

# Aplicação de um Ciclo Orgânico de Rankine à Indústria Naval

---

**João Manuel Bento Correia**  
**(Licenciado em Engenharia Mecânica)**

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

Orientadores:

Prof. Doutor Jorge Mendonça e Costa

Prof. Doutor Jorge Manuel Antunes

Júri:

Prof. Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio

Prof. João Monteiro Marques

Dezembro de 2014



# Agradecimentos

É, no culminar de uma tão importante etapa, carregando o sentimento de dever cumprido, hora de agradecer a todos que tornaram possível o desenvolvimento do presente trabalho. É carregado de orgulho por me rodearem que, a todos aqueles que depositaram, depositam e continuarão a depositar em mim toda a confiança do mundo, quero agradecer.

Ao orientador Jorge Mendonça e Costa, gostaria de agradecer não só pelo apoio prestado, mas principalmente pela hipótese de conhecer uma equipa fantástica, a TecnoVeritas, liderada pelo Engenheiro Jorge Antunes, co-orientador deste trabalho e hoje meu amigo, a quem agradeço também todo o apoio e confiança. Sem esquecer a restante equipa a quem também direcciono um importante agradecimento.

Aos meus pais que sempre estiveram presentes, que sempre me incentivaram, dia após dia. A eles que sempre partilham com orgulho dos meus momentos, bons ou maus.

À restante família que sempre acredita em mim e me faz acreditar. Em especial ao meu avô João, que sempre me mostrou que o importante é querer e que o nosso caminho traçamo-lo nós. A ele que não me deixa desviar daquilo em que acredito.

*João Correia*

Dezembro 2014



# Resumo

Actualmente o universo dos meios de transporte, de pessoas e mercadorias, está a atravessar uma fase de transformação no que toca à fonte de energia que os fazem mover. Durante o século XX, os combustíveis derivados de petróleo ganharam um peso significativo, praticamente total, no que toca à locomoção de meios de transporte. Facto que, ao que tudo indica, será diferente já desde o início deste século XXI.

Empresa experiente no meio naval, sector que não é alheio a esta transformação, a TecnoVeritas, conhecendo as necessidades do meio, veio a propor ao autor a participação no desenvolvimento de um Ciclo Orgânico de Rankine, destinado à instalação a bordo de navios.

Os navios são, como grande maioria das máquinas térmicas, uma fonte de desperdício energético, dissipando grandes quantidades de energia térmica passível de ser recuperada através de um Ciclo Orgânico de Rankine, que transforma a energia térmica dissipada em energia eléctrica útil.

Na grande maioria dos navios existentes, olhando para a sua configuração mecânica, é possível de se concluir que a energia eléctrica recuperada não seria de grande utilidade no momento em que esta é produzida, sendo por isso que é também objecto de estudo deste documento a produção de hidrogénio, como forma de armazenamento de energia.

No presente documento será levado a cabo também um estudo de viabilidade para os diferentes regimes de potência para um determinado módulo ORC/Hidrogénio.

**Palavras-chave:** Energia, Navios, Ciclo Orgânico de Rankine, Hidrogénio, Recuperação de Energia.



# Abstract

Currently the universe of transportation of people and goods is going through a transformation phase in terms of primary energy sources. During the twentieth century, the petroleum-based fuels gained a significant, almost complete weight in transportation. This fact, according to all indications, will be different since the beginning of XXI century.

TecnoVeritas is an experienced company in the marine world, sector which is not alien to this transformation, knows the needs of the industry, has proposed to the author, a participation in the development of an Organic Rankine Cycle, intended for onboard installation in ships.

The vessels are, as the vast majority of heat engines, a source of energy waste, dissipating large amounts of energy which can be recovered through an Organic Rankine Cycle, which converts the thermal energy dissipated into useful electric energy.

In most existing ships, looking for its mechanical configuration, it is possible to conclude that the electrical energy recovered would not be very useful at the time it is produced, which is why the study of the hydrogen production as a form of energy storage is also the subject of this work.

A feasibility study for the different power ratings for a particular module ORC / Hydrogen, will also be carried out herein.

