Após um estudo feito em paralelo na mesma empresa determinou-se que os suportes previamente definidos iriam entrar em rotura na passagem da secção para as duas bases, tendo sido necessário criar um reforço nessa zona. A geometria que melhor suportaria a carga sem ser necessário aumentar a secção está representada na Figura 5-7. Os raios de curvatura adicionados suavizam a grande diferença de espessuras entre o corpo do suporte e as zonas de apoio superior e inferior. Já os restantes reforços garantem uma maior rigidez ao componente-

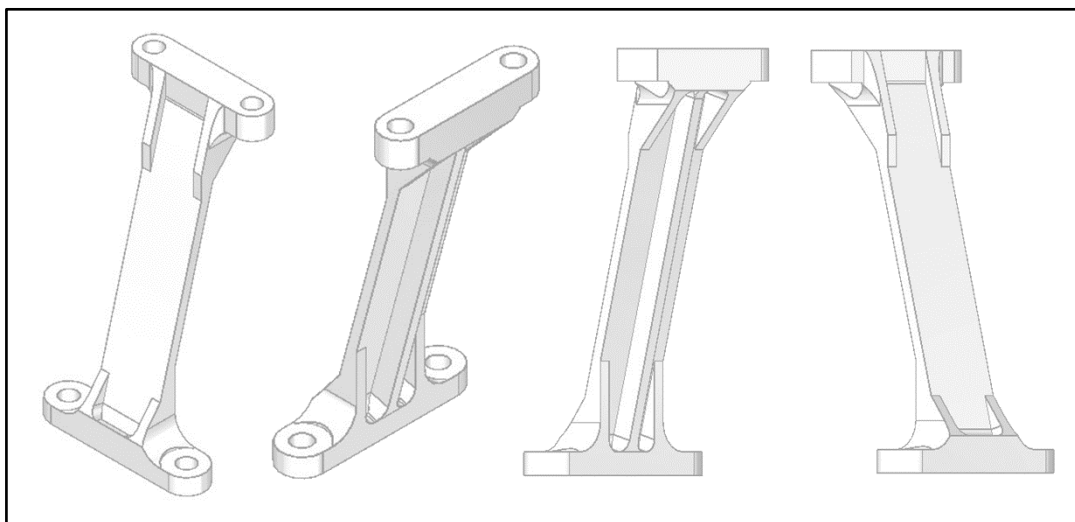


Figura 5-7 - Vistas dos suportes estruturais reforçados.

Já com o design dos suportes definido, o conjunto da célula de adsorção é ilustrado na Figura 5-8.

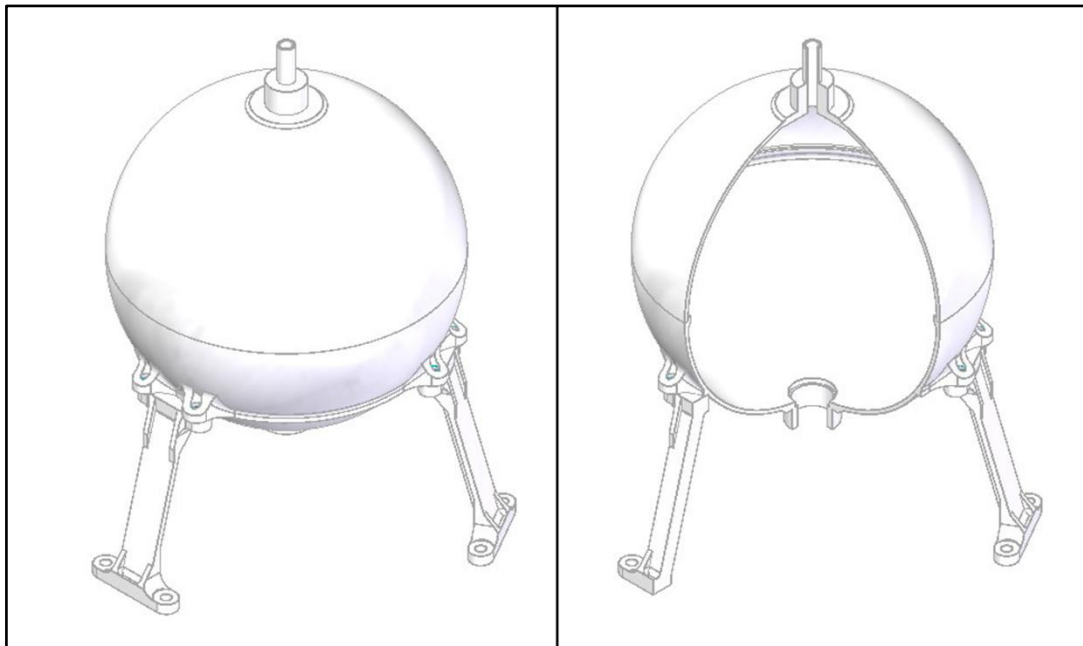


Figura 5-8 - Projeção da célula de adsorção.

5.1.2. Interruptor térmico

O interruptor térmico, tal como descrito na secção 3.2.2, tem como função garantir o arrefecimento do material adsorvente durante a fase de adsorção do gás.

Para tal optou-se por um interruptor do tipo *Gas Gap* (Espaçamento Gasoso), pois é isento de vibrações e de componentes móveis, garantindo uma maior longevidade. Este interruptor garante uma transmissão de calor cerca de 2000 vezes menor quando desligado e tem uma grande velocidade de resposta ao (des) ligar.

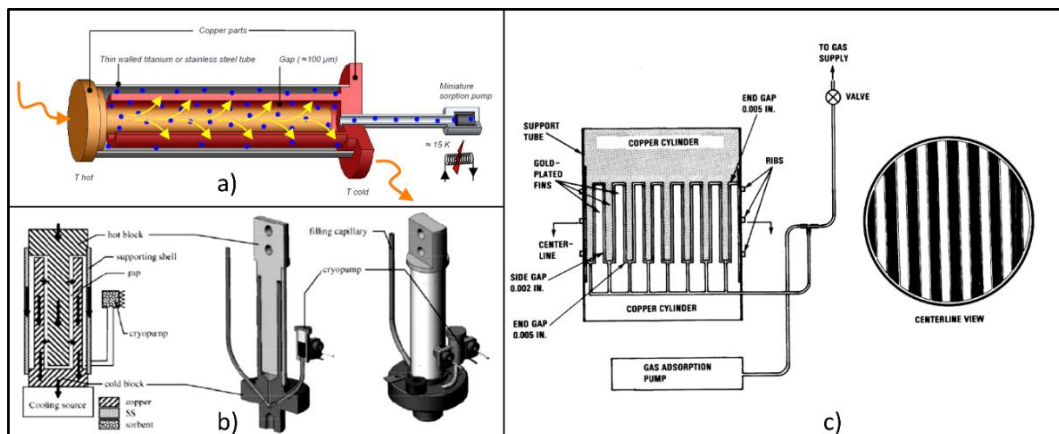


Figura 5-9 - Interruptores térmicos *Gas Gap*: Standard (a) [16], com ativação magnética (b) [17] e com alhetas (c) [18].

Em geral este tipo de interruptores são constituídos por 2 blocos de um material de boa condutividade térmica (ex. Cobre) separados por um pequeno hiato. Um suporte de composto de material com baixa condutividade térmica (ex. Aço inox) é responsável pelo alinhamento dos dois blocos de cobre bem como pela do gás dentro do dispositivo. Como é apresentado no exemplo da Figura 5-9 (b), o interruptor é constituído por dois blocos de cobre cilíndricos concêntricos separados por um hiato de 100 μm . Um fino suporte de aço inox (100 μm de espessura) é responsável pelo alinhamento entre os dois blocos concêntricos e por manter o gás dentro do dispositivo. A gestão do gás no interior do dispositivo fica a cargo de uma mini criobomba, que utiliza o mesmo princípio que os materiais adsorventes no interior da célula de adsorção. Quando a criobomba é aquecida o gás é dessorvido para o pequeno hiato estabelecendo uma boa condução térmica entre os dois blocos de cobre (estado ON). Por outro lado, quando a criobomba é arrefecida a pressão diminui e a condução térmica entre os dois blocos de cobre é apenas estabelecida pelo fino tubo de suporte de aço inox (estado OFF).

A condução ON do dispositivo é então proporcional à área de troca entre os dois blocos e inversamente proporcional à distância entre os dois blocos (hiato). Por este mesmo motivo os blocos podem conter alhetas, como por exemplo na Figura 5-9 (c), aumentando, assim, a área de troca. Contudo este aumento de área aumenta também as trocas radiativas de forma permanente. As alhetas acarretam maiores dificuldades de montagem e de maquinação, visto ser necessário garantir rigorosas tolerâncias de modo a não existir contacto entre blocos, considerando também as diferentes dilatações quando se verifica um grande diferencial de temperaturas entre os dois blocos.

O aumento da condutância do dispositivo é ainda possível através da diminuição da distância entre blocos (hiato), mas acarreta maiores dificuldades de maquinação e tolerâncias mais apertadas, o que iria aumentar o fator económico do projeto.

