



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Leonardo André Rodrigues Sousa

**PRÉ-PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO PARA A
PRODUÇÃO DE GELO COM QUALIDADE ALIMENTAR
ASSOCIADA AO PROCESSO DE REGASEIFICAÇÃO
DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO**

VOLUME 1

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, orientada
pelo Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro e do
Engenheiro António Manuel Gonçalves Matoso de Olim, apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra**

Julho de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

PRÉ-PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE GELO COM QUALIDADE ALIMENTAR ASSOCIADA AO PROCESSO DE REGASEIFICAÇÃO DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO

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

**Front-end-project of a facility to produce food grade ice
associated with the regasification process of Liquefied
Natural Gas**

Autor

Leonardo André Rodrigues Sousa

Orientador[es]

António Manuel Gonçalves Matoso de Olim

José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro

Júri

Presidente

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador

**Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Professor Doutor Gilberto Cordeiro Vaz
Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Coimbra

Coimbra, Julho, 2021

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação de mestrado e de todo o ciclo de estudos foi uma jornada que envolveu muito apoio, motivação e colaboração de várias pessoas e, portanto, não poderia deixar de prestar os meus agradecimentos a algumas delas.

Em primeiro lugar, um especial agradecimento ao meu orientador na Universidade de Coimbra, o Professor José Manuel Baranda, por todo o apoio, sabedoria, paciência e disponibilidade.

Ao Eng. António Manuel Matoso Olim, que durante meses despendeu do seu tempo para me apoiar com o seu vasto conhecimento na área da engenharia mecânica e em particular nos assuntos ligados ao gás natural.

À lota da Docapesca de Aveiro e aos seus colaboradores, pela disponibilidade e boa vontade com que me guiaram numa visita às suas instalações.

À Vahterus e, em especial, ao Grigory Konkov pela atenção durante o processo de seleção do condensador.

Aos amigos que sempre estiveram do meu lado nos bons e nos maus momentos, e por tornarem a minha jornada universitária numa experiência que jamais irei esquecer.

Aos pais e irmã um obrigado não chega. Foi uma longa caminhada que, de forma alguma, se realizaria sem o seu apoio e a sua presença em todos os momentos.

Por fim, um agradecimento a Coimbra, a cidade que me viu nascer e que fez de mim aquilo que sou hoje.

Resumo

Esta dissertação tem como objetivo criar um pré-projeto que poderá servir de suporte a um futuro projeto de investimento de um sistema de produção de gelo associado ao processo de regaseificação do Gás Natural na ilha da Madeira.

As previsões do aumento do consumo de Gás Natural, aliadas à procura por combustíveis fósseis mais ecológicos, fazem aumentar o interesse do estudo de oportunidades relacionadas com esta fonte de energia.

Estudaram-se os métodos tradicionais de regaseificação do Gás Natural e da produção de gelo e definiu-se um novo ciclo de refrigeração que utiliza este combustível fóssil como fonte fria. Este ciclo utiliza apenas um evaporador, seguido de um condensador, um reservatório de fluido refrigerante e uma bomba, não necessitando de um compressor. Estimou-se o consumo de Gás Natural na UAG da Ribeira dos Socorridos, na ilha da Madeira. Com estes dados, calculou-se a quantidade de energia envolvida no processo de regaseificação do Gás Natural e percebeu-se que será possível produzir cerca de 31 toneladas de gelo por dia.

De modo a garantir um correto funcionamento da máquina de gelo, elaborou-se um sistema de controlo e selecionaram-se os componentes mais importantes, como o condensador, que consiste em dois permutadores em cascata, o evaporador, a bomba de circulação, válvulas, sensores e dispositivos de controlo. Para todos os componentes, foram indicadas as marcas e modelos a utilizar.

O pré-projeto apresentado aparenta ser uma proposta bastante exequível e vantajosa para a UAG dos Socorridos, uma vez que aumenta o aproveitamento energético na ilha da Madeira com um investimento relativamente baixo e praticamente nenhum efeito negativo no meio ambiente.

Palavras-chave: Gás Natural, Produção de Gelo, Refrigeração, Regaseificação do Gás Natural.

Abstract

The main objective of this dissertation is to develop a front-end-project that might support a future investment project of an ice production system associated with the regasification of Natural Gas on the island of Madeira.

Predictions of increased consumption of Natural Gas, combined with the search for more ecological fossil fuels, increase the interest in studying opportunities related to this energy source.

Traditional methods for the regasification of Natural Gas and ice production were studied and a new refrigeration cycle that uses this fossil fuel as a cold source was defined. This cycle only uses an evaporator, followed by a condenser, a tank for the refrigerant and a liquid pump, avoiding the need for a compressor. The consumption of Natural Gas on the UAG of Ribeira dos Socorridos was estimated. With this data, the amount of energy involved on the regasification process was calculated and it was found to be possible to produce around 31 tons of ice per day on the island of Madeira.

In order to guarantee the correct function of the ice machine, a control system was elaborated and the most important components were selected, such as the condenser, that consists in two heat exchangers in a cascade system, the evaporator, the liquid pump, valves, sensors and control devices. The brands and models of the components to be utilized were indicated.

The front-end-project seems to be a very feasible and advantageous proposal for the UAG of Socorridos, since it increases the energy recovery on the island of Madeira with a relatively low investment and almost no effect on the environment.

Keywords Ice Production, Natural Gas, Natural Gas Regasification, Refrigeration

Índice

Índice de Figuras	vii
Índice de Tabelas.....	viii
Simbologia e Siglas.....	ix
Simbologia	ix
Siglas	x
1. Introdução.....	11
1.1. O Gás Natural	11
1.2. Reservas e Consumo de Gás Natural.....	13
1.3. Transporte do Gás Natural.....	14
1.4. Motivação	16
1.5. Objetivo	17
2. Regaseificação do gás natural	18
2.1. Métodos de reaproveitamento da energia de regaseificação de GNL	19
2.1.1. Ciclo de Expansão Direta	19
2.1.2. Ciclo Orgânico de Rankine [ORC]	20
2.1.3. Ciclo de Brayton.....	21
2.1.4. Produção de gelo	21
3. Produção de gelo associada à regaseificação de GNL	23
3.1. Princípio de funcionamento.....	23
3.2. Condensador	26
3.3. Evaporador.....	31
3.4. Bomba.....	33
4. Modelação do sistema	35
4.1. Modelo Matemático.....	35
4.2. Princípio de funcionamento detalhado	43
5. Conclusões	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A	60
ANEXO B	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Previsões de procura média anual global de Gás Natural [6].	14
Figura 1.2. UAG em Coja, Arganil.	15
Figura 1.3. Camiões com contentores criogénicos na UAG da Ribeira dos Socorridos [8].	16
Figura 2.1. Esquema de ciclo de expansão direta simples [10].	19
Figura 2.2. Esquema do processo de regasificação com ciclo orgânico de Rankine [10].	20
Figura 2.3. Máquina de produção de gelo de 150kg [12].	22
Figura 3.1. <i>Process flow diagram</i> simples do Ciclo Novo.	24
Figura 3.2. Gráfico Pressão-Volume da amónia.	25
Figura 3.3. Esquema de um permutador de calor de placas [15].	27
Figura 3.4. Esquema de um permutador de carcaça e tubo [17].	28
Figura 3.5. Modelo 3D de permutador de calor de casco e placas [20].	30
Figura 3.6. Vista interior e exterior do evaporador da máquina de gelo da lota de Aveiro.	33
Figura 3.7. Bomba centrífuga [26].	34
Figura 4.1. Gráfico Pressão-Entalpia da amónia.	36
Figura 4.2 Dados de consumo de energia eléctrica em Portugal no dia 02-11-2020.	39
Figura 4.3 Estimativa de consumo horário de GN na UAG da Ribeira dos Socorridos.	40
Figura 4.4. <i>Process flow diagram</i> .	44
Figura 4.5. Modelo 3D de um permutador de calor da Vahterus.	46
Figura 4.6. Esquema dos permutadores de calor em cascata.	47
Figura 4.7. Evaporador da lota de Aveiro.	48
Figura 4.8. Bomba centrífuga Gruppo Aturia STM [30].	49
Figura 4.9. Curvas características da série STM.	49
Figura 4.10. Válvula ICM, controlador EKE 347 e sensor com transmissor integrado [34].	51

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Composições do GN proveniente do gasoduto argelino e do GNL transportado em navios metaneiros [2].	11
Tabela 1.2. Fatores de emissão de carbono para diversos combustíveis [2].	12
Tabela 1.3. Lista das 5 maiores reservas de GN no mundo. [5].	13
Tabela 4.1. Temperaturas de funcionamento do sistema.	35
Tabela 4.2. Propriedades do ciclo novo para cada ponto.	36
Tabela 4.3. Energias necessárias à produção de 1kg de gelo.	37
Tabela 4.4. Energia necessária ao processo de regaseificação do GNL.	38
Tabela 4.5. Parâmetros de dimensionamento.	42
Tabela 4.6. Lista de componentes.	52

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

c_p – Calor específico	[kJ/(kg.K)]
E – Energia	[kJ]
g – Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h – Entalpia	[kJ/kg]
H – Altura manométrica	[m]
m – Massa	[kg]
\dot{m} – Caudal mássico	[kg/s]
P – Pressão	[bar]
t – Tempo	[s]
T – Temperatura	[°C]
V – Volume	[m ³]
ρ – Densidade	[kg/m ³]

Siglas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers; Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento Refrigeração e Ar Condicionado;

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GN – Gás Natural

GNL – Gás Natural Liquefeito

CCUS – Carbon Capture Utilization and Storage

BCM – Billion Cubic Meter

REN – Redes Energéticas Nacionais

RNTGN – Rede Nacional de Transportes de Gás Natural

UAG – Unidade Autónoma de Gaseificação

ORC – Ciclo Orgânico de Rankine

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Gás Natural

O Gás Natural [GN] é um combustível fóssil que se forma no interior da terra, através da decomposição de matéria orgânica, ao longo de milhões de anos [1]. É composto por diversos gases sendo o metano (CH_4) o principal. Composições típicas do Gás Natural, e do Gás Natural Liquefeito [GNL], que variam com o local de extração, são apresentadas na Tabela 1.1 [2].

Quando é extraído, o GN contém, para além de outros hidrocarbonetos que não o metano, outros gases como enxofre, hélio, vapor de água e dióxido de carbono, que são removidos através de vários processos de purificação. Após esta purificação, são adicionados odorantes ao GN por questões de segurança em caso de fugas, etc. [1].

Tabela 1.1. Composições do GN proveniente do gasoduto argelino e do GNL transportado em navios metaneiros [2].

Componente	Magrebe (% molar)	GNL (% molar)
Metano	87,885	92,215
Etano	8,056	4,841
Propano	1,378	2,111
i-butano	0,108	0,360
n-butano	0,158	0,381
i-pentano	0,022	0,018
n-pentano	0,018	0,003
n-hexano	0,020	0,000
Azoto	1,088	0,071
Co ₂	1,266	0,000
Total	100,000	100,000

Numa altura em que se acentua cada vez mais a procura por novas fontes de energia, o GN apresenta-se como um potencial combustível de transição. Tal pode ser justificado pela sua viabilidade económica e ecológica, assim como pelas reservas existentes [3].

Além da conhecida utilidade do Gás Natural para fins domésticos, este combustível fóssil é largamente utilizado em diversas aplicações industriais, tais como [4]:

- Matéria prima para a indústria química;
- Caldeiras industriais;
- Fornos industriais cerâmicos;
- Etc.

A eficiência da combustão do GN permite atingir altos rendimentos em equipamentos, diminuindo assim os consumos de energia. Ecologicamente, comparado com outros combustíveis fósseis disponíveis, o GN é menos prejudicial para o ambiente, na medida em que emite menores quantidades de óxidos de azoto, óxidos de enxofre e dióxido de carbono, por unidade de energia [2]. Na Tabela 1.2, é apresentada uma comparação dos fatores de emissão de carbono para diferentes combustíveis fósseis. Em combinação com CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage), o gás natural é uma fonte de energia praticamente livre de emissões de carbono [3].

Tabela 1.2. Fatores de emissão de carbono para diversos combustíveis [2].

Combustível	Fator de emissão / (tC/TJ)
Gasolina	18,9
Gasóleo	20,2
Antracite	26,8
Fuel Óleo	21,1
Gás Natural	15,3

1.2. Reservas e Consumo de Gás Natural

À data da escrita desta dissertação e segundo o Worldometer [5], a reserva mundial de Gás Natural corresponde a 196057 mil milhões de metros cúbicos (bcm – *billion cubic meters*).

A Rússia tem a maior reserva de gás natural do mundo, como é possível observar na Tabela 1.3, com cerca de 47812 bcm, representando 24,3% de toda a reserva mundial.

Tabela 1.3. Lista das 5 maiores reservas de GN no mundo. [5].

Nº	País	Reserva de GN (bcm)	Percentagem
1	Rússia	47812	24,3%
2	Irão	34023	17,3%
3	Catar	24683	12,5%
4	EUA	10441	5,3%
5	Arábia Saudita	8331	4,2%

Apesar do impacto que a Covid-19 teve no consumo global de GN, reduzindo as previsões de crescimento médio anual de 1,8% para 1,5%, prevê-se que a procura deste combustível fóssil atinja cerca de 4370 bcm no ano de 2025, segundo dados do relatório *Gas 2020* [6]. Na Figura 1.1, apresenta-se um gráfico com as previsões de procura de GN, antes e pós Covid-19, onde é possível perceber um aumento acentuado no seu consumo previsto até 2025 .