**Keywords:** Energy, Ships, Rankine Cycle, Hydrogen Energy Recovery.



# Índice

Agradecimentos.....	II
Resumo .....	IV
Abstract .....	VI
Índice.....	VIII
Índice de Figuras .....	XII
Índice de Tabelas .....	XIV
Índice de Gráficos.....	XVI
Nomenclatura .....	XVIII
1 - Introdução.....	1
1.1 - Objectivos.....	3
2 - Enquadramento .....	4
2.1 - Ciclo Orgânico de Rankine.....	4
2.1.1 - Enquadramento Histórico .....	4
2.1.2 - “ <i>State of the Art</i> ” .....	5
2.2 - Hidrogénio.....	7
2.2.1 - Introdução .....	7
2.2.2 - Formas de Obtenção.....	8
2.2.3 - “ <i>State of the Art</i> ” .....	10
3 - O Meio Naval, Panorama.....	11
3.1 - Tipologias.....	12
3.1.1 - Navio Petroleiro .....	13
3.1.2 - Navio Porta-Contentores .....	13
3.2 - Sistemas Consumidores .....	14
3.2.1 - Máquina Principal.....	15
3.2.2 - Geradores Auxiliares .....	16
3.2.3 - Caldeiras.....	16

3.3 - Casos de Estudo.....	17
3.3.1 - Navio A: Porta Contentores .....	17
3.3.2 - NAVIO B: Petroleiro.....	20
3.4 - Aquisição de dados reais .....	22
3.4.1 - Registo da Potência Consumida.....	22
3.4.2 - Registo da Potência Mecânica Produzida.....	23
3.4.3 - Registo da Potência Eléctrica Produzida .....	24
3.5 - Verificação de Dados .....	24
3.5.1 - Dados – NAVIO A.....	24
3.5.2 - Dados – NAVIO B.....	28
4 - COR, Desenvolvimento.....	31
4.1 - Fluido de Trabalho .....	32
4.2 - Constituição e caracterização do Ciclo.....	34
4.2.1 - Análise Termodinâmica. ....	36
4.2.2 - Considerações de Projecto.....	38
4.3 - Turbina.....	39
4.3.1 - Considerações Mecânicas e Estruturais .....	40
4.3.2 - Evolução não isentrópica.....	43
4.4 - Permutadores .....	44
4.5 - Geração de Energia Eléctrica.....	46
4.5.1 - Gerador .....	46
4.5.2 - Regulação da corrente produzida .....	49
5 - Hidrogénio, aplicabilidade. ....	53
5.1 - Associar o Hidrogénio. ....	53
5.1.1 - Caracterização do Hidrogénio .....	53
5.2 - Produção de Hidrogénio.....	54
5.2.1 - Electrólise.....	55
5.2.2 - Caracterização do Electrolisador .....	56

5.3 - Armazenamento de Hidrogénio.....	58
5.4 - Consumo de Hidrogénio.....	65
5.4.1 - Fumigação do Hidrogénio.....	65
5.4.2 - Ignição por compressão homogénea.....	66
5.4.3 - Injecção directa .....	66
6 - Casos Práticos.....	69
6.1 - Projecto de 100kW.....	70
6.2 - Variação de parâmetros.....	72
6.2.1 - Variação da fonte fria .....	73
6.2.2 - Variação da fonte quente.....	74
6.3 - Navio A - Caso prático. ....	75
6.4 - Navio B - Caso prático. ....	78
7 - Conclusões e Perspectivas.....	80
7.1 - Conclusões gerais.....	80
7.2 - Principais dificuldades.....	81
7.3 - Objectivos atingidos.....	82
7.4 - Futuros trabalhos .....	83
8 - Referências.....	84
8.1 - Lista de Comunicados.....	84
8.2 - Outras obras .....	85



# Índice de Figuras

Figura 1. Esquematização da estrutura de um ciclo de Rankine. ....	5
Figura 2. Esquematização de um ciclo orgânico de Rankine sem regeneração...6	6
Figura 3. Esquematização de um ciclo orgânico de Rankine com regeneração...6	6
Figura 4. Esquematização do processo “electrólise”. ....	9
Figura 5. Esquematização da tipologia dos navios comerciais.....	12
Figura 6. Esquematização do fluxo que a energia química no navio .....	14
Figura 7. Representação de um motor marítimo a dois tempos. ....	15
Figura 8. Representação de um motor marítimo a quatro tempos com PTO.....	15
Figura 9. Representação de um motor gerador marítimo. ....	16
Figura 10. Representação de uma caldeira. ....	16
Figura 11. Aparência de um navio porta contentores – Navio A.....	18
Figura 12. Esquema da linha de abastecimento de combustível – Navio A. ....	19
Figura 13. Aparência de um navio petroleiro – Navio B. ....	20
Figura 14. Esquema da linha de abastecimento de combustível – Navio B. ....	21
Figura 15. Ponte de Wheatstone completa. ....	23
Figura 16. Montagem de equipamento para medição de potência ao veio.....	24
Figura 17. Aquisição de dados sobre o consumo da máquina principal – Navio A. .....	25
Figura 18. Aquisição de dados sobre a potência transferida ao veio – Navio A.	25
Figura 19. Aquisição de dados sobre o a potência produzida no PTO – Navio A. .....	26
Figura 20. Diagrama de perdas de um motor térmico, imagem retirada da IMO, <i>International Maritime Organization</i> . ....	26
Figura 21. Aquisição de binário – Navio B .....	29
Figura 22. Caracterização de um Ciclo Orgânico de Rankine. ....	35
Figura 23. Evolução termodinâmica do R245 ao longo do ciclo. ....	36