Outra solução para a obtenção de um pequeno espaçamento gasoso entre dois blocos é a utilização de materiais com diferentes coeficientes de expansão: o hiato entre os blocos forma-se durante o arrefecimento do dispositivo após o processo de brasagem. Durante a brasagem o tubo de aço inox e a distância entre as abas dos blocos de cobre (sobrepostos) têm o mesmo comprimento, como é apresentado na Figura 5-10 (a). Durante o processo de arrefecimento, como o coeficiente de expansão do cobre é superior ao do aço

inox, os blocos de cobre vão contrair mais quando comparado com o tubo de aço inox originando um pequeno hiato entre os blocos, como ilustrado na Figura 5-10 (b).

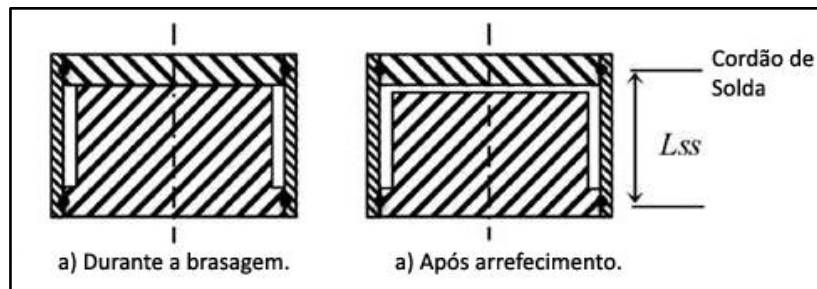


Figura 5-10 - Processo de obtenção do espaçamento entre blocos (Adaptado de [19]).

Este princípio de funcionamento foi demonstrado por J.Franco [19] onde se obteve um dispositivo com um pequeno hiato de $17 \mu\text{m}$.

Mesmo com uma área de troca de calor inferior é possível obter um hiato 5 vezes inferior ao que se consegue nos interruptores mencionados na figura Figura 5-9, tipicamente $100 \mu\text{m}$.

Apesar da utilização da contração diferencial de dois materiais para a obtenção do hiato, durante o funcionamento do interruptor entre $150 \text{ K} - 500 \text{ K}$ não existe qualquer contacto entre os dois blocos de cobre, .

Este princípio foi então utilizado no desenvolvimento do interruptor de calor neste projeto:

O interruptor será composto por 3 peças: **bloco frio, bloco quente e cilindro de afastamento**. Ambos os blocos serão compostos pela liga de cobre ASTM OFHC, já o cilindro de afastamento terá como material a liga de aço inoxidável AISI 304L.

Iniciou-se o desenvolvimento do bloco frio, com uma forma cilíndrica e compacta, contendo um canal interior por onde é adicionado/retirado o gás de ligação térmica entre os dois blocos. O bloco contém também, na sua parte inferior, uma aba que facilita o alinhamento do cilindro de afastamento e, visto que a brasagem é a vácuo, a deposição da solda é feita no estado sólido sendo fundida posteriormente, tendo estas abas também a função de reter esta ao espaço onde é necessária.

O bloco quente baseia-se num disco, que, à semelhança do bloco frio, dispõe também de umas abas com a função anteriormente referida. Contém também duas paredes furadas na sua zona superior de forma a garantir a fixação do adaptador a este, e consequente ligação térmica.

O cilindro de afastamento é um simples cilindro de aço inoxidável de liga AISI 304L, oco com uma parede de 0,1 mm.

O espaçamento esperado neste interruptor é de 10 μm a 150 K, utilizando hidrogénio como gás de troca a uma pressão de 1 bar. A condutância ON esperada é de 2,5 W/K. A condutância OFF máxima, dada pelas perdas através do cilindro de aço inox e por radiação entre os dois blocos é de 0,008 W/K, quando os dois blocos se encontram a temperaturas opostas de 150 K e 500 K.

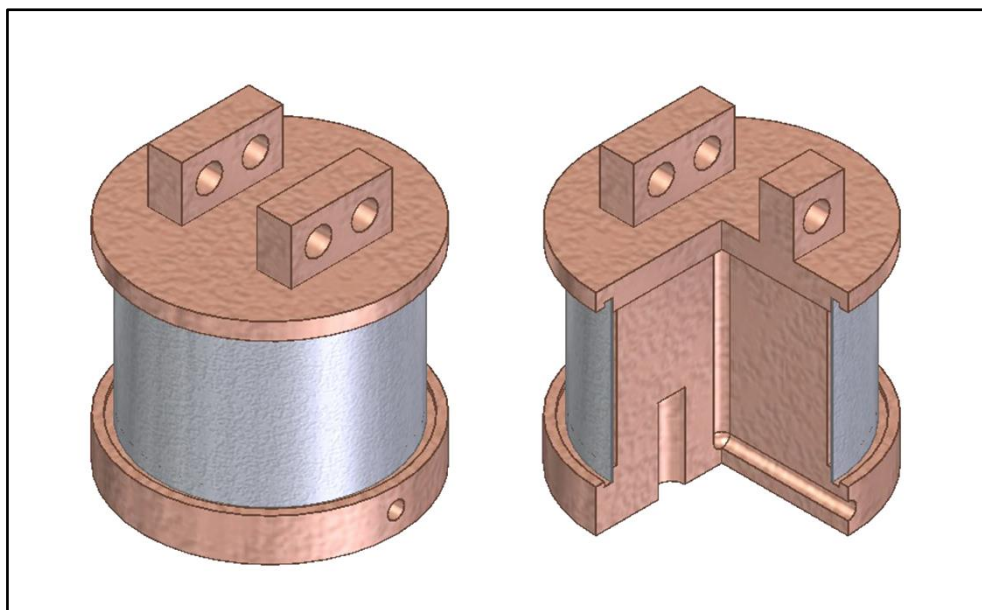


Figura 5-11 - Projeção do interruptor térmico.

5.1.3. Permutador de Calor da Célula de Adsorção

O permutador de calor tem como função distribuir de uma forma homogénea as mudanças de temperatura impostas quer pela resistência de aquecimento quer pelo interruptor térmico. Desta forma, as alhetas têm que contactar com o máximo de espaço interior da célula, otimizando este em função da sua massa, permitindo, no entanto, um escoamento entre os espaços confinados por estas.

Definiram-se então alhetas semicirculares unidas por um corpo central. Em termos de fabrico, fresar um bloco de modo a ter a forma definida, levaria a um grande desperdício económico, tanto ao nível de material removido, como de horas de maquinação.

Desta forma conclui-se que o permutador seria composto por dois tipos de componente: o corpo central, e as alhetas.

O corpo central partiu de um cilindro compacto, de cobre ASTM OFHC, com estrias em todo o seu comprimento a servir de guias para o alinhamento das alhetas. Na base do cilindro foi adicionado uma zona roscada M8x8 (macho) de modo a ligar o adaptador de calor ao permutador de calor, mecânica e termicamente, este aperto é feito através da parte superior do cilindro, contendo duas paredes paralelas, com uma chave inglesa. O corpo central contém vários furos passantes, que atravessam o eixo deste, de forma a garantir o escoamento de gás entre os vários espaços compreendidos entre as alhetas, e ainda um furo longitudinal de forma a otimizar este efeito.

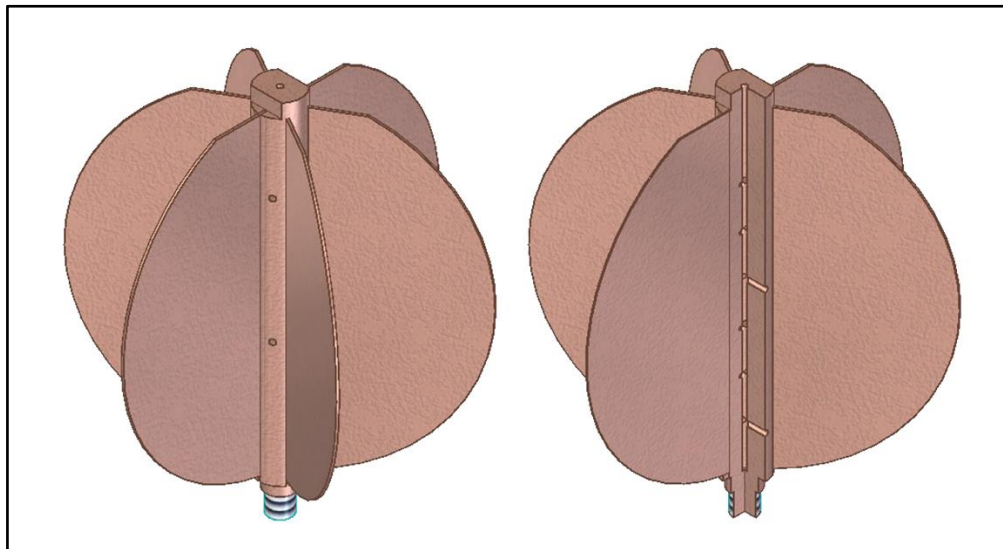


Figura 5-12 - Projeção do permutador de calor.

5.1.4. Adaptador (Titânio – Cobre)

Após o desenvolvimento da célula de adsorção, interruptor de térmico e permutador de calor, é necessário o desenvolvimento de uma peça que garanta a união entre estes, designada por adaptador. Este terá que garantir uma transmissão de calor entre o interruptor e o permutador, e a fixação destes à célula. Isto, porém, traz uma certa complexidade, visto a célula ser composta por uma liga de titânio, sendo quimicamente impossível de unir através de soldadura por arco elétrico, visto os materiais terem pontos de fusão bastante distintos. Desse modo é imposto a criação de um adaptador bimetálico de liga

de titânio e cobre obtida através de soldadura por fricção linear inercial, descrita na secção 4.4.5. Este adaptador não compromete a estanquidade da célula de pressão devido à sua soldadura por feixe de eletrões entre a esfera e a parte composta por liga de titânio, cujo processo é explicado na Secção 4.4.3.