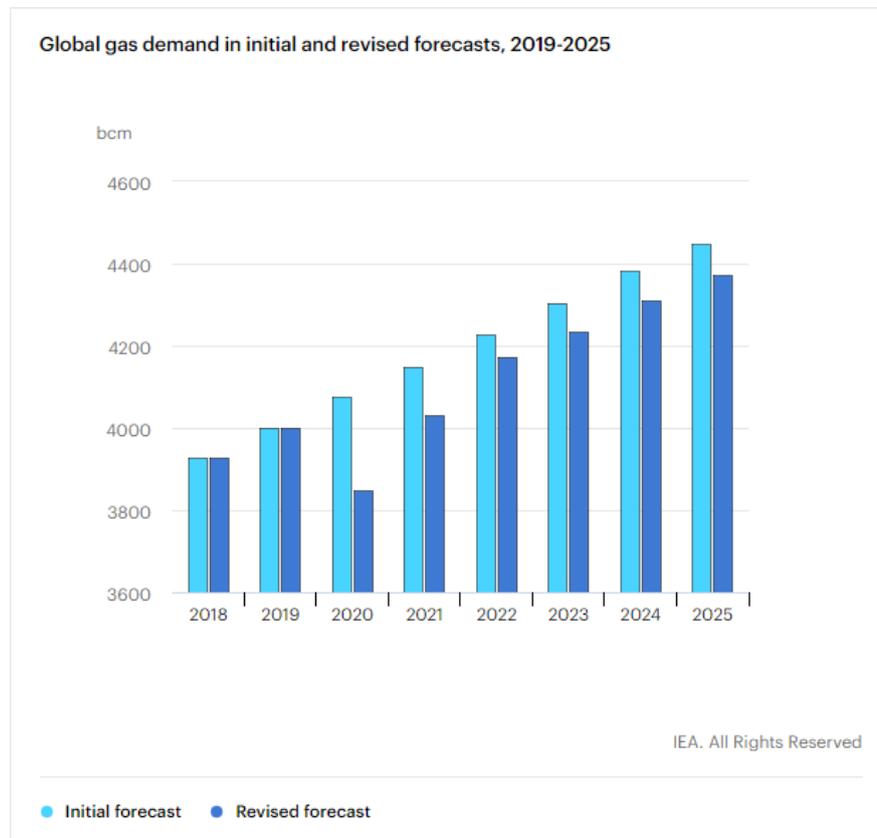


Figura 1.1. Previsões de procura média anual global de Gás Natural [6].

À velocidade de consumo atual e excluindo reservas desconhecidas, a *Worldometer* estima que restam 52 anos até se consumir todo o Gás Natural existente [5].

1.3. Transporte do Gás Natural

Dada a elevada distância que existe, por vezes, entre os países produtores de Gás Natural e as regiões de consumo final, a existência de um sistema de transporte eficiente é indispensável. Esse transporte pode ser efetuado:

- Através de gasodutos de alta pressão, no estado gasoso [GN];
- Através de navios e/ou camiões, no estado líquido [GNL].

O GN que chega a Portugal, por gasoduto através da fronteira espanhola ou por navios metaneiros através do terminal de regaseificação de Sines (REN Atlântico), é

recebido pela Rede Nacional de Transportes de Gás Natural (RNTGN), que é operada pela REN Gasodutos. É enviado em gasodutos de alta pressão da RNTGN até aos consumidores finais de alta pressão e até estações de regulação e medida, onde é transferido para os ramais de média pressão. Estes gasodutos, de média pressão, e as redes de baixa pressão que deles derivam, são concessionados por empresas de distribuição que transportam o GN até aos consumidores finais.

Além das redes de transporte de Gás Natural acima mencionadas, existem também redes de distribuição abastecidas por Unidades Autónomas de Gaseificação (UAG's), que recebem GNL transportado, a partir do terminal de Sines, através de camiões [7]. Na Figura 1.2 é apresentada uma dessas UAG's.



Figura 1.2. UAG em Coja, Arganil.

Na Região Autónoma da Madeira, o fornecimento de Gás Natural é assegurado pela Gás Link, do Grupo Sousa. O GNL sai do terminal de Sines e é transportado em contentores criogénicos, como os que se podem observar na Figura 1.3, até à ilha da Madeira, onde é regaseificado na UAG da Ribeira dos Socorridos, para a qual é direcionado o foco desta dissertação [8].



Figura 1.3. Camiões com contentores criogénicos na UAG da Ribeira dos Socorridos [8].

1.4. Motivação

A regaseificação do Gás Natural é um processo que envolve trocas de energia sob a forma de calor, nomeadamente entre o GNL e um ou mais fluidos, como se pode observar mais adiante. Essa energia, que é trocada durante o processo referido, pode ser aproveitada para gerar energia elétrica, através de ciclos descritos no capítulo seguinte, como ciclos de Rankine, ciclos de expansão direta, ciclos de Brayton, etc., e pode ser aproveitada também para a produção de gelo e refrigeração. A utilização de um ou vários processos de aproveitamento de energia permite aumentar a eficiência do terminal de regaseificação.

O gelo é um produto bastante utilizado na indústria alimentar, especialmente em lotas, onde é usado para conservar o peixe. Na lota da Docapesca de Aveiro, onde se fez uma visita às suas instalações de frio, é vendido a cerca de 0,08 €/kg, levando a crer que a sua produção, através de processos que utilizem o Gás Natural como fonte fria, pode tornar-se bastante interessante, tanto do ponto de vista económico como ecológico.

1.5. Objetivo

De modo a criar um melhor contributo para o *front-end-project*, que poderá servir de suporte a um subsecente projeto de investimento, esta dissertação será focada na produção de gelo com qualidade alimentar.

O objetivo é desenvolver um pré-projeto de uma instalação de produção de gelo, associada ao processo de revaporização do GNL.

Esse pré-projeto inclui:

- Definição do princípio de funcionamento do sistema;
- Formulação físico-matemática em MATLAB;
- Análise e exploração paramétrica do modelo criado;

Especificação de todos os componentes e das soluções tecnológicas mais adequadas;

2. REGASEIFICAÇÃO DO GÁS NATURAL

A liquefação do Gás Natural é um processo que envolve uma enorme potência, na ordem dos 6,5 GW por Metro Cúbico Standard de GN/dia.

Atualmente, a regaseificação do GN é realizada através de permutadores de calor de quatro diferentes tipos: Vaporizadores Abertos, Vaporizadores de Combustão Submersos, Vaporizadores de Fluido Intermédio ou Vaporizadores de Ar Ambiente.

Nos vaporizadores abertos, é pulverizada água do mar sobre serpentinas ou placas de alumínio, aquecendo o GNL que nelas circula e assim vaporiza. Os vaporizadores de combustão submersos utilizam gases de combustão para aquecer um volume de água, onde está imersa uma serpentina utilizada por sua vez para aquecer o GNL e vaporizá-lo. Os vaporizadores de fluido intermédio, como o próprio nome indica, utilizam um fluido intermédio (p.ex.: glicol, butano, propano, etc.) que irá aquecer o GNL e vaporizá-lo. A água do mar pode ser utilizada como fonte de calor para transferir energia para o fluido intermédio. Já os vaporizadores de ar ambiente utilizam o ar da atmosfera como fonte quente. Este aquece e vaporiza o gás natural liquefeito que circula no interior de serpentinas alhetadas, normalmente dispostas na vertical.

Os vaporizadores referidos anteriormente, só por si, desperdiçam toda a energia envolvida no processo de regaseificação, isto é, as energias relativas ao calor latente de vaporização e ao calor sensível do gás natural vaporizado. As alternativas para aproveitar essa energia são vastas, desde utilizar o GNL como fonte fria em sistemas de produção de energia elétrica, utilizá-lo como fluido refrigerante ou uma combinação de ambos. Descrevem-se abaixo algumas destas alternativas em maior pormenor.

A implementação das referidas alternativas de reaproveitamento de energia ainda está numa fase bastante inicial, sendo o Japão o líder, com o seu terminal de GNL de Senboku considerado o mais eficiente do mundo no processo de regaseificação.

Através de processos como a liquefação de CO₂, ar condicionado, aquecimento de água, separação de ar, produção de energia elétrica e outros, o terminal de Senboku utiliza a energia de regaseificação do Gás Natural quase a 100%. Na Europa, o primeiro país a aproveitar a energia de regaseificação do GNL foi Espanha, no terminal de regaseificação de Huelva. A Enagas, empresa responsável pelo processo, utiliza um ciclo orgânico de Rankine, com água do mar como fonte quente. Esta mesma empresa está também a desenvolver um projeto para o terminal de Barcelona, a operar com um ciclo de expansão direta [9].

2.1. Métodos de reaproveitamento da energia de regaseificação de GNL

2.1.1. Ciclo de Expansão Direta

O ciclo de expansão direta é um método de produção de energia elétrica que utiliza o GNL como fluido de trabalho. O Gás Natural Liquefeito é comprimido por uma bomba, segue para um evaporador onde é vaporizado e, de seguida, é encaminhado para uma turbina onde é expandido, gerando trabalho. Segundo P. Dorosz *et al.* (2018) [10], os valores máximos de eficiência para ciclos de expansão direta simples rondam os 24% e, para os ciclos de expansão direta multi-estágio, cerca de 30%.

Na Figura 3.6 é possível observar um esquema de um ciclo de expansão direta simples, retirado de P. Dorosz *et al.* (2018) [10].

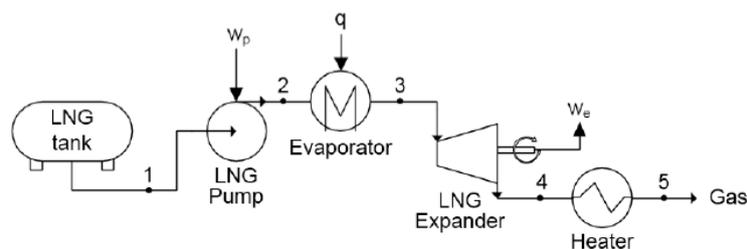


Figura 2.1. Esquema de ciclo de expansão direta simples [10].

2.1.2. Ciclo Orgânico de Rankine [ORC]

O ciclo orgânico de Rankine permite aproveitar a exergia do GNL, ao utilizá-lo como fonte fria do ciclo. O Gás Natural Liquefeito é enviado para o permutador de calor, onde evapora enquanto condensa um fluido de trabalho do ciclo. O fluido de trabalho condensado é comprimido por uma bomba e segue para o evaporador, onde vaporiza devido à troca de calor com o ar ou água do mar. Já no estado gasoso, o fluido comprimido entra na turbina e nela é expandido, produzindo trabalho e voltando ao permutador de calor para fechar o ciclo. Os ORC apresentam valores de eficiência na ordem dos 20%, de acordo com P. Dorosz *et al.* (2018) [10].

Na Figura 2.2 é apresentado um esquema de um ciclo orgânico de Rankine, que foi retirado de P. Dorosz *et al.* (2018) [10].

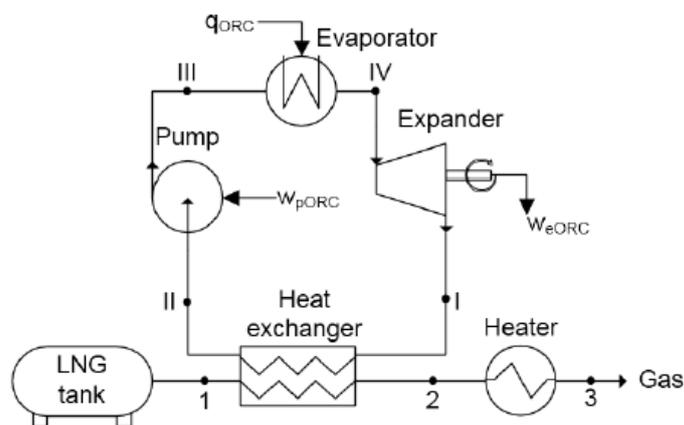


Figura 2.2. Esquema do processo de regaseificação com ciclo orgânico de Rankine [10].

2.1.3. Ciclo de Brayton

O ciclo de Brayton difere do ciclo orgânico de Rankine na medida em que se comprime o fluido de trabalho no estado gasoso, através de um compressor, em vez de o fazer no estado líquido, com uma bomba. O fluido é arrefecido pelo GNL, antes de ser comprimido pelo compressor, de modo a aumentar a eficiência térmica do ciclo. Após ser comprimido, o fluido é aquecido e segue para uma turbina, onde é expandido e gera energia sob a forma de eletricidade. A compressão é, por norma, multi-estágio.

2.1.4. Produção de gelo

Atualmente, a produção de gelo é feita recorrendo ao tradicional ciclo de refrigeração de compressão de vapor, onde um fluido refrigerante é comprimido no estado gasoso, aumenta de temperatura, é condensado pelo ar ambiente, segue para uma válvula de expansão onde diminui drasticamente de temperatura (efeito Joule-Thomson) e passa no evaporador, onde realiza as trocas de calor com a água a congelar. Este é o mesmo processo utilizado em frigoríficos e congeladores, domésticos ou industriais.

O processo de produção de gelo referido é, no entanto, pouco eficiente do ponto de vista energético, ou seja, o consumo de energia elétrica associado é bastante elevado. Observe-se, por exemplo, o caso de uma máquina de gelo, como a da Figura 2.3, com capacidade para produzir 150kg de gelo por dia, que consome 301,4 kWh / mês de eletricidade, o que equivale a cerca de 65 kWh por tonelada de gelo produzido [12].



Figura 2.3. Máquina de produção de gelo de 150kg [12].

Assumindo que este valor se mantém relativamente constante com o aumento de capacidade de produção, uma máquina com capacidade para produzir 20 toneladas de gelo por dia, metade da capacidade máxima da máquina de gelo da lota de Aveiro, consome cerca de 40000kW.h de eletricidade por mês. Utilizando como referência um preço médio de eletricidade de 0,15€/kWh, obtém-se um valor de cerca de 6000€ de eletricidade por mês, um valor substancialmente elevado [13].

Tendo em conta estes valores estimados, é possível perceber que um processo que reaproveite a energia da regaseificação do GNL para produzir gelo pode ser bastante interessante, tanto do ponto de vista ambiental como económico.

No entanto, apesar das possíveis vantagens de um sistema de reaproveitamento de energia para este fim, ainda não existe nenhum terminal de regaseificação de Gás Natural a utilizar esta tecnologia, o que dificulta o pré-projeto de uma instalação desse tipo.