Figura 24. Turbocompressor marítimo MAN. ....	39
Figura 25. Turbocompressor marítimo Mitsubishi. ....	39
Figura 26. Turbina seleccionada para o módulo. ....	40
Figura 27. Permutadores de placas. ....	44
Figura 28. Permutador tubular. ....	44
Figura 29. Ponte rectificadora de onda completa. ....	50
Figura 30. Formas de tensão de entrada e saída. ....	50
Figura 31. A – Ponte Rectificadora; B – Filtro Capacitivo. ....	51
Figura 32. Inversor trifásico baseado em <i>IGBTs</i> . ....	51
Figura 33. Forma de um sinal com modulação de largura de impulsos (PWM). ..	52
Figura 34. Desenho esquemático de um regulador AC-DC-AC. ....	52
Figura 35. Explicação esquemática de um electrolisador. ....	55
Figura 36. Construção de uma célula bipolar de electrólise. ....	56
Figura 37. Representação de um electrolisador disponível no mercado. ....	57
Figura 38. Representação dos processos de absorção e libertação do hidrogénio pelo metal hidreto. ....	61
Figura 39. Depósito de hidrogénio de metais hidretos. ....	64
Figura 40. Sistema de injeção externa e injeção directa. ....	67
Figura 41. Esquema utilizado para testes de injeção directa de Hidrogénio. ....	68
Figura 42. Fluxo de energia Recuperação-Consumo. ....	69
Figura 43. Rendimento do ciclo orgânico de Rankine de acordo com as temperaturas da fonte quente e fonte fria. ....	72

# Índice de Tabelas

Tabela 1. Ratio de átomos de hidrogénio e carbono de alguns combustíveis. ....	8
Tabela 2. Classificação de navios petroleiros. ....	13
Tabela 3. Classificação de navios porta-contentores. ....	13
Tabela 4. Caracterização dos navios presentes neste estudo. ....	17
Tabela 5. Caracterização da gestão energética – Navio A.....	19
Tabela 6. Caracterização da gestão energética – Navio B.....	21
Tabela 7. Caracterização do poder calorífica de HFO e Diesel marítimo. ....	23
Tabela 8. Registos de leitura de consumo – Navio B.....	28
Tabela 9. Propriedades de fluidos.....	33
Tabela 10. Eficiências referentes a diferentes fluidos. ....	34
Tabela 11. Designação dos pontos em análise no Ciclo Orgânico de Rankine. .	35
Tabela 12. Comparação entre fluidos de trabalho na turbina.....	43
Tabela 13. Caracterização de permutadores para o módulo de 100kW.....	45
Tabela 13. Relação de potência e rotação em função do binário.....	47
Tabela 15. Potência em função da rotação para um determinado binário.....	48
Tabela 5. Propriedades dos combustíveis: Diesel, HFO e Hidrogénio. ....	54
Tabela 17. Propriedades chave dos hidretos com base Alumínica (fonte IEA)...	61
Tabela 18. Propriedades chave dos hidretos com base Borica (fonte IEA) .....	62
Tabela 19. Armazenamento de hidrogénio, 3 kg como referência.....	64
Tabela 20. Propriedades do diesel e do Hidrogénio inerentes à combustão. ....	65
Tabela 18. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine.....	71
Tabela 19. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 180-30°C...	73
Tabela 20. Eficiência do COR, 180-30°C.....	73
Tabela 19. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 180-45°C...	73
Tabela 20. Eficiência do COR, 180-45°C.....	73
Tabela 23. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 150-15°C...	74

Tabela 24. Eficiência do COR, 150-15°C.....	74
Tabela 25. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 105-15°C... 74	
Tabela 24. Eficiência do COR, 105-15°C.....	74
Tabela 27. Poupanças considerando consumo eléctrico ou de hidrogénio. ....	77

# Índice de Gráficos

Gráfico 1. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama Ph, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina. ....	38
Gráfico 2. Evolução gráfica dos estágios de fluência que turbina está sujeita no seu período de vida. ....	41
Gráfico 2. Representação do rendimento isentrópico da turbina. ....	44
Gráfico 4. Potência e rotação em função do binário resistente seleccionado. ....	48
Gráfico 5. Produção de hidrogénio em função da potência seleccionada. ....	57
Gráfico 6. Densidade de armazenamento energético em função da temperatura e pressão aplicada. ....	62
Gráfico 7. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama Ph, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina. ....	70
Gráfico 8. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama TS, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina. ....	71
Gráfico 9. Representação gráfica do perfil energético de uma viagem de referência do navio A. ....	75
Gráfico 10. Curva do consumo específico da máquina principal do navio A. ....	76
Gráfico 11. Representação gráfica da gestão energética face à produção e consumo de hidrogénio. ....	77
Gráfico 12. Comparação entre possíveis cenários para utilização da energia eléctrica a bordo. ....	78