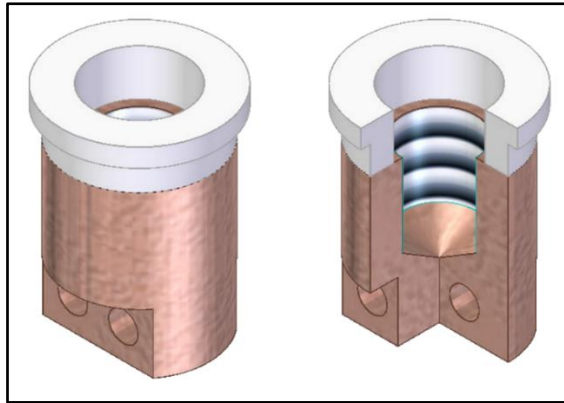


Figura 5-13 - Projeção do Adaptador Bimetálico.

5.1.5. Pós refrigerador

O pós-refrigerador, tal como descrito na secção 3.2.3, tem a função de garantir um primeiro estágio de arrefecimento do gás proveniente da célula de adsorção, e do gás de baixa pressão com destino à mesma célula, consoante a fase de ciclo a que se encontra. Assim sendo, idealizou-se um sistema composto por um tubo, no qual passa o referido gás, envolto numa peça de cobre acoplado à fonte fria, e desse modo, permanecer à mesma temperatura.

Após um estudo executado em paralelo na empresa, foi determinado que estando a base a uma temperatura de 155 K e o corpo de cobre a 180 K, seria necessário uma extensão de 200 mm de tubo para se obter uma termalização perfeita (temperatura de saída do gás igual à do bloco de cobre, tal como ilustrado na Figura 5-14.

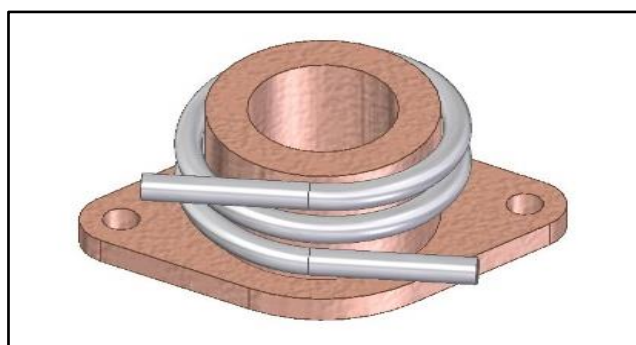


Figura 5-14 - Projeção do Pós-Refrigerador

5.1.6. União em T – Redutora

Para se garantir a separação dos gases a diferentes pressões, é utilizada uma ligação em T para cada um dos reservatórios de pressão, com saída para as válvulas de retenção de alta e baixa pressão.

Esta ligação necessita de uma entrada de 1/8' e duas saídas de 1/4'. Uma ligação com estas dimensões não é disponibilizada pela *Swagelok*, deste modo foi necessário projetá-la. Desenhou-se um paralelepípedo com uma entrada de 1/8' e duas saídas concêntricas de 1/4', tendo as paredes dos cilindros das saídas uma espessura de 0,7 mm, à semelhança dos tubos, tal como ilustrado na Figura 5-15.

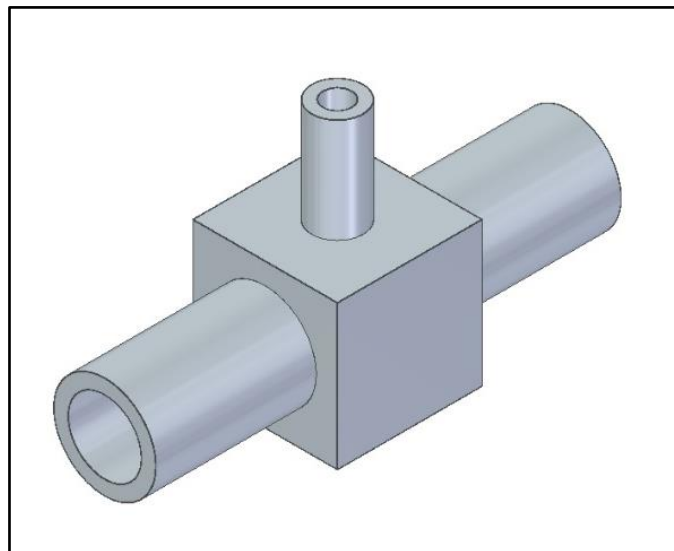


Figura 5-15 - Vista isométrica da ligação em T redutora.

5.1.7. Válvulas de Retenção

O gás, desde célula de adsorção até à passagem no pós-refrigerador, executa o mesmo percurso, tanto em baixa como em alta pressão, mudando apenas o sentido em que circula. Para que o ciclo não se inverta, e para que não ocorra mistura de gás em alta pressão de uma célula com o de baixa pressão de outra, é necessário garantir a separação destes, agrupando respetivamente os gases de alta pressão de todas as células e os de baixa pressão.

Existe um grande número de mecanismos com este fim, sendo alguns desses mecanismos ilustrados na Figura 5-16.

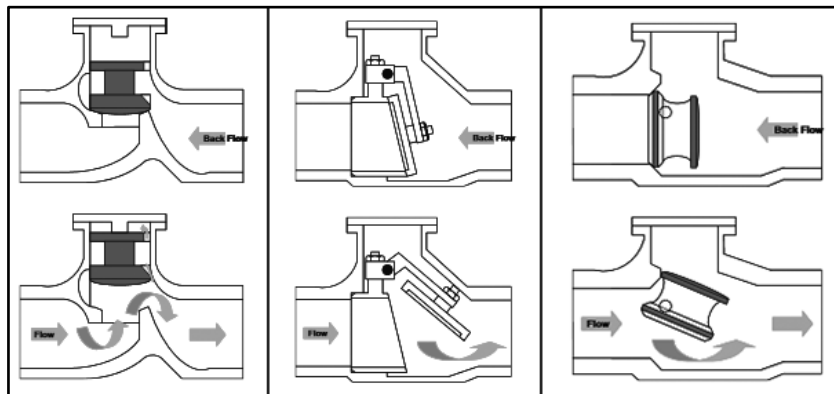


Figura 5-16 - Válvulas de retenção de elevação, de balanço e de disco inclinado, respetivamente [20].

As válvulas presentes na figura anterior utilizam componentes móveis, não sendo aconselhadas a este projeto visto desenvolverem impactos e subseqüentes vibrações, provocando desgaste levando a uma menor durabilidade. É também possível observar que o percurso de (des) ativação influencia o tempo de resposta, o que é de extrema importância no que toca a otimização do ciclo térmico.

Assim sendo, optou-se pela válvula, *Swagelok*, com a referência ilustrada na Figura 5-17, cujo corpo exterior é formado por uma só peça (1) de aço inoxidável AISI 316L SS, um elemento circular que garante a estanquidade quando a válvula se encontra fechada (2), uma mola de disco (3) e um posicionador em forma de disco furado (4), de forma a garantir o correto posicionamento do elemento 2 quando a válvula está a aberta, e possibilitar o escoamento.

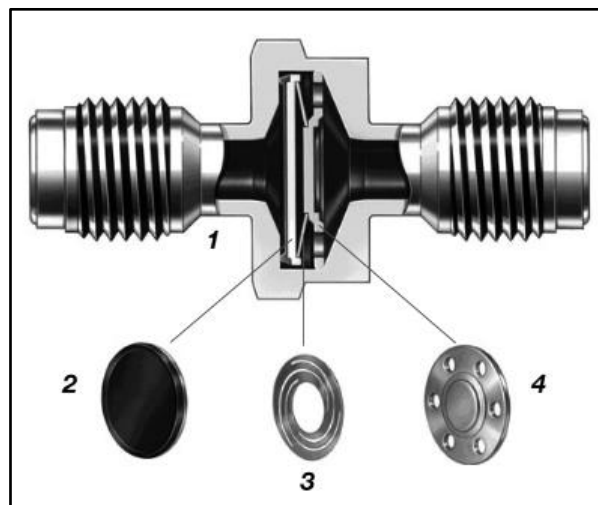


Figura 5-17 - Válvula de Retenção *Swagelok*, tipo CW [11].

A válvula escolhida, permite o escoamento da direita para a esquerda, bloqueando o mesmo no sentido inverso. O gás ao entrar pelo lado esquerdo, exerce pressão no elemento circular (2) que, por sua vez, flete a mola (3), permitindo o escoamento entre as extremidades destes e as paredes do corpo envolvente (1), permitindo a passagem do gás pelo disco furado (4). Quando o gás entra pelo lado contrário, passa pelos furos do disco, porém não passa para a extremidade oposta da válvula devido ao facto da mola se encontrar na sua posição inicial encostando o disco circular às paredes do corpo da válvula de forma estanque. A válvula tem ligações VCR®, levando uma porca e uma flange em cada saída, como ilustrado na Figura 5-18.