3. PRODUÇÃO DE GELO ASSOCIADA À REGASEIFICAÇÃO DE GNL

O projeto de uma máquina de produção de gelo, associada ao processo de revaporização do Gás Natural Liquefeito, envolve a definição do princípio de funcionamento, a especificação da sua capacidade de produção, o dimensionamento e seleção dos vários componentes constituintes do sistema e a definição de um sistema de controlo. Todos estes processos têm por base cálculos matemáticos que, nesta dissertação, são realizados através do software MATLAB e com o recurso à base de dados REFPROP – NIST Reference Fluid Properties [14]. É de referir que, devido à elevada percentagem de metano, tipicamente entre 84 e 99%, na constituição do Gás Natural e para simplificação de cálculos, assume-se que o GN é constituído apenas por metano. Assume-se, também, que é regaseificado a uma pressão de 3 bar. Esta é uma pressão estimada para a pressão de saída do GNL do reservatório em que é transportado.

3.1. Princípio de funcionamento

No tradicional ciclo de refrigeração de compressão de vapor, o fluido refrigerante é comprimido no estado gasoso, aumentando a sua temperatura até ser possível ocorrer condensação por troca de calor com o ar ambiente. Após ser condensado, o fluido refrigerante passa numa válvula de expansão que reduz a pressão do fluido e, consequentemente, reduz a sua temperatura até à temperatura de evaporação desejada.

O novo ciclo, no entanto, vai fazer uso das baixas temperaturas (de cerca de -160°C) a que ocorre o processo, isobárico, de vaporização do GNL.

O novo ciclo de refrigeração, que se pode observar na Figura 3.1, é composto por um evaporador, onde ocorre a produção de gelo; o condensador, onde é feita a permuta de calor entre o fluido refrigerante e o GNL; um reservatório e uma bomba de circulação, não possuindo nenhum compressor nem válvula de expansão.

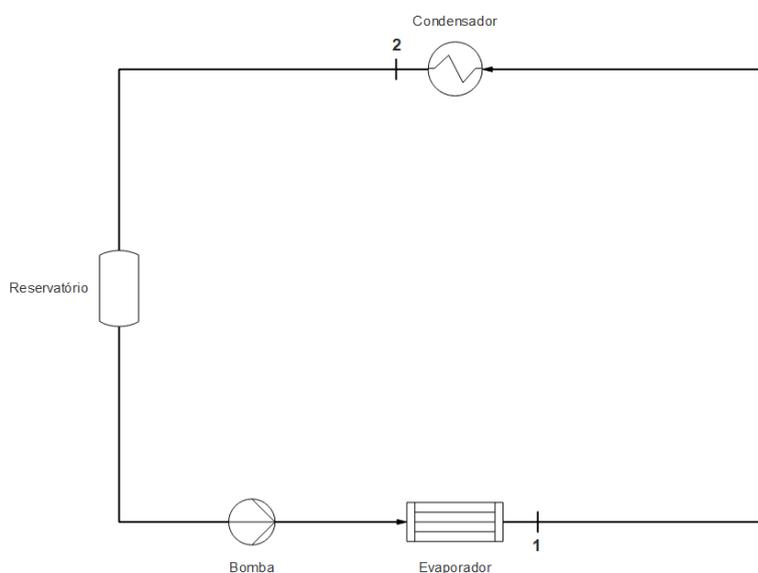


Figura 3.1. *Process flow diagram* simples do Ciclo Novo.

Quando a instalação se encontra parada, as bombas estão desligadas e o fluxo de fluido refrigerante está interrompido. O sistema (e o fluido de trabalho) está em equilíbrio térmico com o exterior sendo a pressão determinada pela temperatura de equilíbrio ($P = P_{sat}@T_{equil.}$).

Ao observar o gráfico P-V da amónia, apresentado na Figura 3.2, percebe-se que o aumento de pressão a volume constante anteriormente referido leva a um aumento da fração de gás na mistura bifásica do fluido refrigerante.

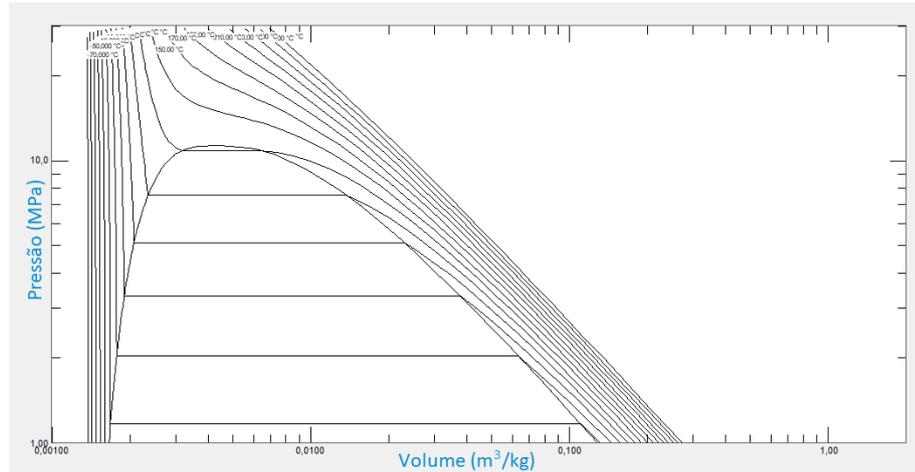


Figura 3.2. Gráfico Pressão-Volume da amónia.

A bomba de circulação apenas bombeia líquido saturado, portanto, se a quantidade de líquido presente antes do arranque for reduzida, todo o líquido será bombeado para jusante da bomba antes de receber líquido de novo a montante. Nesse caso, a bomba perderia sucção (“desferra”) e a circulação de fluido seria interrompida.

Para evitar esse problema, é necessário garantir que a quantidade de líquido no sistema, à temperatura ambiente, é superior a, digamos, duas vezes a quantidade necessária para inundar a bomba, o condensador e as tubagens. Essa quantidade de líquido pode ser calculada pela equação (3.1), onde ρ é a massa volúmica do fluido refrigerante.

$$m_{líq_arranque} = 2 \times \rho \times (V_{bomba} + V_{condensador} + V_{tubagem}) \quad (3.1)$$

Quando se pretende iniciar o funcionamento do sistema, a bomba de circulação de fluido é ligada, assim como a passagem de GNL no condensador. Inicialmente, o sistema encontra-se a uma temperatura igual à temperatura exterior. De modo a atingir as temperaturas e pressões de funcionamento, faz-se circular o fluido refrigerante líquido pelo condensador, arrefecendo-o até que se atinja a temperatura de evaporação desejada. Durante este processo de arrefecimento, é efetuado um bypass ao evaporador, de modo a diminuir a quantidade de líquido necessária e a acelerar o processo. O controle deste processo é crítico para evitar o risco de congelamento do fluido refrigerante.

O fluido refrigerante líquido que sai arrefecido do condensador, mistura-se com o fluido que se encontra no reservatório e diminui a temperatura deste último. Assim que todo fluido refrigerante no sistema atinge a temperatura de evaporação, o bypass ao evaporador é desligado e liga-se a bomba de água, dando início ao processo evaporativo e à resultante produção de gelo.

3.2. Condensador

O condensador é um permutador de calor, ou seja, é um dispositivo que permite que ocorra transferência de energia, sob forma de calor, entre dois ou mais fluidos. É este equipamento que vai realizar as trocas de calor entre o GNL e o fluido refrigerante, condensando este último e vaporizando o gás natural.

Permutador de calor de placas

Um permutador de calor de placas é constituído por diversas placas de transferência de calor que são agrupadas entre uma placa fixa e uma placa de pressão móvel, exceto no caso dos permutadores soldados, em que não existe uma placa móvel. As placas, seladas através de juntas, são nervuradas para que, uma vez justapostas, criem canais que permitem a passagem dos fluidos. Estes, que circulam em contra corrente para aumentar a eficácia térmica do permutador, entram em contacto com as placas, através das quais se realizam as trocas de calor [15]. Na Figura 3.3, é possível observar um esquema de um permutador de calor de placas.

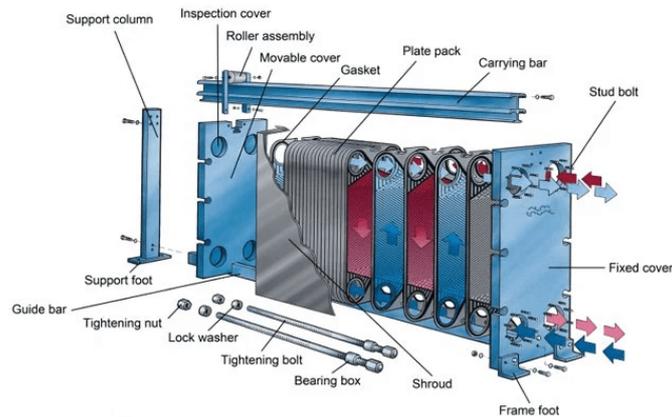


Figura 3.3. Esquema de um permutador de calor de placas [15].

Algumas das vantagens da utilização de um permutador de calor de placas são [16]:

- Elevado coeficiente de transmissão de calor;
- *Design* compacto;
- Fácil instalação e manutenção;
- Facilmente adaptável (removendo ou acrescentando placas).

Quanto a desvantagens:

- Temperatura de funcionamento limitada pelo material das juntas;

Permutador de calor de carcaça e tubo

Os permutadores de calor de carcaça e tubos são constituídos, como o próprio nome indicia, por tubos inseridos no interior de uma virola cilíndrica. O princípio de funcionamento deste tipo de permutadores passa pela circulação de um fluido através do interior dos vários tubos enquanto outro fluido circula dentro do espaço existente entre os tubos, no interior da virola, em sentido contrário, como se pode observar na Figura 3.4. A transferência de energia, sob a forma de calor, ocorre devido ao contacto de ambos os

fluidos com os tubos, que são constituídos por um material com elevada condutividade térmica [17].

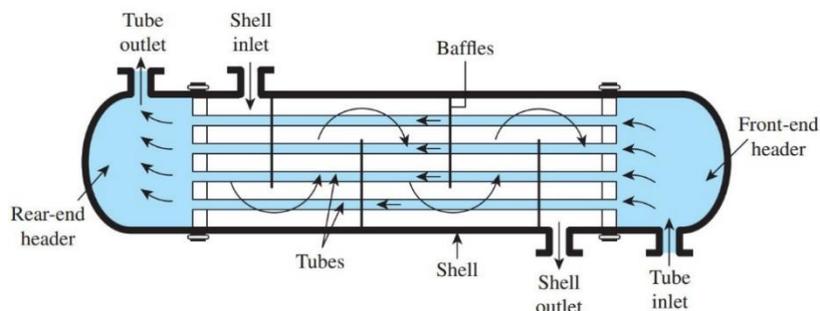


Figura 3.4. Esquema de um permutador de carcaça e tubo [17].

Algumas das vantagens dos permutadores de calor de carcaça e tubos são [18]:

- Podem ser projetados para suportar pressões bastante elevadas;
- Apresentam bom funcionamento a altas e baixas temperaturas;
- São resistentes a grandes diferenças de temperatura;
- Têm uma fácil manutenção;
- Robustez.

Em relação a desvantagens:

- Elevadas dimensões que, por vezes, podem dificultar a sua instalação;
- Coeficiente de transmissão de calor mais reduzido que outros tipos de permutador;
- Possíveis problemas de corrosão nas soldaduras da parte exterior da carcaça.

Permutador de calor de carcaça e placas

Como o próprio nome indica, este tipo de permutador é constituído por placas inseridas numa virola cilíndrica. As placas são circulares, para garantir uma distribuição uniforme de tensões, e perfiladas, para criar canais de passagem para o fluido. Os permutadores de calor de carcaça e placas trabalham em contra corrente, de modo a aumentar a eficácia do processo de transferência de calor.

Algumas vantagens deste tipo de permutadores [19]:

- Altamente resistentes a choques térmicos;
- Os permutadores de carcaça e placas soldados suportam níveis de pressão e temperatura elevados.

Desvantagens:

- Os permutadores de carcaça e placas soldados não podem ser abertos para limpeza, necessitando de sistemas de limpeza no local.

Na Figura 3.5 é possível observar um modelo 3D de um permutador de carcaça e placas [20].

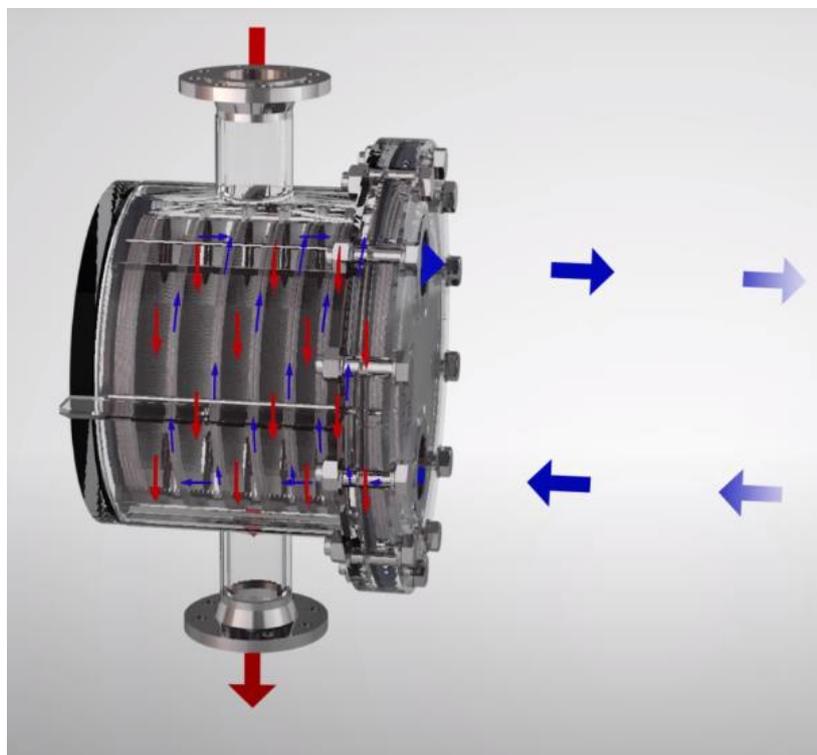


Figura 3.5. Modelo 3D de permutador de calor de casco e placas [20].