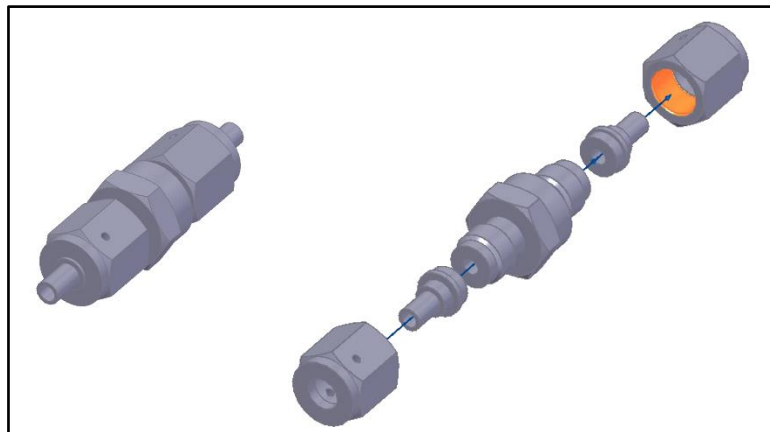


Figura 5-18 - Válvula de retenção com as ligações VCR® montadas (esq.) e em vista explodida (dir.).

5.1.8. Fixador de Válvulas de Retenção

Devido às altas diferenças de pressão aplicadas às válvulas de retenção, é necessário a sua fixação à fonte fria de modo a atenuar o conseqüente “efeito chicote”, podendo este danificar outras peças do equipamento e/ou as uniões soldadas. O fixador necessita de suportar possíveis desalinhamentos das válvulas de retenção visto todas as ligações permanentes dos tubos serem soldadas a TIG, sendo uma operação dificultada pelas pequenas dimensões dos componentes, sendo difícil garantir o não empenamento das zonas termicamente afetadas.

Para um conjunto de quatro válvulas, foram desenhadas duas bases de apoio que são fixas à fonte fria, e quatro componentes superiores, possibilitando o aperto individual, que são aparafusadas às bases de apoio. Esta solução, na qual as válvulas são apertadas de forma independente umas das outras, possibilita o ajuste necessário a compreender o efeito

de desalinhamento dos tubos devido a empeno devido à soldadura TIG, durante a sua montagem. O fixador pode ser observado na Figura 5-19.

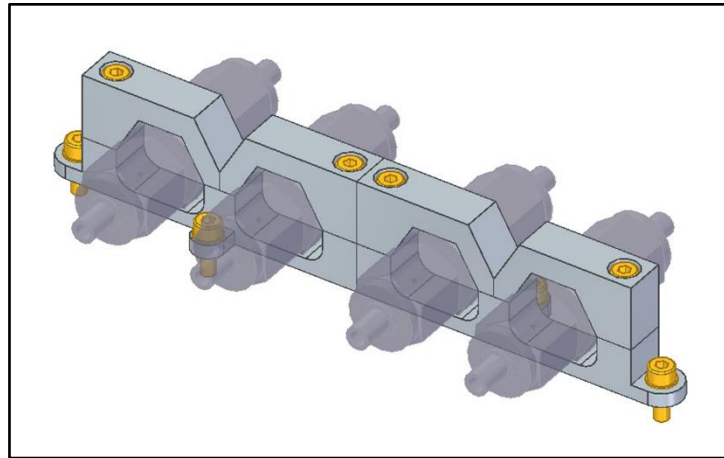


Figura 5-19 - Fixador de válvulas de retenção.

5.1.9. União 4-1

Esta união surge com o intuito de agrupar os gases de igual pressão, provenientes das várias células de adsorção, assim ter-se-á uma única saída para o gás de alta pressão, e uma entrada para o gás de baixa pressão. Este componente serve também de suporte estrutural do conjunto.

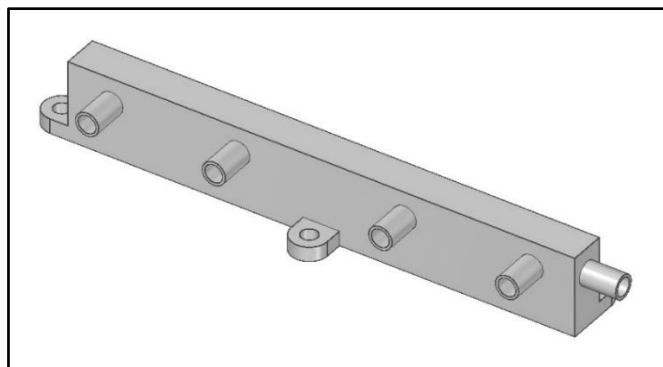


Figura 5-20 - Projeção da União 4-1

Visto não haver uniões de 5 entradas na *Swagelok*, foi necessário o desenvolvimento da peça apresentada na Figura 5-20. Idealizou-se um paralelepípedo com 4 entradas paralelas e alinhadas, de modo a facilitar a conexão com o tubo proveniente das válvulas de retenção; e uma saída na face adjacente. Todas entradas têm uma extensão de tubo de 10 mm, de forma a possibilitar uma soldadura de correção, cortando a zona

termicamente afectada da soldadura mal sucedida (cerca de 5 mm em todas as direcções) e possibilitando a realização de nova soldadura, caso necessário.

Foi ainda necessário garantir a fixação desta união à fonte fria, visto estar localizado imediatamente após as válvulas de retenção, ficando sujeitos a grandes choques de pressão, e, portanto, deslocamentos.

5.1.10. Componentes Fluídicos da Unidade de Compressão

Na presente secção “Unidade de Compressão”, foram utilizadas outras peças não desenvolvidas especificamente para o mesmo fim, nomeadamente os tubos, acessórios, válvulas, etc. Essas peças utilizadas são, em grande parte, provenientes da empresa *Swagelok*, empresa de referência em componentes fluídicos de alta e baixa pressão, estando essas peças descritas na secção 4.4.3 e em destaque na Figura 5-21, com exceção das válvulas de retenção (5.1.7). É abaixo referido a função de cada um desses componentes utilizados no presente subconjunto, já o seu funcionamento é explicado na secção 4.4.3.

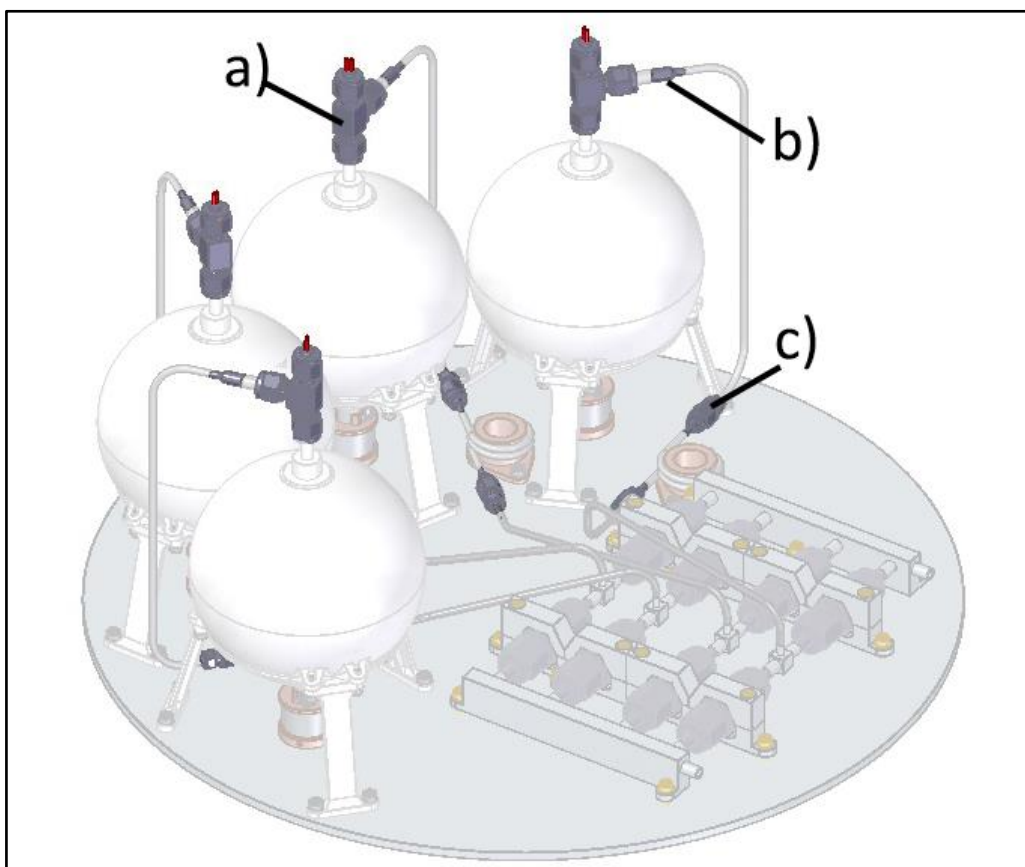


Figura 5-21 - Componentes fluídicos do compressor de adsorção: a) ligação em T do tipo *Swagelok*; b) redutor 1/4'-1/8'; c) ligação desmontável VCR.

À saída do reservatório de pressão é utilizado uma ligação em T do tipo *Swagelok* (bicónico). Esta ligação permite o escoamento gasoso entre o reservatório de pressão e o pós refrigerador, possibilitando ainda uma saída dedicada às entradas de fios dos sensores de temperatura e pressão. Na saída desta ligação é utilizado um redutor 1/4'-1/8' de forma, a quando da realização de curvas no tubo, o raio seja o menor possível, visto este ser proporcional ao diâmetro do tubo, garantindo desta forma uma maior compactação do conjunto e menor perda de carga. No final do tubo de 1/8' encontra-se uma ligação VCR® desmontável, que garante a possibilidade de montagem e manutenção da célula de adsorção de forma independente do restante conjunto, é ainda utilizada uma ligação idêntica a seguir ao pós-refrigerador, com a mesma finalidade.

5.2. Estágio Frio

O estágio frio designa todos os componentes percorridos pelo gás desde a sua entrada no permutador de calor, até à saída do mesmo em sentido contrário, sendo eles:

- Permutador de Calor de Contra Corrente
 - Tubo Helicoidal de Alta Pressão
 - Tubo Helicoidal de Baixa Pressão
- Válvula de Expansão
- Evaporador
 - Cilindro de Expansão
 - Rede de Capilaridade
- Componentes Fluídicos
 - Ligações T
 - Conector de 90°
 - Ligações não Permanentes

5.2.1. Permutador de Calor de Contra Corrente

Definiu-se um permutador de tubos concêntricos de sentidos opostos, como ilustrado na Figura 5-22, assim, o escoamento do gás de menor pressão passa no interior do gás de maior pressão, sem haver mistura dos mesmos, mas garantindo a maior área de contacto possível.

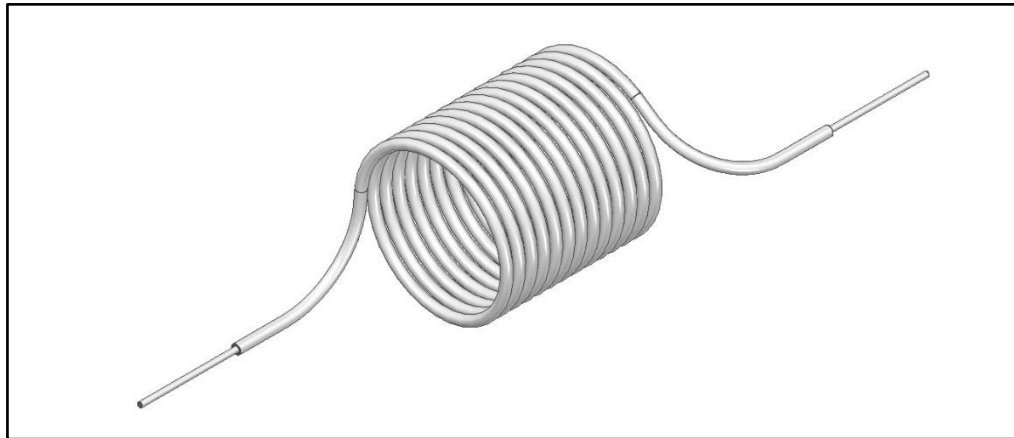


Figura 5-22 - Permutador de calor de tubos concêntricos de contra-corrente.

5.2.2. Válvula de Expansão

A válvula de expansão definida baseia-se numa ligação desmontável, com adaptadores VCR®, descrita na secção 4.5.1, com um constrangimento entre as flanges. Esse constrangimento será uma glande VCR cega, que ficará entre as flanges, substituindo a anilha, contendo um furo efetuado com corte laser.

5.2.3. Evaporador

Definiu-se o evaporador como sendo um cilindro de um diâmetro preponderante em relação aos observados nos tubos utilizados anteriormente, contendo um material que retém o condensado.

Iniciou-se o seu design por um cilindro de 1/2' de diâmetro, com uma só base com parede, ficando a outra como saída do gás. Acrescentou-se uma entrada lateral, com diâmetro de 1/8' para o gás proveniente da válvula de expansão. É também necessário garantir a fixação deste elemento ao (s) elemento (s) a refrigerar, sendo ela feita através de ligação aparafusada na parede lateral. Este componente pode ser observado na Figura 5-23.

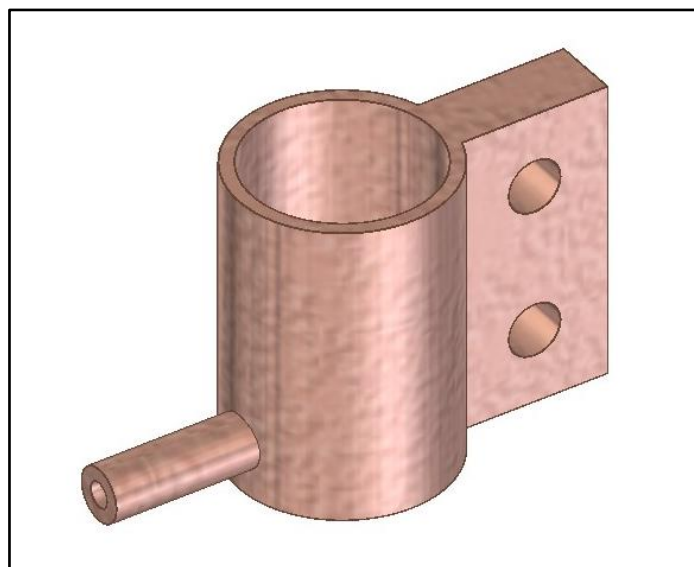


Figura 5-23 – Vista isométrica do evaporador.

5.2.4. Componentes Fluídicos do Estágio Frio

Os componentes fluídicos utilizados na parte fria estão ilustrados na Figura 5-24.

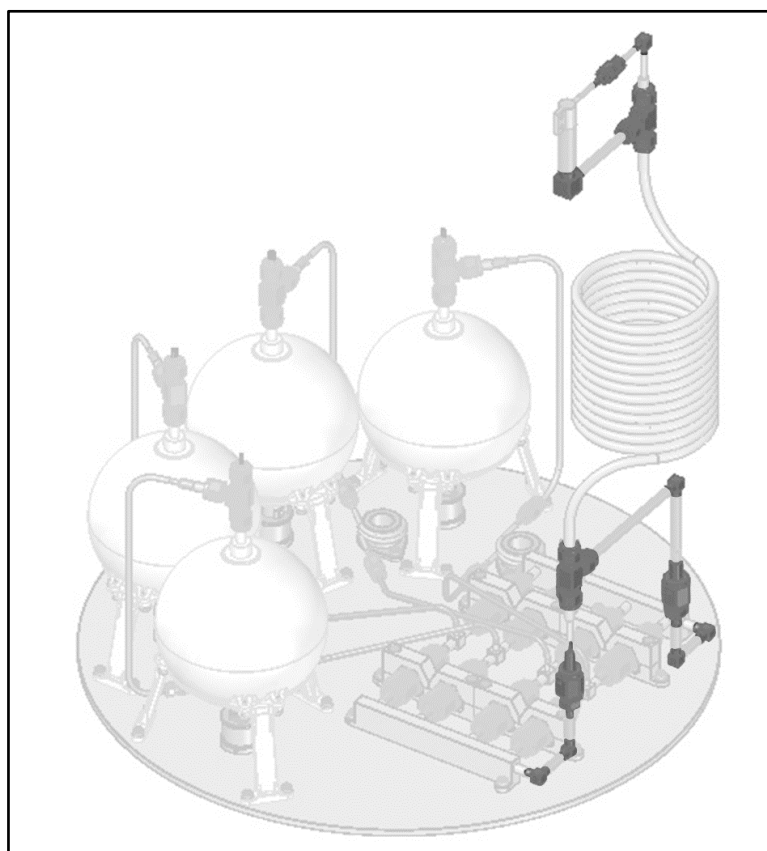


Figura 5-24 - Componentes fluídicos utilizados na parte fria.

Tal como observado com maior nitidez na Figura 5-25 (a), na saída da união 4-1 de alta pressão, e na entrada da de baixa pressão, são utilizadas ligações em L de 1/4' de forma a afastar os componentes posteriores dos extremos da base de 475 mm de diâmetro, visto que os componentes terão que ser montados na base tendo uma parede cilíndrica ao seu redor. Após as ligações em L são utilizadas ligações desmontáveis, permitindo uma montagem separada do conjunto do compressor. A ligação desmontável da linha de alta pressão tem uma flange de entrada de 1/4' e outra de saída de 1/8', permitindo uma ligação soldada, na saída, ao tubo interno do permutador de calor (5.2.1). Na linha de baixa pressão a ligação desmontável integra duas flanges de 1/4', seguida de uma ligação em L com o mesmo diâmetro.