Ao partir para a seleção do condensador para o caso em questão, surgem alguns problemas, principalmente devido à necessidade de trabalhar com temperaturas extremamente baixas (criogénicas) e com a elevada diferença de temperatura entre o GNL e o fluido refrigerante. A maioria dos materiais das juntas, utilizados nos típicos permutadores de calor, não suportam temperaturas tão baixas como as atingidas pelo GNL, sendo uma das soluções os permutadores totalmente soldados.

Ao consultar fornecedores de permutadores de calor, a Vahterus foi uma das hipóteses que surgiu. Contudo, e segundo especialistas desta empresa, uma elevada diferença de temperatura entre o Gás Natural e o fluido refrigerante pode criar problemas de congelamento deste último. Uma solução apresentada foi a utilização de um sistema de dois permutadores de calor de carcaça e placas, em cascata, em que um realiza a troca de calor entre o GNL e um fluido intermédio e o outro entre esse mesmo fluido intermédio

e um fluido refrigerante. Este sistema já foi testado com sucesso em pequena escala, em Espanha, utilizando o GNL como fonte fria, etano como fluido intermédio e CO₂ como fluido refrigerante. À data de 2020, estava a ser implementado à escala real em Barcelona e Huelva [21]. Tendo em conta tudo isto, foi decidida a utilização do sistema proposto pela Vahterus A ficha técnica deste sistema pode ser consultada nos anexos.

O sistema em cascata a utilizar é constituído por um permutador de calor de GNL/fluido intermédio e por um permutador de fluido intermédio/fluido refrigerante. No permutador de calor GNL/fluido intermédio, o Gás Natural é vaporizado e o fluido intermédio é condensado. Este, no estado líquido, desce para o permutador de fluido intermédio/fluido refrigerante, por efeito da gravidade, e nele é vaporizado ao mesmo tempo que o fluido refrigerante condensa.

3.3. Evaporador

O evaporador é o componente onde se forma o gelo, através do processo de solidificação da água. É nele que ocorre a transferência de energia da água para o fluido refrigerante, que resulta na vaporização do fluido e na solidificação da água.

Ao falar de gelo fragmentado, para uso comercial, podem considerar-se dois diferentes tipos: em cubos e em escamas. O gelo em cubos pode ser maciço ou oco.

Dependendo do tipo de gelo a produzir, são utilizados diferentes tipos de máquinas [22]:

- **Máquina de produção de gelo de tambor:** a água é aplicada no interior ou exterior de um tambor refrigerado, solidifica na superfície do tambor e, posteriormente, dispositivos mecânicos rotativos soltam as finas camadas de gelo formado. A espessura do gelo pode variar entre 1 e 4,5 mm, dependendo da velocidade de rotação da máquina, da temperatura de evaporação, da temperatura da água e do caudal de água.

- **Máquina de produção de gelo de tubos:** a água escorre pelo exterior de tubos refrigerados, solidificando na sua superfície. O fluido refrigerante circula no interior dos tubos e evapora durante o processo de solidificação do gelo. No final do ciclo de solidificação, a circulação de água é interrompida e faz-se passar fluido refrigerante quente no interior dos tubos, o que solta o gelo da superfície dos mesmos. O gelo cai no fundo da máquina, onde é então fragmentado por ferramentas de corte. A espessura do gelo varia tipicamente entre 5 e 13 mm, dependendo do tempo de ciclo (que varia entre 8 e 15 min), da temperatura de evaporação, da temperatura da água e do caudal de água.
- **Máquina de produção de gelo de placas:** neste tipo de máquinas de gelo, a água escorre através de placas verticais e solidifica na sua superfície exterior. O fluido refrigerante circula no interior das placas, evaporando durante o processo de solidificação da água, assim como nas máquinas de tubos. No final do ciclo de solidificação, faz-se circular fluido refrigerante quente no interior das placas, soltando assim o gelo formado na sua superfície. Em máquinas que só produzem gelo num dos lados da placa, a extração do gelo é feita através de água que circula no lado da placa oposto ao da formação de gelo, aquecendo assim o fluido refrigerante do interior da placa, o que leva o gelo a soltar-se da mesma. O gelo cai para o fundo da máquina e, assim como nas máquinas de tubos, é fragmentado. A espessura do gelo produzido em máquinas de placas varia entre 6 e 20 mm, dependendo do tempo dos ciclos de solidificação (12 a 45 min).

Na visita às instalações de frio da lota da Docapesca de Aveiro [23], observou-se a utilização de um evaporador de placas da H. Seabra [24], que se pode ver na Figura 3.6, na sua máquina de produção de gelo de 40 toneladas. De modo a simplificar a seleção de um evaporador para o pré-projeto desta dissertação, é escolhido um evaporador igual, devido ao facto de ser uma solução tecnológica com eficácia já comprovada.



Figura 3.6. Vista interior e exterior do evaporador da máquina de gelo da lota de Aveiro.

3.4. Bomba

A bomba é o componente do sistema encarregue da circulação do fluido refrigerante. Tipicamente, nos sistemas de produção de gelo comuns, a pressão do fluido refrigerante é relativamente baixa. Na máquina de gelo da lota de Aveiro, quando o sistema estava parado e se encontrava à temperatura ambiente, a pressão era de cerca de 8 bar. Quando estava em funcionamento, chegava a atingir pressões na ordem dos 20 bar no condensador. Uma vez que no sistema a desenvolver nesta dissertação não há necessidade de pressurizar o fluido refrigerante, as pressões utilizadas serão menores do que em máquinas de gelo existentes uma bomba de circulação simples, como uma bomba centrífuga, é suficiente para bombear o fluido refrigerante.

As bombas centrífugas são um tipo de bomba hidráulica que, através de um rotor, promovem o aumento da energia cinética e potencial do fluido. O rotor, chamado de impulsor, é constituído por pás que impulsionam o fluido através do efeito de força centrífuga [25]. O dimensionamento e seleção da bomba requerem cálculos de determinados parâmetros, como a variação de pressão do fluido e o caudal. Estes cálculos são efetuados no capítulo seguinte. Na Figura 3.7 é observado um exemplo de uma bomba centrífuga.



Figura 3.7. Bomba centrífuga [26].

4. MODELAÇÃO DO SISTEMA

4.1. Modelo Matemático

Tendo definido o novo ciclo de refrigeração, é agora possível realizar a sua modelação matemática em MATLAB, começando pelos balanços energéticos.

O fluido refrigerante selecionado é a amónia, cuja fórmula química é NH₃ e a designação ASHRAE é R717. É um fluido muito utilizado na refrigeração industrial desde a década de 1930, conhecido pela sua elevada eficiência energética e impacto ambiental mínimo [27]. Numa visita às instalações de frio da lota da Docapesca de Aveiro [23], observou-se que o NH₃ é o fluido utilizado, daí a seleção do mesmo para o pré-projeto desta dissertação.

Tendo sido escolhido para esta dissertação um evaporador igual àquele utilizado na lota de Aveiro, foram escolhidos os mesmos valores da temperatura de evaporação e da temperatura da água, conforme a Tabela 4.1. O valor da temperatura de condensação é igual ao da temperatura de evaporação, como se pode perceber pelo gráfico da Figura 4.1, uma vez que não existe compressão do fluido e se admite que a tubagem de ligação entre o evaporador e o condensador está bem isolada pelo que todo o ciclo trabalha à mesma temperatura.

Tabela 4.1. Temperaturas de funcionamento do sistema.

Nome	Símbolo	Valor
Temperatura de evaporação	T_{evap}	-20°C
Temperatura de condensação	T_{cond}	-20°C
Temperatura da água	$T_{água}$	20°C
Temperatura do gelo	T_{gelo}	-10°C

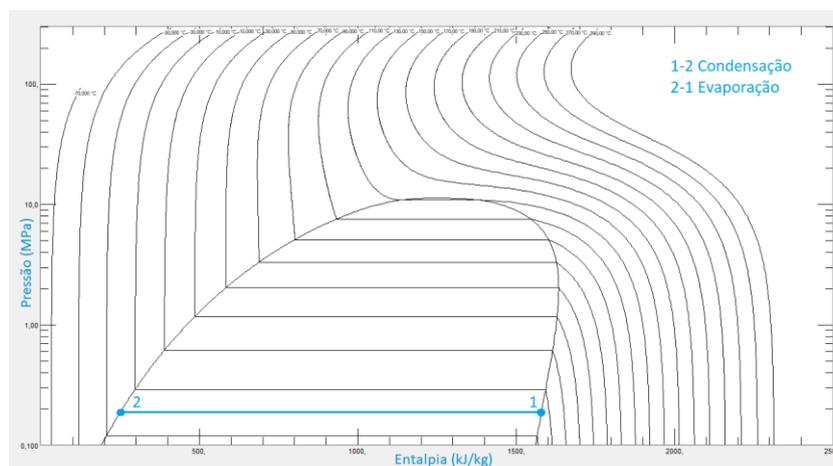


Figura 4.1. Gráfico Pressão-Entalpia da amônia.

Definiu-se o ponto 1 do sistema para a saída do evaporador e o ponto 2 para a saída do condensador, como é apresentado na Figura 3.1.

Para o ponto 1 do sistema, utilizando uma temperatura T_{evap} , uma qualidade de vapor de 100% e com o recurso ao REFPROP, obtêm-se os dados de pressão P_1 e entalpia h_1 . Para o ponto 2, utilizando a mesma temperatura e uma qualidade de vapor de 0%, é obtida a entalpia h_2 . A pressão P_2 é igual à pressão P_1 . Estes valores são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Propriedades do ciclo novo para cada ponto.

	Temperatura [°C]	Pressão [bar]	Qualidade de vapor [%]	Entalpia [kJ/kg]
Ponto 1	-20	1,9	100	1580,8
Ponto 2	-20	1,9	0	251,7

Feito o balanço energético do ciclo, é necessário calcular a energia requerida para a produção de 1kg de gelo, cujo valor corresponde à soma da energia necessária ao arrefecimento da água até aos 0°C, do calor latente de solidificação e da energia necessária

ao arrefecimento do gelo. Estes valores são calculados através das equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4) e com recurso ao REFPROP.

$$E_{Arref,água} = m \times c_{p_{água}} \times (T_{água} - 0^{\circ}C) \quad (4.1)$$

$$E_{Solid} = m \times L \quad (4.2)$$

$$E_{Arref,gelo} = m \times c_{p_{gelo}} \times (0^{\circ}C - T_{gelo}) \quad (4.3)$$

$$E_{Gelo} = E_{Arref,água} + E_{Solid} + E_{Arref,gelo} \quad (4.4)$$

Os valores calculados nas equações anteriores são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Energias necessárias à produção de 1kg de gelo.

Nome	Valor	
$E_{Arref,água}$	83,69	[kJ]
E_{Solid}	334,00	[kJ]
$E_{Arref,gelo}$	20,27	[kJ]
E_{Gelo}	437,96	[kJ]

O próximo passo é calcular a energia necessária ao processo de regaseificação do Gás Natural, E_{vap} , e ao aquecimento do mesmo, E_{aque} . Dado que o GNL sai do primeiro permutador de GNL/Etano à temperatura $T_{GNL,Saída}$ de $-50^{\circ}C$, segundo a proposta da Vahterus que se pode ver mais à frente, calcula-se a energia necessária ao aquecimento do Gás Natural até essa mesma temperatura, $T_{GNL,Saída}$. A energia de vaporização do GNL corresponde à variação de entalpia, h , do processo de vaporização, obtida através da equação (4.5)(4.6). Os valores das entalpias, assim como do calor específico, c_p , são obtidos através do REFPROP. O calor sensível associado ao

aquecimento do GN, após a sua vaporização, obtém-se através da equação (4.6). Os valores calculados podem ser observados na Tabela 4.4.

$$E_{vap} = h_{(P=3 \text{ bar}; x=0)} - h_{(P=3 \text{ bar}; x=1)} \quad (4.5)$$

$$E_{aque} = c_{p_{GNL}} \times (T_{GNL,Saída} - T_{GNL}) \quad (4.6)$$

Tabela 4.4. Energia necessária ao processo de regaseificação do GNL.

Nome	Símbolo	Valor	
Energia de Vaporização	E_{vap}	479,88	kJ/kg
Energia de Aquecimento	E_{aque}	228,87	kJ/kg
Energia Total	E_{Total}	708,75	kJ/kg

De seguida, é preciso obter o valor da quantidade de GNL vaporizado por dia, de modo a calcular a energia diária total necessária à regaseificação do Gás Natural. Os valores de consumo de GN podem variar bastante ao longo do dia, sendo necessário avaliar essas variações de modo a dimensionar da melhor forma a máquina de produção de gelo.

Os únicos dados disponíveis, relativos aos consumos de GN na UAG da Ribeira do Socorridos, são dados de consumo diário, não sendo assim possível perceber o padrão de consumo diário e as suas variações. No entanto, uma correlação entre dados de consumos energéticos no país e os dados disponíveis da UAG permitem estimar um padrão de consumo diário aproximado. Para tal é necessário, em primeiro lugar, perceber qual o dia do ano que se assemelha mais à média de consumo de energia elétrica. Sendo que os dados fornecidos pela REN são dados de consumo mensais, apresentados em intervalos de 15 minutos, analisar os dados de um ano completo envolveria o tratamento

de uma quantidade enorme de dados [28]. Por esse motivo, escolhe-se o mês de novembro de 2020. Calcula-se a média de consumo diário e verifica-se que o dia com menor desvio absoluto médio é o dia 2 de outubro. Calcula-se, então, a percentagem de consumo horário em relação ao consumo total desse dia. No gráfico da Figura 4.2, pode observar-se a variação do consumo de energia elétrica em Portugal, ao longo desse dia.

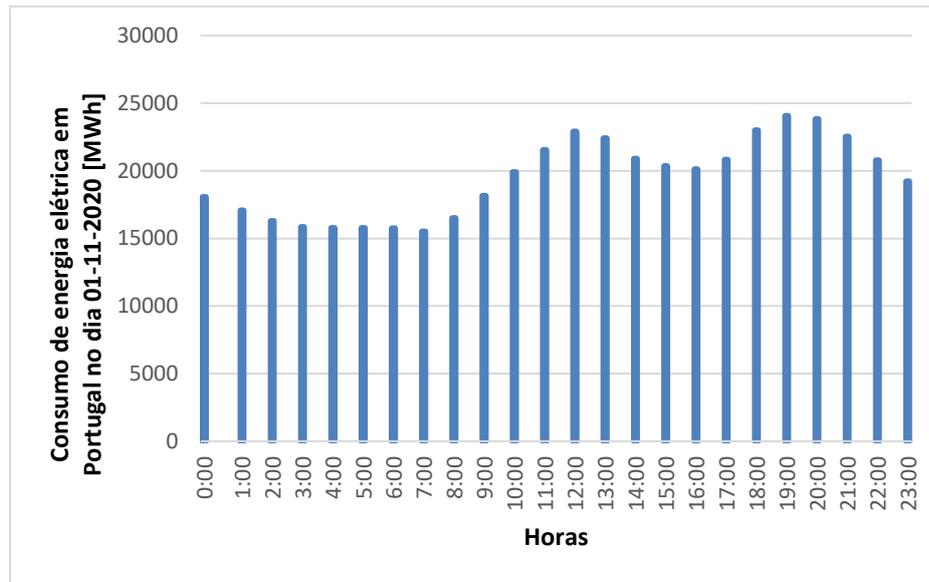


Figura 4.2 Dados de consumo de energia elétrica em Portugal no dia 02-11-2020

Através dos dados de consumo diário de GN em 2017 (último ano disponível), na UAG da Ribeira dos Socorridos, calcula-se a média de consumo diário e o desvio absoluto médio, para perceber qual o dia mais semelhante à média, sendo esse dia 24 de julho de 2017. Seguidamente, extrapolam-se as percentagens de consumo horário de energia elétrica, calculadas anteriormente, e obtêm-se valores aproximados de consumo horário de GN para o dia em questão. Os dados obtidos são apresentados na Figura 4.3.

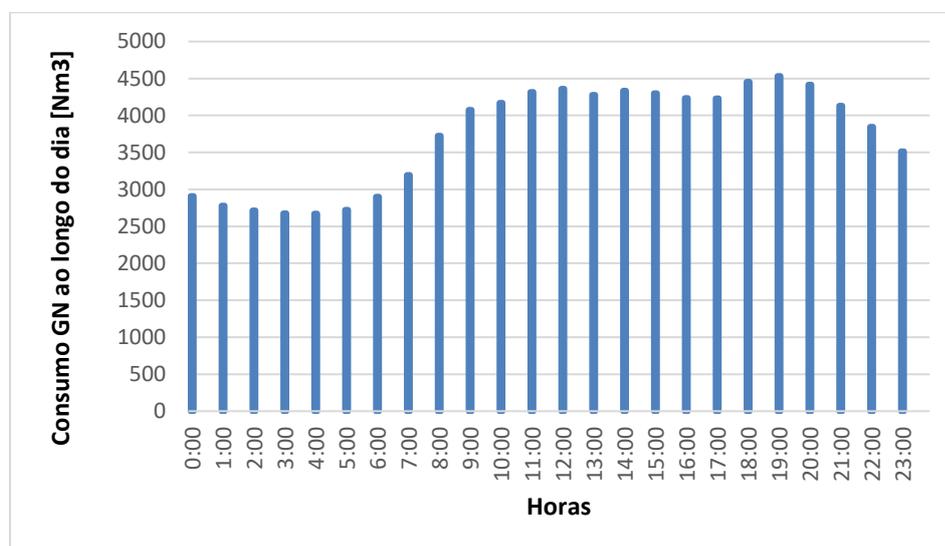


Figura 4.3 Estimativa de consumo horário de GN na UAG da Ribeira dos Socorridos.

A partir deste gráfico, é possível perceber que o consumo horário de GN, ao longo do dia, varia entre cerca de 2600 Nm³ e 4500 Nm³. Tendo obtido estes valores, é possível então calcular a capacidade de produção de gelo através do processo de regaseificação do Gás Natural. Utilizando o valor de consumo horário mínimo, 2661,91 Nm³, e o valor da densidade do metano, retirado do REFPROP, chega-se ao valor da massa de GN regaseificado por hora, de 1910 kg.

Para perceber qual a massa de GN regaseificado por dia no sistema de produção de gelo, é necessário definir o tempo de funcionamento da máquina. Ter a instalação a funcionar 24 horas por dia pode tornar-se difícil de executar logisticamente, devido à necessidade de transportar o gelo, ao controlo da instalação, etc. Nesse sentido, o dimensionamento da máquina é feito para um funcionamento de 10 horas por dia. Tendo em conta esse tempo de funcionamento, obtém-se um valor de 19100 kg de GN regaseificado por dia.

Posteriormente, de modo a obter o valor total de energia necessária ao processo de regaseificação, utiliza-se a equação (4.7).

$$E_{Total,Dia} = E_{Total} \times m_{GNL} \Leftrightarrow \quad (4.7)$$

$$\Leftrightarrow E_{Total,Dia} = 708,75 \times 19100 = 1,35 \times 10^7 \text{ kJ}$$

Por fim, com o valor anteriormente obtido e o valor da energia necessária à formação de 1 kg de gelo, calcula-se o valor de gelo produzido por dia, através da equação (4.8).

$$m_{Gelo,Dia} = \frac{E_{Total,Dia}}{E_{Gelo}} \Leftrightarrow \quad (4.8)$$

$$\Leftrightarrow m_{Gelo,Dia} = 30907 \text{ kg}$$

É possível perceber que, mesmo realizando os cálculos com o valor mínimo de consumo horário de GN durante o dia, é possível obter valores de cerca de 31 toneladas de gelo produzido por dia. Sem o acesso a dados sobre a procura de gelo na ilha da Madeira e por comparação à capacidade de produção de gelo da lota de Aveiro, de 40 toneladas por dia, dimensiona-se a máquina de produção de gelo desta dissertação para uma capacidade de 40 toneladas de gelo por dia.

Agora que estão calculados todos os dados necessários, é altura de dimensionar a máquina de gelo, desde a potência de condensação aos caudais de fluido refrigerante.

A potência de condensação para este sistema é igual à potência de evaporação, visto que não existe compressão. A potência de evaporação é dada pela equação (4.9), para uma massa de gelo, m_{Gelo} , de 40 toneladas e um tempo de produção, $t_{produção}$, de 10h.

$$P_{cond} = P_{evap} = \frac{E_{Gelo} \times m_{Gelo}}{t_{produção}} = 486,62 \text{ kW} \quad (4.9)$$

Posto isto, calcula-se o caudal mássico de fluido refrigerante através da equação (4.10), utilizando os valores de P_{cond} e das entalpias para os pontos 1 e 2.

$$\dot{m}_{R717} = \frac{P_{cond}}{(h_1 - h_2)} = 0,37 \text{ [kg/s]} \quad (4.10)$$

Já o caudal volúmico do fluido no estado líquido saturado é dado pela equação (4.11), onde a densidade, $\rho_{R717Liq}$, é obtida com recurso ao REFPROP. Este caudal volúmico é necessário aquando da seleção da bomba.

$$\dot{V}_{R717Liq} = \frac{\dot{m}_{R717}}{\rho_{R717Liq}} = 1,98 \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (4.11)$$

Na Tabela 4.5, estão resumidos os parâmetros de dimensionamento da máquina de produção de gelo.

Tabela 4.5. Parâmetros de dimensionamento.

Nome	Símbolo	Valor	
Capacidade de produção	m_{Gelo}	40	Toneladas
Tempo de produção	$t_{produção}$	10	h
Potência de condensação	P_{cond}	486,62	kW
Caudal mássico	\dot{m}_{R717}	0,37	kg/s
Caudal volúmico do líquido	$\dot{V}_{R717Liq}$	1,98	m^3/h

4.2. Princípio de funcionamento detalhado

Controlo do arranque:

Como foi referido no capítulo 3, de forma a reduzir a quantidade de líquido necessária no arranque e a acelerar esse processo, é realizado um bypass ao evaporador. O fluido é desviado do evaporador e segue diretamente da bomba ao condensador, até que atinja a sua temperatura de funcionamento de -20°C . O controlo do bypass é realizado da seguinte forma:

- Como pode ser observado no *process flow diagram* da Figura 4.4, um sensor mede a temperatura do fluido à saída do reservatório e transmite essa informação a um controlador de temperatura;
- Assim que se atinge a temperatura definida, -20°C , o controlador de temperatura envia um sinal de abertura para a válvula que está à entrada do evaporador e, após isso, envia um sinal de fecho para a válvula que faz o *bypass* ao evaporador;
- Quando a máquina é desligada e a temperatura sobe acima dos -20°C , o controlador de temperatura emite um sinal de abertura para a válvula de *bypass* e um sinal de fecho para a válvula à entrada do evaporador, para que esteja feito o *bypass* quando a máquina voltar a ser ligada.

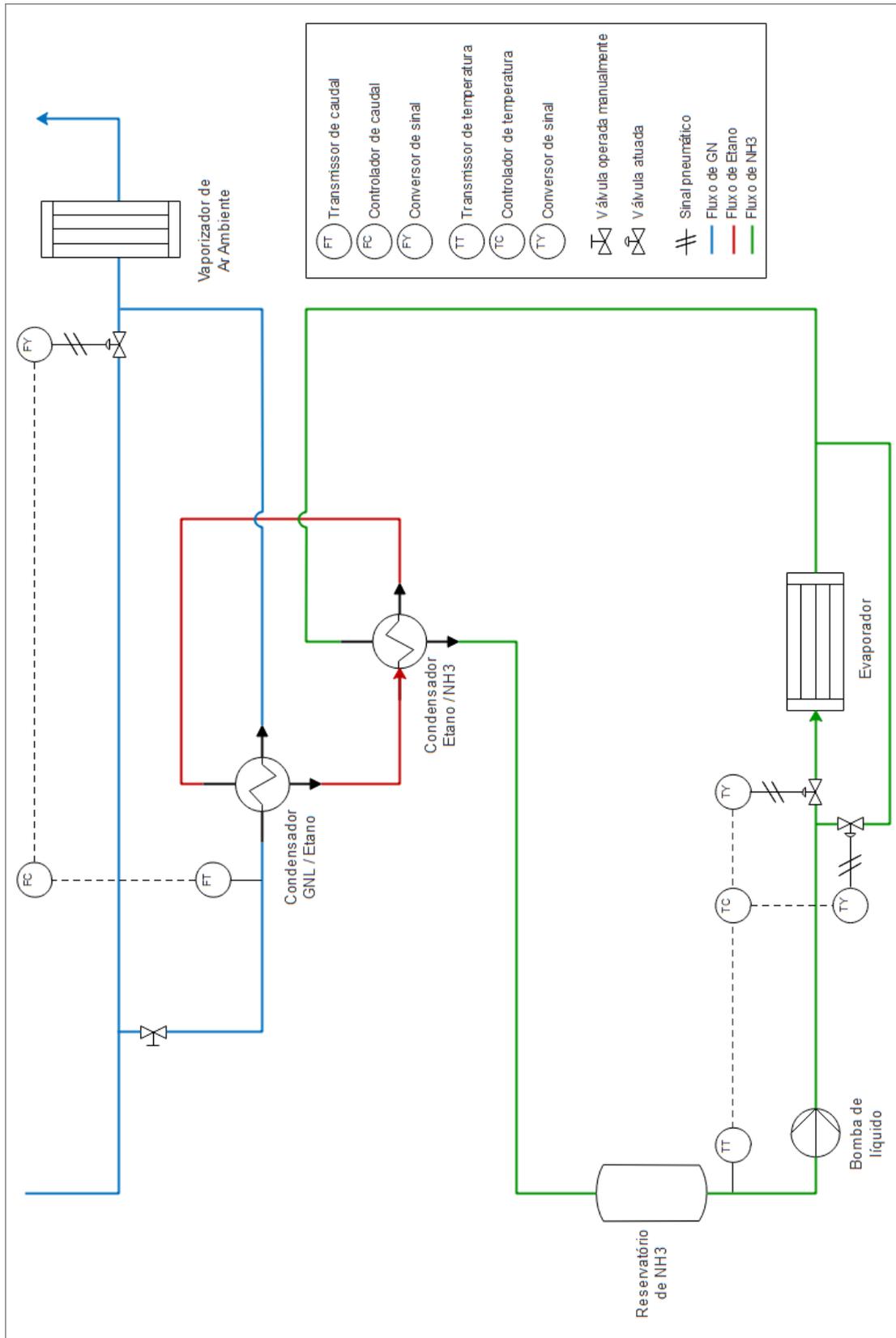


Figura 4.4. Process flow diagram.

Controlo do bypass à linha principal do GNL:

O condensador deve ser instalado em *bypass* à linha principal de GNL por dois motivos:

- Durante os períodos de paragem da máquina de gelo, o GNL tem que ser regaseificado nos vaporizadores de ar ambiente já existentes;
- Mesmo durante o funcionamento da máquina, é possível que o gás natural não seja totalmente regaseificado no condensador, sendo necessário passar ainda pelos vaporizadores de ar ambiente. Por esse motivo, a saída do condensador deve ser ligada à linha principal de GNL antes do vaporizador de ar ambiente.