Para garantir um bom funcionamento de permutador de calor é utilizada uma ligação em T do tipo bicónico com saídas de 1/4'. Esta ligação tem o intuito de garantir a passagem dos gases de diferentes pressões nos respetivos tubos. Para a linha de alta pressão é adicionado um tubo de 1/4', na entrada inferior, que é soldado ao tubo interior do permutador de calor, ficando este tubo fixo à ligação em T. Esta solução permite que o tubo interior do permutador passe pela referida ligação, não havendo mistura de gases; já a linha de baixa pressão é fixa diretamente na ligação em T, permitindo o escoamento no seu interior e a saída pelo tubo exterior do permutador, também diretamente fixo ao componente. Esta ligação está representada na Figura 5-25 (b)

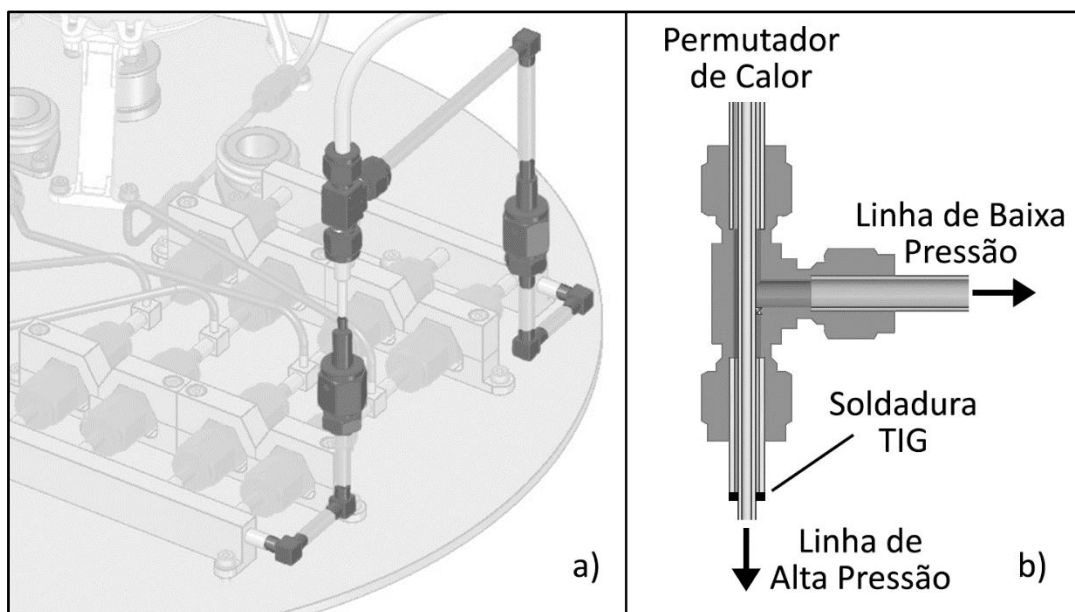


Figura 5-25 - Componentes fluídicos da parte fria anteriores ao permutador (a) e vista em corte da ligação em T (b).

À saída do permutador de calor de contra corrente é utilizada uma ligação em T idêntica à anteriormente explicada (Figura 5-25 (b)), tendo uma ligação em L de 1/8' e uma ligação desmontável com igual diâmetro. Após o evaporador é utilizada uma ligação em L com redução de 1/2' para 1/4', permitindo uma ligação direta ao tubo de saída do evaporador, e ao tubo de baixa pressão que entra na ligação em T, tal como ilustrado na Figura 5-26.

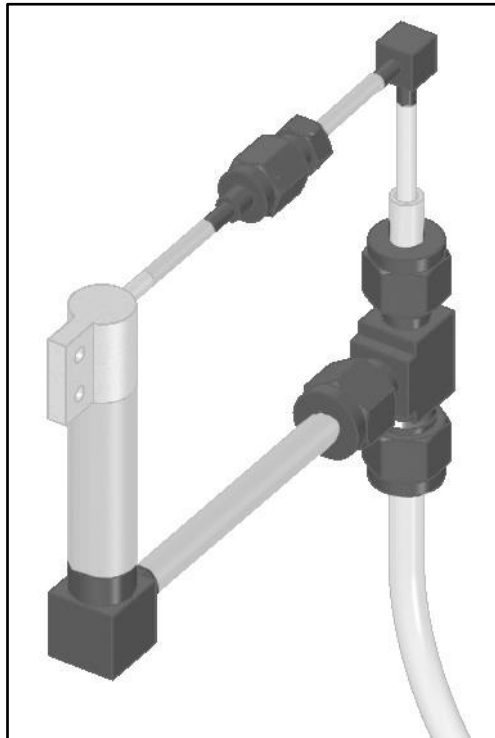


Figura 5-26 - Componentes fluidicos da parte fria posteriores ao permutador.

5.3. Disposição dos Componentes no Conjunto

A integração de todos os componentes teve em vista:

- Montagem – possibilidade de montagem, da forma mais prática possível tendo em conta o espaço limitado disponível;
- Manutenção/substituição de componentes – sendo este ainda um protótipo de teste, é necessário ter em conta a possibilidade de e desmontagem e/ou substituição de componentes, sendo necessário garantir um bom acesso a todos os componentes, dentro do possível, e a necessidade de retirar um número mínimo de peças não pretendidas.

Durante o decorrer do projeto a disposição foi uma constante a ter em conta, começando logo pela célula de adsorção, que integra o pós refrigerador junto de si de modo a tornar cada conjunto célula de adsorção – pós refrigerador mais compacto de forma a facilitar a integração das 4 células. Esta integração teve vários arranjos idealizados, das quais as mais relevantes encontram-se ilustradas na Figura 5-27.

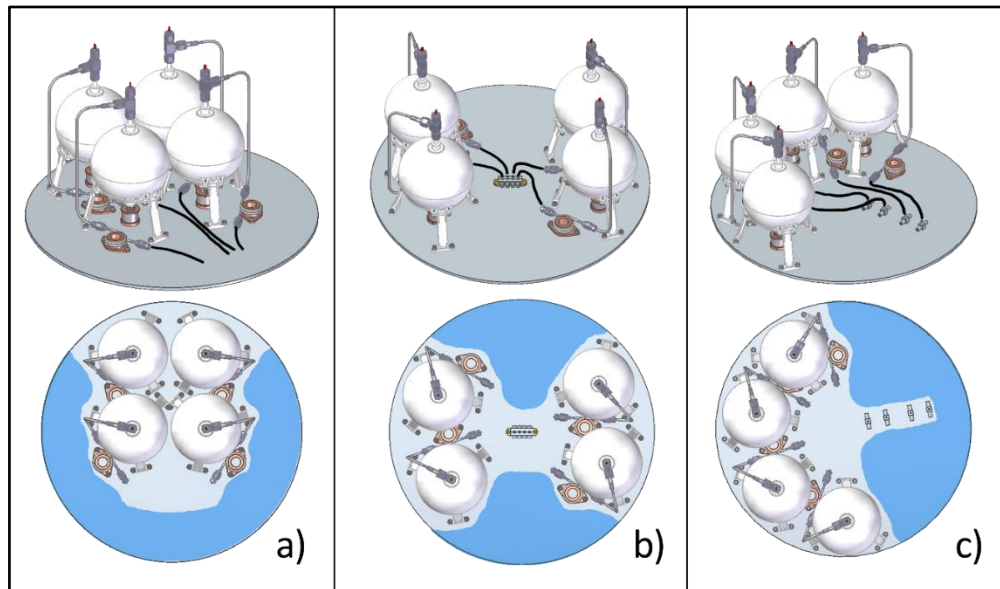


Figura 5-27 - Diferentes configurações de arranjo do conjunto.

O primeiro arranjo (a) foi dos primeiros a ser idealizados, considerando a 4 células todas juntas, unindo os tubos ao centro, de forma a dividir a linha de alta pressão para um lado, e o de baixa pressão para o outro. Esta disposição tem como desvantagens a difícil (des) montagem das células de adsorção, pois o acesso às patas que se encontram no centro das 4 células é bastante dificultado.

O segundo arranjo (b) reparte as 4 células por dois grupos de 2. Esta disposição garante o acoplamento dos tubos ao centro, com bom acesso e facilidade de (des) montagem, repartindo, também, as linhas de diferentes pressões. Esta solução, contudo, aumenta a distância entre as saídas das linhas já agrupadas de baixa e alta pressão, para se fechar o ciclo iria ser necessário utilizar maior quantidade de tubo, o que aumentaria a perda de carga do conjunto.

O terceiro arranjo (c) agrupa as 4 células radialmente, em torno de metade do perímetro da base. Esta disposição garante um bom aproveitamento da metade da base onde as células estão dispostas. A montagem das células de adsorção, caso seja feita sequencialmente, segundo o sentido dos ponteiros do relógio, é acessível. Esta solução

proporciona bastante espaço para as válvulas de retenção e restantes componentes, dividindo as linhas de pressão, sem aumentar demasiado a distância entre elas. Pelas razões anteriormente descritas, foi o este o arranjo selecionado, podendo ser visualizado com todos os seus componentes na Figura 5-28.