Este bypass à linha principal de GNL é controlado da seguinte forma:

- Uma válvula operada manualmente é colocada no início da linha de bypass. Garante-se deste modo a presença do operador no local para o arranque do processo de produção de gelo;
- Imediatamente após o início do funcionamento da máquina de gelo, o operador abre a válvula de bypass, fazendo passar o GNL pelo condensador. Quando se pretende desligar a máquina de produção de gelo, esta válvula deve ser fechada pelo operador;
- Durante o funcionamento do sistema, para controlar a passagem de GNL pela linha principal, é utilizada uma válvula de controlo imediatamente antes da junção da saída do condensador com a linha principal. Esta válvula de controlo permite induzir uma perda de carga na linha principal e forçar o GNL a circular pelo condensador na quantidade (caudal) desejada;
- Um sensor mede o caudal à entrada do condensador e transmite essa informação ao controlador de caudal. Este envia um sinal à válvula de controlo, que regula a quantidade de GNL que passa na linha principal.

Deste modo, é possível induzir uma perda de carga na válvula de controlo igual à perda de carga nominal do condensador. Assim, equilibramos a distribuição de GNL entre o condensador e os vaporizadores de ar ambiente de modo a garantir a regaseificação em condições de consumo variáveis.

Condensador

Como é referido no capítulo 3, o condensador a ser utilizado consiste num sistema de dois permutadores de calor em cascata e é fornecido pela Vahterus. Um dos permutadores, o PSHE 4LL-174/3/1, realiza as trocas de calor entre o GNL e um fluido intermédio, o etano, enquanto o outro permutador, o PSHE 5HH-140/1/1, realiza as trocas de calor entre o etano e o fluido refrigerante, a amónia. O etano tem uma temperatura de funcionamento de -35°C , sendo condensado no permutador de GNL/etano e vaporizado no de etano/amónia. Na Figura 4.5 observa-se um modelo 3D de um permutador de calor da Vahterus semelhante aos referidos [29].



Figura 4.5. Modelo 3D de um permutador de calor da Vahterus.

O condensador tem uma potência de 486,62 kW e é fabricado em aço AISI 316L.

Na Figura 4.6 observa-se o esquema dos permutadores em cascata, que consta na proposta técnica detalhada. Esta proposta técnica, apresentada nos anexos, é fornecida pela Vahterus, de acordo com os parâmetros de dimensionamento calculados.

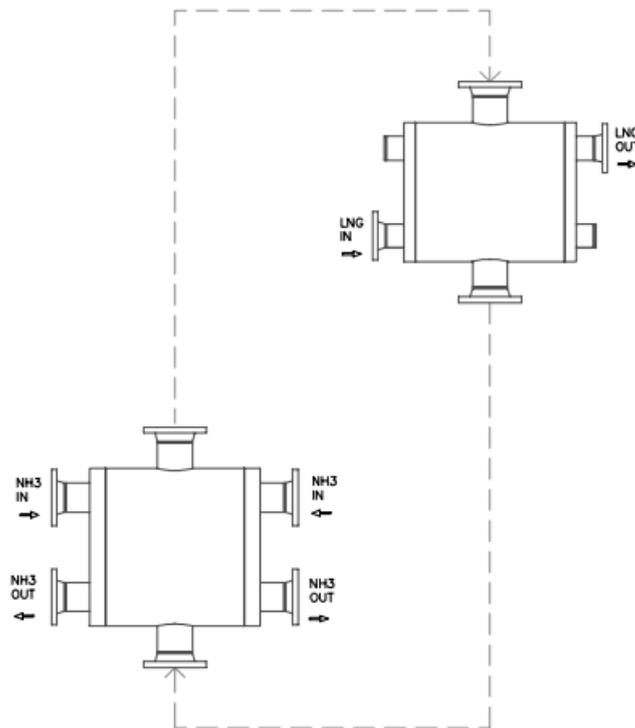


Figura 4.6. Esquema dos permutadores de calor em cascata.

Evaporadores

O evaporador selecionado é um evaporador de placas da H. Seabra, de 40 toneladas. Na impossibilidade de conseguir um esquema do mesmo, é apresentada uma foto de um evaporador igual na Figura 4.7, que se encontra em funcionamento nas instalações de frio da lota de Aveiro [24].



Figura 4.7. Evaporador da lota de Aveiro.

Bomba

Após a consulta de vários fabricantes de bombas, a Gruppo Aturia é a marca selecionada. O motivo da escolha prende-se com o facto de esta ser uma marca de referência a nível mundial, fornecida pela Axflow, e de oferecer um tipo de bomba centrífuga que respeita todos os parâmetros definidos pelo modelo matemático, como a temperatura de funcionamento e caudal máximo [30]. A bomba selecionada, que pode ser observada na Figura 4.8, é uma bomba centrífuga da série STM.



Figura 4.8. Bomba centrífuga Gruppo Aturia STM [30].

Para garantir que é selecionada a bomba correta, recorre-se às curvas características fornecidas para os modelos STM, apresentadas na Figura 4.9. As curvas características, assim como outras especificações, podem ser encontradas na ficha técnica da bomba, nos anexos.

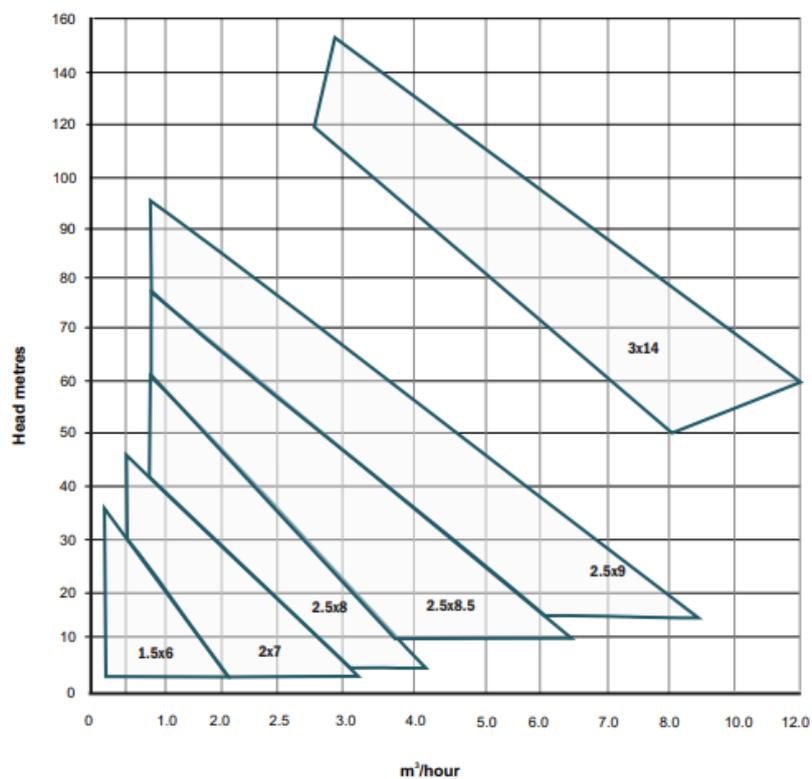


Figura 4.9. Curvas características da série STM.

Uma vez que as perdas de carga no sistema não são conhecidas, exceto para o condensador, estima-se de um modo muito grosseiro as perdas de carga totais, P_{carga} , como sendo iguais a 3 vezes as perdas de carga no condensador, portanto:

$$P_{carga} = 3 \times 0,76 = 2,28 \text{ [kPa]} = 2280 \text{ [Pa]} \quad (4.12)$$

A altura manométrica da bomba, H , pode ser calculada através da equação (4.13), onde g corresponde à aceleração da gravidade e ρ_{NH_3} à densidade da amónia no estado líquido.

$$H = \frac{P_{carga}}{g \times \rho_{NH_3}} = \frac{2280}{9,8 \times 665,1} = 0,34 \text{ m} \quad (4.13)$$

Assim, através da observação das curvas características da Figura 4.9 e tendo em conta a altura manométrica calculada e o caudal de fluido líquido, seleciona-se a bomba STM 1,5×6.

Válvulas

As válvulas selecionadas para realizarem o *bypass* ao evaporador são válvulas de controlo elétricas da Danfoss, uma empresa multinacional de renome que oferece variadas soluções tecnológicas.

A gama de válvulas escolhida é a ICM, que é projetada para trabalhar com amónia e outros fluidos refrigerantes a baixas temperaturas, como as utilizadas no sistema de produção de gelo desta dissertação [31].

Este tipo de válvulas trabalha com um controlador EKE 347 e um sensor de temperatura MBT 3560, com transmissor integrado, que suporta temperaturas mínimas de até -50°C e fornece um sinal de saída 4-20 mA ou radiométrico 10-90%, sendo ambos os componentes da Danfoss também [32] [33]. Na Figura 4.10 é possível ver imagens de uma válvula ICM, um controlador EKE 347 e de um sensor de temperatura com transmissor integrado, respetivamente [34].



Figura 4.10. Válvula ICM, controlador EKE 347 e sensor com transmissor integrado [34].

No ramal do GNL, opta-se por utilizar duas válvulas da Neles, uma empresa especializada em serviços e soluções de controlo de caudal, com 65 anos de experiência no mundo da engenharia.

A válvula selecionada para realizar o *bypass* do GNL ao condensador é uma válvula de esfera, operada manualmente, por ser um tipo de válvula bastante utilizado em operações de início e paragem de circulação de caudal. Para a segunda válvula, a válvula de corte que antecede o vaporizador de ar ambiente, é selecionada uma válvula globo, com atuador elétrico, por ser um tipo de válvula vastamente utilizado em situações em que se pretende regular caudais [35]. A seleção dos modelos específicos destas válvulas não foi feita pois é necessário saber o diâmetro das tubagens, valor esse que não é calculado nesta dissertação.

A válvula com atuador elétrico utiliza um controlador EKE 347 da Danfoss e o caudalímetro selecionado é o Optimass 6400, da Krohne [36].

A Tabela 4.6 é uma lista dos principais componentes a utilizar no sistema de produção de gelo.

Tabela 4.6. Lista de componentes.

Componente	Marca	Modelo	Quantidade
Condensador	Vahterus	PSHE 4LL-174/3/1	1
		PSHE 5HH-140/1/1	1
Evaporador	H. Seabra	40T	1
Bomba	Gruppo Aturia	STM 1,5x6	1
Válvula de NH3	Danfoss	ICM	2
Válvula de GNL	Neles	Válvula globo, elétrica	1
Válvula de GNL	Neles	Válvula de esfera, manual	1
Controlador	Danfoss	EKE 347	2
Sensor de temperatura	Danfoss	MBT 3560	1
Caudalímetro	Krohne	Optimass 6400	1

5. CONCLUSÕES

A regaseificação do Gás Natural é um processo que envolve grandes trocas de energia. A crescente procura por combustíveis fósseis menos poluentes e o crescimento previsto do consumo de energia no mundo levam a um conseqüente aumento do consumo de Gás Natural, tornando assim cada vez mais interessantes os processos de aproveitamento de energia associados à sua regaseificação.

A revisão bibliográfica permitiu perceber que, apesar das enormes vantagens que advêm do aproveitamento da energia de regaseificação do Gás Natural, ainda são poucos os terminais de regaseificação no mundo que fazem usufruto dessas oportunidades.

Nesta dissertação estudou-se a produção de gelo associada ao processo de regaseificação do Gás Natural, utilizando-o como fonte fria, na UAG da Ribeira dos Socorridos, na Madeira. Com o auxílio do MATLAB e da base de dados REFPROP, estimou-se que a quantidade de energia necessária ao processo de regaseificação seria aproximadamente $1,5 \times 10^7$ kJ/dia, sendo então possível produzir em média cerca de 32 toneladas de gelo por dia, através de um sistema de refrigeração adaptado do tradicional ciclo de compressão de vapor.

Esta máquina de produção de gelo é constituída por um evaporador, seguido de um condensador, um reservatório de fluido refrigerante e uma bomba de circulação. Foi também definido todo um sistema de controlo que visa garantir o correto funcionamento da máquina de produção de gelo e das ligações desta com o circuito de GNL.

De modo a obter um projeto futuro mais realista há certos aspetos a ter em conta. A quantidade de energia necessária ao processo de regaseificação no terminal da ilha da Madeira deverá ser calculada tendo por base valores reais dos consumos de GN na UAG em questão, ao invés de provirem de uma estimativa. Ainda para o cálculo dessa energia necessária, deverá também ser conhecida a pressão real a que o GNL é regaseificado. Para a seleção da bomba, das válvulas e tubagens, será necessário calcular as perdas de carga em todo o sistema. Além disso, poderá ser também interessante estudar o efeito de aplicar sobreaquecimento e subarrefecimento no ciclo de refrigeração.

A implementação deste sistema na UAG dos Socorridos seria um passo extremamente importante na caminhada por um melhor aproveitamento de energia e uma maior eficiência energética do terminal de regaseificação. As vantagens a nível económico e ambiental são enormes e o projeto aparenta ser bastante exequível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] *Natural gas explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- [2] *O que é o Gás Natural?* (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.ggnd.pt/gas-natural/o-que-e>
- [3] *Energy Outlook | Energy economics | Home*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>
- [4] *Vantagens e utilizações*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.ggnd.pt/Empresas/Vantagens-e-utilizacoes>
- [5] *World Natural Gas Statistics - Worldometer*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.worldometers.info/gas/#gas-reserves>
- [6] *2021-2025: Rebound and beyond – Gas 2020 – Analysis - IEA*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.iea.org/reports/gas-2020/2021-2025-rebound-and-beyond>
- [7] *REN - O Setor do Gás Natural*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from https://www.ren.pt/pt-PT/o_que_fazemos/gas_natural/o_setor_do_gas_natural
- [8] *Gáslink - Grupo Sousa*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.gruposousa.pt/gaslink/>
- [9] Overby T. Energy saving potential in freezing applications by applying cold thermal energy storage with solid carbon dioxide. 2011;1(2211):448–54.
- [10] P. Dorosz, P. Wojcieszak, and Z. Malecha, “Exergetic analysis, optimization and comparison of LNG cold exergy recovery systems for transportation,” *Entropy*, vol. 20, no. 1, 2018.
- [11] Chang, H. M., Kim, B. H. and Choi, B. (2020) ‘Hydrogen liquefaction process with Brayton refrigeration cycle to utilize the cold energy of LNG’, *Cryogenics*, 108(February), p. 103093.
- [12] *Máquina de Gelo em Cubos Everest EGC 150A - São Camilo Purificadores*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.saocamilopurificadores.com.br/maquina-de-gelo-everest-egc-150a>
- [13] *Preço kWh EDP 2021: Simples, Bi-Horário, Tri-Horário*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://lojaluz.com/fornecedores/edp/tarifas/preco-kwh>

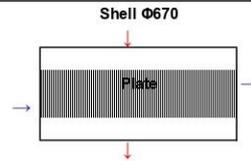
- [14] *REFPROP / NIST*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- [15] *Alfa Laval - How plate heat exchanger work*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.alfalaval.my/products/heat-transfer/plate-heat-exchangers/gasketed-plate-and-frame-heat-exchangers/heat-exchanger/how-plate-heat-exchanger-work/>
- [16] *Pros and Cons of Plate Heat Exchangers*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://ezinearticles.com/?Pros-and-Cons-of-Plate-Heat-Exchangers&id=5038448>
- [17] *All About Shell And Tube Heat Exchangers - What You Need To Know*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/shell-and-tube-heat-exchangers/>
- [18] Edreis, E. and Petrov, A. (2020) ‘Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 963.
- [19] *Trocadores de calor de placa e casco SONDEX® (SPS) / Danfoss*. (n.d.). Retrieved July 23, 2021, from <https://www.danfoss.com/pt-br/products/dhs/heat-exchangers/welded-heat-exchangers/sondex-plate-and-shell-heat-exchangers-sps/#tab-overview>
- [20] *Sondex Plate and Shell Heat Exchanger - Working Principles - YouTube*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.youtube.com/watch?v=rFF0vcV8tN8>
- [21] Exchangers, S. H. and Karlsson, S. (2020) ‘LNG in Spotlight The Future Is Bright on Land’, (1).
- [22] ASHRAE, “ASHRAE Handbook – Refrigeration”, Ch. 47, “Cryogenics”, 2010
- [23] *Aveiro*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <http://www.docapesca.pt/pt/rede-lotas-e-postos-vendagem/item/lota-de-aveiro.html>
- [24] *Frio industrial*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://hseabra.seabraglobal.com/>
- [25] *Bombas centrífugas / Bombas hidráulicas / Grupo TDF / Hidromethos*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.hidromethos.pt/bombas-centrifugas-t-1-pt>
- [26] *SHD-pump-sectional.jpg (750×750)*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.ruhrpumpen.com/images/products/product/SHD-pump-sectional.jpg>
- [27] *Amoníaco / Linde Gases Industriais Portugal*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from https://www.linde-gas.pt/pt/products_and_supply/packaged_chemicals/product_range/ammonia/index.html

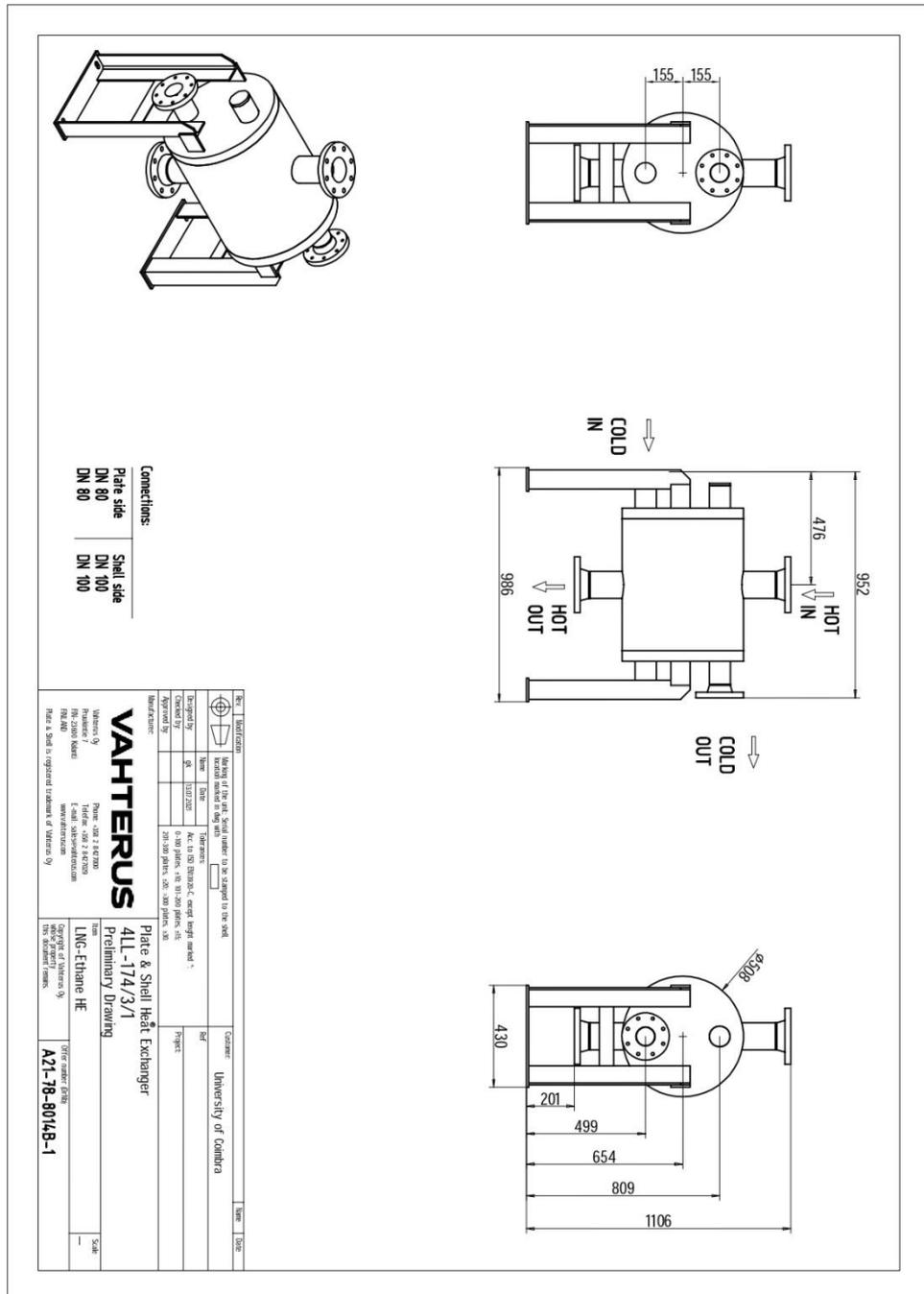
-
- [28] *Eletricidade - Balanço Diário*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://datahub.ren.pt/pt/eletricidade/balanco-diario>
- [29] *Vahterus PSHE Fully Welded* / *Vahterus*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://vahterus.com/product/pshe-construction/pshe-fully-welded/>
- [30] *Gruppo Aturia - STM* / *AxFlow*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.axflow.com/en-gb/catalog/products/pumps/turbine-pumps/gruppo-aturia-stm>
- [31] *Válvula motorizada, ICM 20-C* / *Válvulas motorizadas* / *Válvulas de controle e válvulas de regulação* / *Válvulas* / *Climate Solutions para refrigeração e ar condicionado* / *Danfoss Brazil Product Store*. (n.d.). Retrieved July 23, 2021, from https://store.danfoss.com/br/pt_BR/Climate-Solutions-para-refrigera%C3%A7%C3%A3o-e-ar-condicionado/V%C3%A1lvulas/V%C3%A1lvulas-de-controle-e-v%C3%A1lvulas-de-regulagem/V%C3%A1lvulas-motorizadas/V%C3%A1lvula-motorizada%2C-ICM-20-C/p/027H1025
- [32] *Controlador do nível de líquido, EKE 347* / *EKE 347 Electronic valve control, Electronic controls* / *Electronic controls* / *Product Type* / *Danfoss Brazil Product Store*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from https://store.danfoss.com/br/pt_BR/Product-Type/Electronic-controls/EKE-347-Electronic-valve-control%2CElectronic-controls/Controlador-do-n%C3%ADvel-de-l%C3%ADquido%2C-EKE-347/p/080G5000
- [33] *MBT 3560, Temperature Sensors* / *Danfoss Brazil Product Store*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from https://store.danfoss.com/br/pt_BR/Product-Type/Pressure-Transmitters/MBT-3560%2C-Temperature-Sensors/c/MBT%203560%2C%20Temperature%20Sensors
- [34] *Climate Solutions for cooling* / *Danfoss*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://www.danfoss.com/en/products/dcs/>
- [35] Mobley, R. K. (2000). CONTROL VALVES. *Fluid Power Dynamics*, 97–129. <https://doi.org/10.1016/B978-075067174-3/50058-5>
- [36] *OPTIMASS 6400 – The high-performance Coriolis mass flowmeter for the process industry* / *OPTIMASS 6400*. (n.d.). Retrieved July 20, 2021, from <https://optimass6400.krohne.com/>

ANEXO A

Ficha técnica do condensador da Vahterus

VAHTERUS - PLATE & SHELL - ® Fully Welded Plate Heat Exchanger		V5.0A-O	
Date	15.7.2021	Type	PSHE 4LL-174/3/1
Offer number	A21-78-8014B-1		
Made by	gk/vaa		
Customer	University of Coimbra		
Reference			
Project			
Item name/no.	LNG-Ethane HE		
Thermal Design:			
Capacity	kW	486.62	
Heat transfer area	m ²	27.7	
Logarithmic mean T	°C	66.4	
K-value	W/m ² K	265	
Fouling factor	m ² K/W	0.0018	
Excess Design /Area (%)		>25	
		Plate side (Cold)	Shell side (Hot)
Temp. IN	°C	-160.0	-35.0
Temp. OUT	°C	-50.0	-35.0
Evaporating temperature	°C	-119.1 / -104	
Evaporation pressure	bar(a)	12.0	9.1
Condensing temperature			-35.0
Flow rate	kg/h	2426.4	4368.7
Pressure drop	kPa	9.7	0.3
Liquid volume	dm ³	30.0	43.0
Medium		LNG.MIX	ETHANE
Connections:	Size (DN)	Nb. of pieces	Velocity (m/s)
Plate side IN	80	1	0.33
Plate side OUT	80	1	11.92
Shell side IN	100	1	8.18
Shell side OUT	100	1	0.29
Construction Design:			
End Type		Welded End Plates	Content: Dangerous
Weight (dry)	kg	503	Category: IV
Position		Horizontal	Module: G
Design code		PED	Inspector: Vahterus Oy (CE)
Design pressure	bar(g)	-1/25	
Testing pressure	bar(g)	According to code	
Design temperature	°C	-170 / 80	
Support		End Plate feet (Welded AISI)	
Materials:			
Plate material	AISI 316L 1mm		
Shell material	AISI 316L/316		
Flow director material	PTFE (short)		
Plate connections	WN-RF-Flange DN 100 PN25-40 1.4404 EN10222-5		
Shell connections IN	WN-RF-Flange DN 150 PN25-40 1.4404 EN10222-5		
Shell connections OUT	WN-RF-Flange DN 150 PN25-40 1.4404 EN10222-5		
Finishing (Shell externally)			
- Stainless steel parts	Pearl blasting		
- Carbon steel parts	N/A		
<i>Performance is conditioned on the accuracy of customer's data and customer's ability to supply equipment and products in conformity therewith.</i>			
Vahterus Oy	Phone +358 (0)2 840 770	E-mail sales@vahterus.com	
Pruukintie 7	Telefax +358 (0)2 840 7299	Internet www.vahterus.com	
FIN-23600 KALANTI			





VAHTERUS		- PLATE & SHELL - ® Fully Welded Plate Heat Exchanger Partial 2 Phase		V5.00-0
				Page 1/2
Date	15.7.2021			
Offer number	A21-78-8014B-2	Type PSHE 5HH-140/1/1		
Made by	gk/vaa			
Customer Reference Project	University of Coimbra			
Item name/no.	Ethane-NH3 HE			
Thermal Design:				
Capacity	kW	486.62		
Heat transfer area	m ²	36.1		
Logarithmic mean T	°C	15.0		
K-value	W/m ² K	898		
Fouling factor	m ² KW	0.00049		
Excess Design /Area (%)		82/59		
		Plate side (Hot)	Shell side (Cold)	
Temp. IN	°C	-20	-35	
Temp OUT	°C	-20	-35	
Saturation temperature	°C	-20 / -20	-35 / -35	
Pressure	bar	1.9	9.13	
Liquid Flow rate/ INLET	kg/h	0	4380.1	
Liquid Flow rate/ OUTLET	kg/h	1318.4	0	
Vapour Flow rate/ INLET	kg/h	1318.4	0	
Vapour Flow rate/ OUTLET	kg/h	0	4380.1	
Pressure drop	kPa	0.76154	1.2805	
Liquid volume	dm ³	38.4	64.9	
Medium		AMMONIA	ETHANE	
Connections:	Size (DN)	Nb. of pieces	Velocity m/s	
Plate side IN	100	2	12.67	
Plate side OUT	100	2	0.03	
Shell side IN	150	1	0.13	
Shell side OUT	150	1	3.71	
Construction Design:		Eccentric model		
End Type		Welded End Plates	Content:	Dangerous
Weight (dry)	kg	825	Category:	IV
Position		Horizontal	Module:	B+D
Design code		PED	Inspector:	Vahterus Oy (CE)
Design pressure	bar(g)	-1/25		
Testing pressure	bar(g)	According to code		
Design temperature	°C	-170 / 80		
Support		End Plate feet (Welded AISI)		
Materials:				
Plate material	AISI 316L 1mm			
Shell material	AISI 316L/316			
Flow director material	PTFE			
Plate connections	WN-RF-Flange DN 100 PN25-40 1.4404 EN10222-5			
Shell connections IN	WN-RF-Flange DN 150 PN25-40 1.4404 EN10222-5			
Shell connections OUT	WN-RF-Flange DN 150 PN25-40 1.4404 EN10222-5			
Finishing (Shell externally)				
- Stainless steel parts	Pearl blasting			
- Carbon steel parts	N/A			
<i>Performance is conditioned on the accuracy of customer's data and customer's ability to supply equipment and products in conformity therewith.</i>				
Vahterus Oy	Phone +358 (0)2 840 70		E-mail sales@vahterus.com	
Pruukintie 7	Telefax +358 (0)2 840 7299		Internet www.vahterus.com	
FIN-23600 KALANTI				