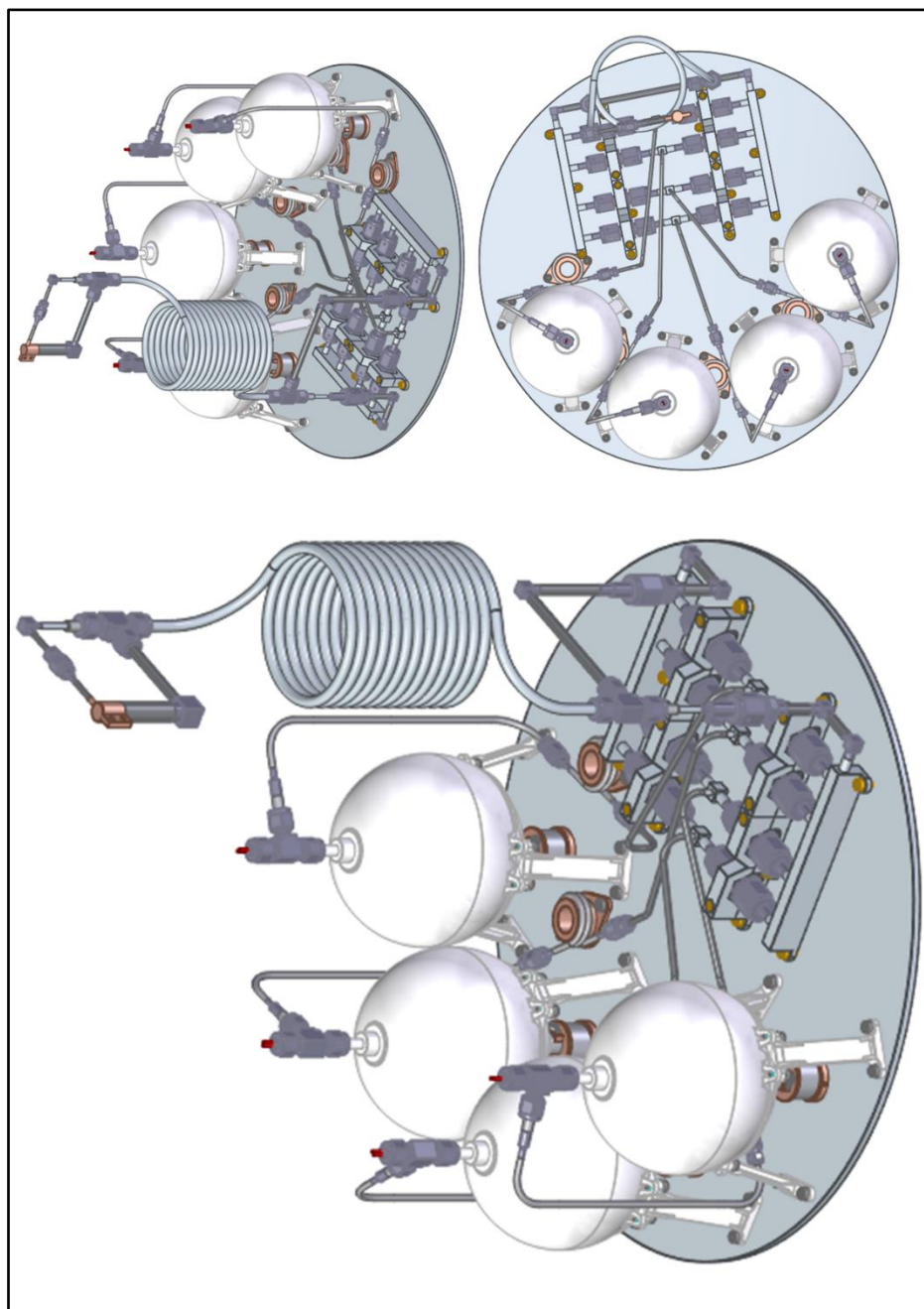


Figura 5-28 - Vistas da disposição final do conjunto.

6. PEÇA DE TESTE

No decorrer do projeto foram concebidas peças teste de forma a analisar a brasagem a vácuo no interruptor térmico, para tal desenharam-se uns componentes com uma geometria simplificada do interruptor, retirando do bloco quente as orelhas de fixação ao adaptador, e do bloco frio o canal interno de circulação do gás e os furos dedicados à ligação aparafusada à fonte fria, tal como ilustrado na Figura 6-1. Nesta secção é analisado o desenvolvimento dos desenhos técnicos e os processos de fabrico.

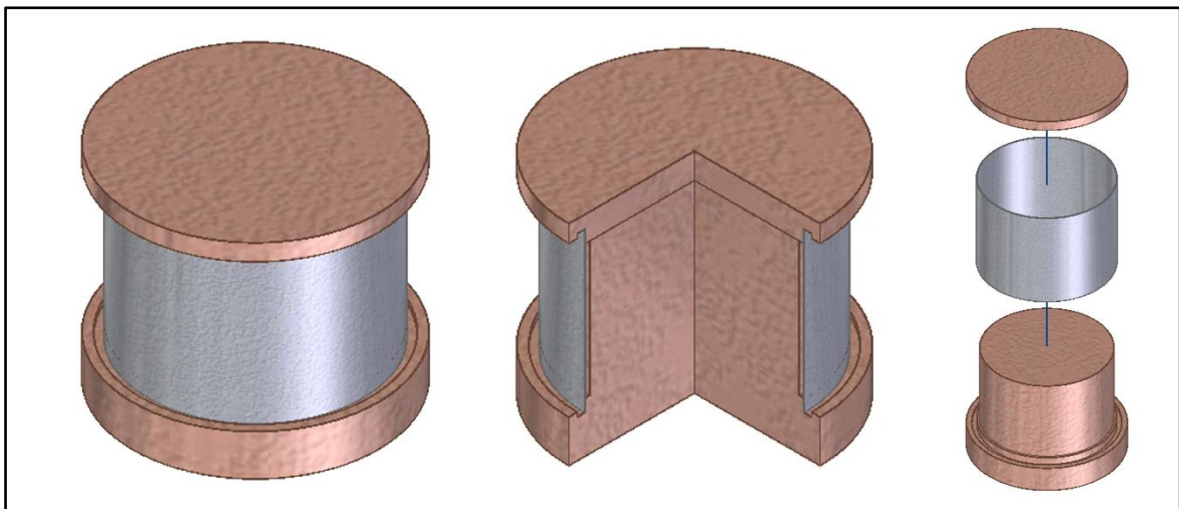


Figura 6-1 - Interruptor térmico simplificado em vista isométrica, com corte e com vista explodida, respetivamente.

6.1. Desenhos Técnicos

O interruptor térmico é uma peça crítica no criorrefrigerador que necessita de cotas rigorosas, tanto na distância entre os dois blocos, que caso haja contacto a transferência térmica torna-se permanente, e caso a distância seja muito grande o gás disponível pode não ser suficiente para criar essa mesma ligação; como no encaixe do cilindro de afastamento às guias dos dois blocos.

Para o desenvolvimento dos desenhos das peças foi necessária especial atenção às tolerâncias aplicadas às cotas relacionadas com os aspetos anteriormente descritos. Começou-se por perceber qual seria o seu tipo de fabrico de forma a poder cotar as dimensões de forma a facilitar a sua maquinação. Identificaram-se as cotas que necessitavam de uma tolerância rigorosa, tendo em conta o espaçamento entre blocos, estando elas assinaladas na Figura 6-2.

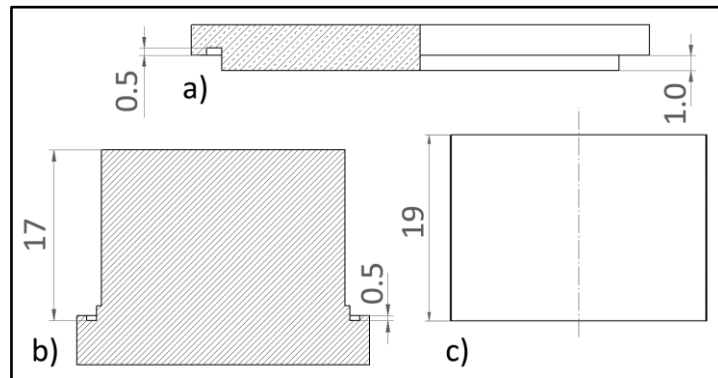


Figura 6-2 - Vista frontal com corte do bloco quente (a), vista da secção frontal do bloco frio (b) e vista frontal do cilindro de afastamento (c). Desenhos não estão na mesma escala.

A temperatura à qual o interruptor irá trabalhar oscila entre os 500 K e os 150 K, estando sujeito a expansão térmica dos blocos, visto serem constituídos por uma liga de cobre. Para se garantir que existe um afastamento mínimo (cerca de 10 μm) durante o seu funcionamento, e visto que a brasagem é executada acima dos 600 K, é necessário que os blocos estejam em contacto durante o processo de ligação. Assim durante o seu arrefecimento os blocos afastam-se visto estarem fixos ao cilindro de afastamento. O cilindro, porém, não pode ultrapassar a profundidade da aba (dimensão de 0,5 mm em cada bloco), pois pode pôr em causa a uniformidade da brasagem caso a solda não chegue às bases do cilindro. Deste modo, é necessário garantir o contacto entre blocos, com a mínima diferença de dimensões entre a distância das abas e a altura do cilindro.

Admitiu-se o valor de 0,05 mm para as tolerâncias assinaladas nos dois blocos, com sentido positivo, e sem tolerância inferior, tal como ilustrado na Figura 6-3.

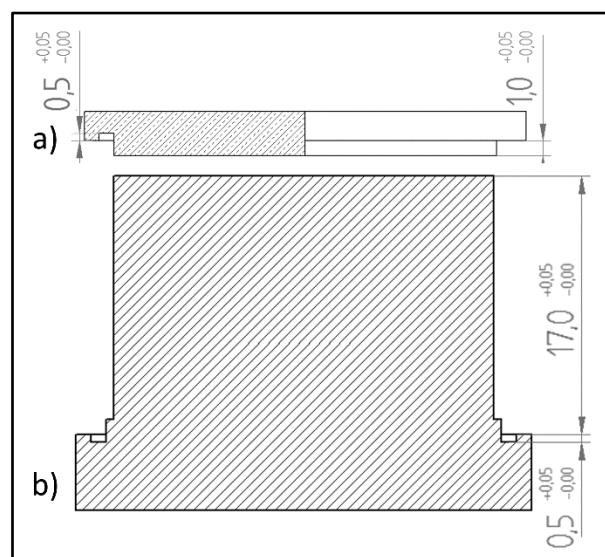


Figura 6-3 - Tolerâncias dos blocos quente (a) e frio (b)

Considerado as tolerâncias identificadas na Figura 6-3, as distâncias nominal (L_N) entre abas, e nos dois piores casos, todas as tolerâncias cumpridas no limite superior, L_{max} , e inferior, L_{min} , são dadas por:

$$L_N = 0,5 + 1,0 + 0,5 + 17,0 = 19 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$L_{max} = 0,55 + 1,05 + 0,55 + 17,05 = 19,2 \text{ mm} \quad (6.2)$$

$$L_{min} = L_N = 19 \text{ mm}. \quad (6.3)$$

Deste modo é possível observar que a tolerância do cilindro não deverá permitir que a sua altura máxima seja maior que a distância L_{max} , 19,0 mm. Optou-se portanto por dar como tolerância inferior -0,1 mm, tal como observável na Figura 6-4.