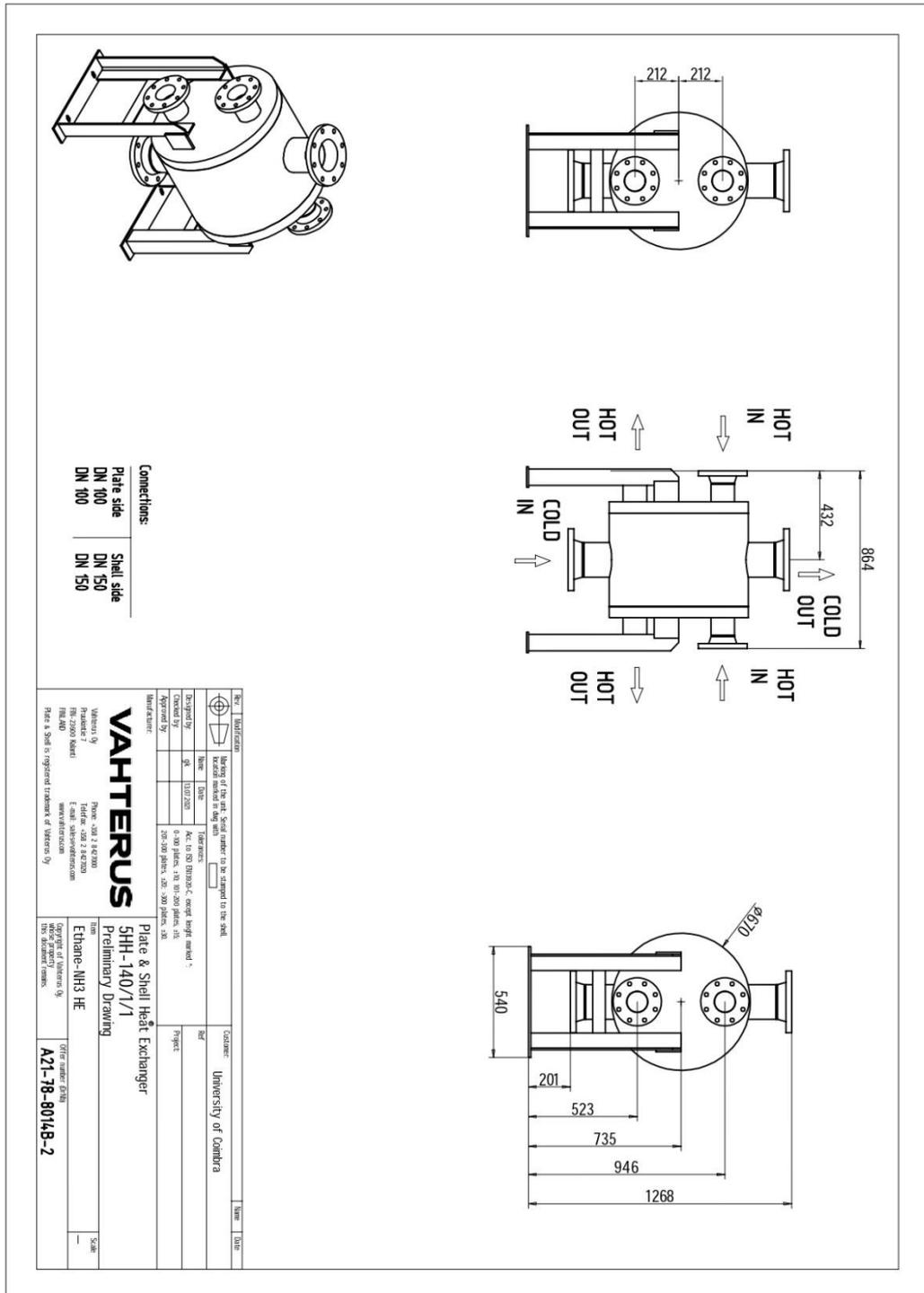
VAHTERUS		Vahterus PSHE- Data Sheet Partial 2 Phase			V5.0D-0
					Page 2/2
Date	15.7.2021				
Offer number	A21-78-8014B-2				Type PSHE 5HH-140/1/1
Made by	gk/vaa				
Customer	University of Coimbra				
Reference					
Project					
Item name/no.	Ethane-NH3 HE				
Medium					
(Hot)					
Medium	AMMONIA				
		INLET	OUTLET	Sat.Liq	
Dynamic viscosity	kg/ms	0.00008462	0.00020938	0.0002094	
Specific gravity	kg/m ³	1.604	664.97	665	
Specific heat	J/kgK	2430	4517	4517	
Thermal conductivity	W/mK	0.020997	0.55867	0.55867	
Surface Tension	N/m			0.03102	
				Sat.Vap	
Dynamic viscosity	kg/ms			0.00008462	
Specific gravity	kg/m ³			1.604	
Specific heat	J/kgK			2430	
Thermal conductivity	W/mK			0.021	
(Cold)					
Medium	ETHANE				
		INLET	OUTLET	Sat.Liq	
Dynamic viscosity	kg/ms	0.000089861	0.00007533	0.0000899	
Specific gravity	kg/m ³	468.352	16.459	468.4	
Specific heat	J/kgK	2824	1947	2824	
Thermal conductivity	W/mK	0.118866	0.015698	0.11887	
Surface Tension	N/m			0.008	
				Sat.Vap	
Dynamic viscosity	kg/ms			0.00007533	
Specific gravity	kg/m ³			16.459	
Specific heat	J/kgK			1947	
Thermal conductivity	W/mK			0.0157	

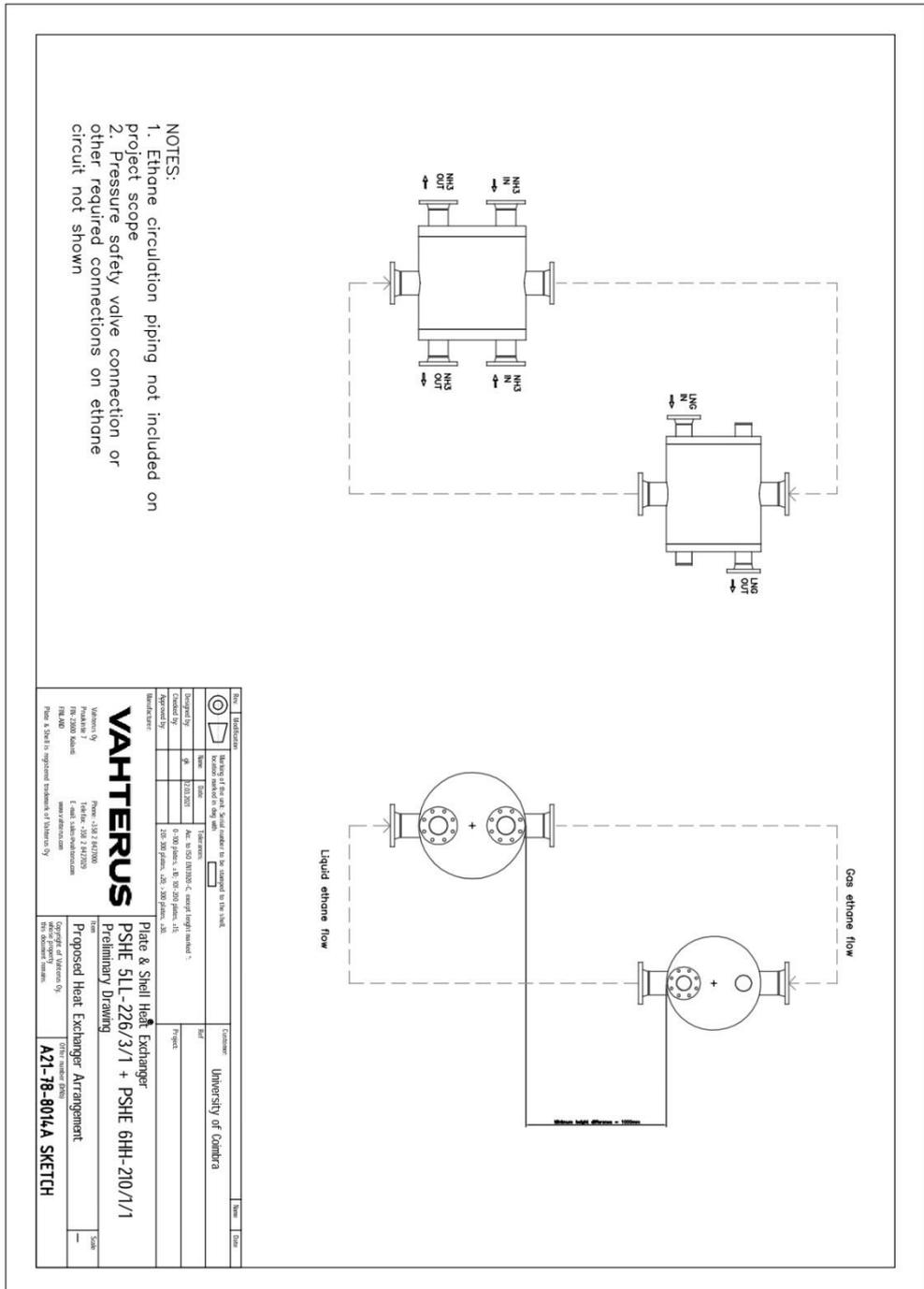
Vahterus Oy
Pruukintie 7
FIN-23600 KALANTI

Phone +358 (0)2 840 70
Telefax +358 (0)2 840 7299

E-mail salesvahterus.com
Internet www.vahterus.com

PRÉ-PROJETO DE UMA INSTALAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE GELO COM QUALIDADE ALIMENTAR ASSOCIADA AO PROCESSO DE REGASEIFICAÇÃO DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO





- NOTES:
1. Ethane circulation piping not included on project scope
 2. Pressure safety valve connection or other required connections on ethane circuit not shown

	Material	Material of flange, nut, bolt and washer to be stamped in the neck	Customer	University of Coimbra
	Drawing type	Revision	Project	
	Scale	1:1	Other material data	
	Manufacturer	VAHTERUS	Proposed Heat Exchanger Arrangement	A21-78-8014A SKETCH
	Drawing number	PSHE 5LL-226/3/1 + PSHE 6HH-210/1/1	Customer	University of Coimbra
	Drawing title	Plate & Shell Heat Exchanger	Project	
	Drawing subtitle	Preliminary Drawing	Other material data	
	Drawing author	VAHTERUS	Proposed Heat Exchanger Arrangement	A21-78-8014A SKETCH
	Drawing date	22/03/2021	Customer	University of Coimbra
	Drawing version	01	Project	
	Drawing scale	1:1	Other material data	
	Drawing manufacturer	VAHTERUS	Proposed Heat Exchanger Arrangement	A21-78-8014A SKETCH
	Drawing title	Plate & Shell Heat Exchanger	Customer	University of Coimbra
	Drawing subtitle	Preliminary Drawing	Project	
	Drawing author	VAHTERUS	Proposed Heat Exchanger Arrangement	A21-78-8014A SKETCH
	Drawing date	22/03/2021	Customer	University of Coimbra
	Drawing version	01	Project	
	Drawing scale	1:1	Other material data	
	Drawing manufacturer	VAHTERUS	Proposed Heat Exchanger Arrangement	A21-78-8014A SKETCH

ANEXO B

Ficha técnica da bomba da Gruppo Aturia

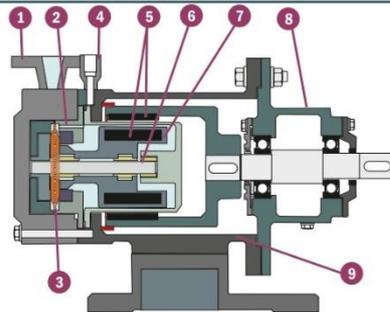


Turbine Pumps

STM Range Magnetically Driven Pumps

DESIGN SUMMARY

Standards	API 685 (deviations) - ISO 15783
Configuration	Horizontal long or close coupled
Motors	IEC, NEMA
Seal Type	Magnetic Drive



SPECIFICATIONS

Maximum Temp	315 °C
Minimum Temp	-150 °C
Max Flow	9 m ³ /hr
Max Head	95 m
Max Pressures	250 bar total system
ATEX	Yes

MATERIALS

	Standard	Options
Rear Casing	HC276	Ti Gr.5
Front Casing	CF8M SS	HC276, Ti Gr.5
Impeller	CF8M SS	HC276, Ti Gr.5
Shaft	SiC	316 Hard,
Shaft Bearings	SiC	PTFE, Carbon
Thrust Bearings	Carbon	PTFE
O Ring:	Viton	EPDM, FEP
Magnets	Samarium Cobalt	

DESIGN FEATURES

STM pumps are peripheral turbine pumps designed for low flow high head applications and directly replace Caster MTA pumps..

- 1 ANSI 300 RF connections.
- 2 Internal re-circulation to rear pump housing.
- 3 Peripheral turbine require a low NPSH and can pump liquids with 20% entrained gases.
- 4 Slot for PT 100 temperature probe on ATEX versions.
- 5 Powerful Samarium Cobalt magnets that allow STM pumps to cope with high SGs and liquid temperatures up to 315 °C.
- 6 SiC shaft with SiC bearing as standard to give improved chemical and mechanical resistance.
- 7 Hastelloy or single piece titanium rear housing.
- 8 Optional long coupled.
- 9 Optional carbon steel motor bracket to give secondary containment..

The STM pumps are supplemented by the SVM rotary vane pumps to API 676..





Turbine Pumps

STM - Performance Curves

2950 rpm