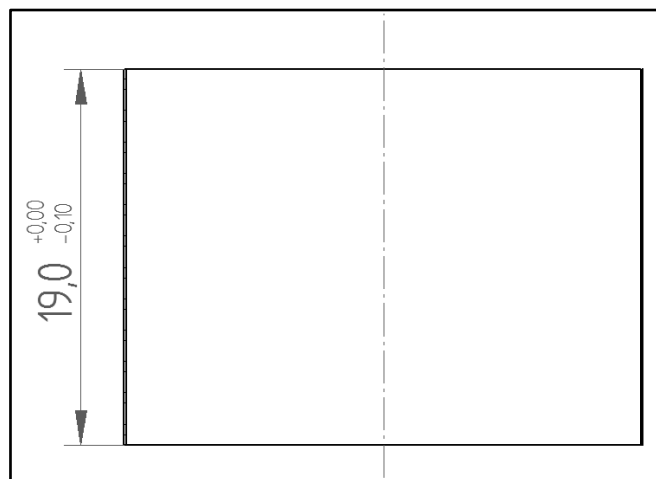


Figura 6-4 - Tolerância da altura do cilindro de afastamento.

As tolerâncias acima descritas garantem o contacto entre os blocos, dando uma folga máxima de 0,1 mm entre as abas e o cilindro.

Relativamente aos diâmetros, é necessário ter uma tolerância relativamente apertada na de zona de encaixe entre os blocos e o cilindro. Considerou-se um ajuste deslizante e cuidado, permitindo a montagem à mão [21], sendo indicado para guias, deste modo obtém-se um ajustamento $\text{Ø}26 \text{ H7/g6}$.

Os desenhos técnicos dos componentes aqui referidos podem ser observados na sua totalidade no APÊNDICE A.

6.2. Processo de Fabrico

O processo utilizado na criação dos 3 componentes foi o torneamento.

As peças obtidas estão representadas na Figura 6-5.



Figura 6-5 - Componentes após maquinação, isoladas e montadas, respetivamente.

6.3. Processo de Ligação

O processo de ligação selecionado para a união dos 3 componentes foi a brasagem a vácuo, pois permite a união de materiais dissimilares; o aquecimento é homogéneo em todas as peças, evitando o empeno destas uma vez que a solda tem uma temperatura de fusão superior à temperatura máxima de funcionamento do interruptor térmico.

Aquando da publicação deste trabalho não tinham sido concebidas as brasagens, visto o equipamento necessário ainda estar a ser otimizado para este fim.

O processo de brasagem a vácuo, tal como descrito na secção 4.4.6, necessita de uma câmara que garanta uma pressão muito baixa (alto-vácuo), aquecendo de forma homogénea a solda adicionada e os componentes a brasar (evitando empenos), unindo-os.

As duas ligações (bloco frio-cilindro e bloco quente-cilindro) são feitos em simultâneo. Coloca-se a solda na aba de um dos blocos junto ao cilindro, e vira-se a peça de forma a fazer o mesmo procedimento no outro bloco. A solda mantém-se posicionada, sem derramar ou cair por ação capilar entre esta e o material de base.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este projeto, que tinha como objetivo a concepção de um criorrefrigerador isento de vibrações, como o próprio título do trabalho indica, foi parcialmente concretizado. Foram definidas as geometrias dos vários componentes integrantes, ficando por concretizar o fabrico dos mesmos e consequentes análises de funcionamento.

O presente trabalho trouxe ainda, ao autor, uma melhor compreensão de todo o processo de projeto: o ponto de partida, o processo iterativo de alterações de design, os aspetos a ter em conta, a importância dos desenhos técnicos, o impacto dos processos de fabrico na concepção dos componentes e as várias etapas até se chegar ao equipamento final.

Como trabalhos futuros é proposto o desenvolvimento do projeto contemplando os dois estágios de arrefecimento, uma análise dos processos de ligação dos componentes, executados na empresa e uma avaliação do funcionamento do ciclo após a sua montagem, fazendo uma comparação dos resultados expetados com os obtidos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Butterworth, J., *et. al.* (2013), “Pulse Tube Coolers for Meteosat Third Generation”, AIP Publishing, Melville, NY, disponível em <http://scitation.aip.org/> a 31 de Agosto às 22:32;
- [2] Watson, S. (2013), “Design and Development of a High Power Stirling Cooler”, em 15th ESMAT, disponível em <http://www.esmats.eu/esmatpapers/> a 31 de Agosto às 22:32;
- [3] Morgante, G., *et. al.* (2009), “Cryogenic Characterization of the Planck Sorption Cooler System Flight Model”, IOP Publishing, disponível em <http://www.cosmos.esa.int/web/planck/publications/> a 31 de Agosto às 22:34;
- [4] Burger, J., *et. al.* (2006), “Vibration-Free 4.5K Sorption Cooler”, em: Miller, S. e Ross, Jr., R. (eds), “Cryocoolers 14” em International Cooler Conference, 14th Edition, disponível em <http://conferences.library.wisc.edu/icc14/> a 31 de Agosto às 22:37;
- [5] Mandolesi, N. *et. al.* (2009) “LFI Programme Paper M1 4may09”, Astronomy & Astrophysics, disponível em http://aether.lbl.gov/PDFs/LFI_Programme_Paper_M1_4may09.pdf a 31 de Agosto às 22:37;
- [6] Bowman, Jr., K., Kiehl, B. e Marquadt, E. (2003) “Closed-Cycle Joule-Thomson Cryocoolers”, em: Donabedian, M. (ed), “Spacecraft Thermal Control Handbook”, The Aerospace Press, El Segundo, California;
- [7] Burger *et. al.* (2002) “Vibration-free 5 K sorption cooler for ESA's Darwin mission”, Cryogenics, Fevereiro 2002, 97–108
- [8] Kimball, M., *et. al.* (2015), “Low-Power, Fast-Response Active Gas-Gap Heat Switches for Low Temperature Applications”, IOP Publishing, disponível em <http://iopscience.iop.org/> a 31 de Agosto às 22:38;
- [9] Madenesi, P. e Marques, P. (2006), “Soldagem I – Introdução aos Processos de Soldadura”, Universidade Federal de Minas Gerais, disponível em <http://demet.eng.ufmg.br/laboratorio/laboratoriodesoldagem/> a 31 de Agosto às 23:04;
- [10] Alves, E. (2010) “Junções de Materiais Dissimilares utilizando o Processo de Soldagem por Fricção Rotativa”, Tese de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.05.23.42> a 13 de Setembro às 16:28;

- [11] <http://www.swagelok.com/> a 31 de Agosto às 22:45;
- [12] <http://www.azom.com/article.aspx? ArticleID=1341> a 31 de Agosto às 22:53;
- [13] <http://www.aircraftmaterials.com> a 31 de Agosto às 22:53;
- [14] <http://www.northamericanstainless.com> a 31 de Agosto às 22:54;
- [15] Marquadt, E., Le, J. e Radebaugh, R. (2001), “Cryogenic Material Properties Database”, em: Ross, Jr., R. (ed), “Cryocoolers 11”, Fluver Academic Publishers, New York.;
- [16] Duband, L. (2008), “A Thermo-Mechanical Heat Switch”, em: Miller, S. e Ross, Jr., R. (eds), “Cryocoolers 15” em International Cooler Conference, 15ª Ed., disponível em <http://conferences.library.wisc.edu/icc15/> a 31 de Agosto às 22:55;
- [17] Catarino, I., Bonfait, G. e Duband, L. (2008), “Neon gas-gap heat switch”, *Cryogenics*, Volume 48, Janeiro-Fevereiro 2008, 17-25;
- [18] Chan, C. e Ross, Jr., R. (1990), “Design and Application of Gas-Gap Heat Switches”, disponível em <http://ntrs.nasa.gov> a 31 de Agosto às 22:56;
- [19] J. Franco et all. (2014), “Narrow gas gap in cryogenic heat switch”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 70, Setembro 2014, 115–121;
- [20] www.hoerbiger.com/upload/file/check_valve_primer.pdf a 31 de Agosto às 22:56;
- [21] Morais, S., “Desenho Técnico Base”, 23ª Ed., Porto Editora, Porto.

APÊNDICE A

Desenho técnico do conjunto “Interruptor térmico – versão teste”



Desenho técnico do componente “Bloco frio – versão teste”



Desenho técnico do componente “Bloco quente – versão teste”



Desenho técnico do componente “Cilindro de afastamento – versão teste”