# Nomenclatura

$A$	Área (m <sup>2</sup> )
$T$	Binário (N.m)
$\dot{Q}$	Potência Térmica (W)
$c_p$	Calor específico (kJ/kg.°C)
$d$	Diâmetro (m)
$\rho$	Massa Volúmica
$L$	Comprimento (m)
$\dot{m}$	Caudal Mássico (kg/s)
$h$	Entalpia (kJ/kg)
$S$	Entropia (kJ/kg.°C)
$N$	Velocidade de rotação (RPM)
$p$	Pressão (bar)
$P$	Potência (W)
$PCI$	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
$\eta$	Rendimento (%)



# Capítulo 1

## 1 - Introdução

Regra geral no dia-a-dia de qualquer processo, seja ele doméstico ou industrial, os custos com a energia são a maior fatia da microeconomia desse mesmo processo, sendo que ao leitor esteja esta ideia clara, melhor entenderá a relevância do assunto abordado neste trabalho.

Nos últimos anos tem-se assistido a um crescente interesse na pesquisa de novas formas de aproveitar todo e qualquer tipo de energia que até então é tido como dispensável. A actual conjuntura económica, bem como o despertar para novas questões, nomeadamente as ambientais, fazem com que grandes grupos económicos estejam cada vez mais susceptíveis a novas tecnologias que lhes permitam reduzir custos, sejam de exploração, produção, manutenção e, acima de tudo, custos com a energia. Dos custos com a energia grande parte é dissipada, ou seja, não é utilizada no processo para a qual é destinada, sendo que essa dissipação acontece principalmente sob a forma de calor.

Nos processos de produção onde energia térmica é necessária, ou mais precisamente, onde existe transformação de energia química em energia térmica para um determinado fim, são os casos em que existem as maiores perdas de calor, nomeadamente na indústria naval, onde em muitos casos mais de metade da energia térmica é dissipada tanto para a atmosfera como para o mar. Ainda que muitas vezes estejamos a falar de baixas potências é de todo importante encontrar uma forma rentável de recuperar parte dessa energia, proporcionando a existência de uma ferramenta de redução de custos a muitos armadores espalhados pelo mundo.

Na indústria naval, aliado ao crescente custo da energia, aparecem também as preocupações ambientais por parte das entidades reguladoras e países desenvolvidos, pelo que o cerco à utilização de combustíveis pesados, mais baratos, é cada vez maior, sendo que a pressão para que os armadores queimem nos seus navios combustíveis mais refinados, mais caros mas menos poluentes, é cada vez maior. Acontecendo que no presente existem zonas do globo onde a queima de combustível pesado é completamente proibida, nomeadamente em algumas zonas da Europa e em quase toda a costa Norte Americana, a curto prazo será totalmente proibido a utilização destes combustíveis.

Sabendo da existência destas necessidades, é neste sentido que a TecnoVeritas, empresa com 20 anos de experiência no sector naval, procura seguir. Aproveitando o conhecimento adquirido nos últimos anos através de consultorias energéticas ao nível naval e industrial, bem como a experiência adquirida no desenvolvimento de sistemas de engenharia, surge o convite ao autor deste trabalho na participação de um trabalho de pesquisa com a intenção de desenvolvimento de um sistema *standard* de recuperação de energia térmica, sendo sugerido o recurso a um Ciclo Orgânico de Rankine.

No seguimento deste convite, a TecnoVeritas propõe ao autor deste documento, um trabalho de pesquisa no sentido de aprofundar conhecimentos tanto na concepção mecânica do equipamento, como na performance a ter como objectivo para um determinado módulo aplicado à indústria naval e uma determinada potência de recuperação, pelo que será esta a base na realização do presente trabalho.

É ideia do autor abordar também o tema “hidrogénio”, um tema cada vez mais em voga. O hidrogénio aparece no âmbito deste projecto como uma forma de armazenagem da energia que não seja necessária num determinado momento ao navio. Tendo essa energia origem numa fonte até agora desperdiçada, confere ao hidrogénio um factor diferenciador, pois o processo utilizado normalmente na sua produção, a electrólise, não será um processo de alto rendimento, não sendo eficiente a utilização de energia eléctrica de origem fóssil directamente num processo deste tipo. No presente documento será também abordado a forma como o hidrogénio produzido a bordo poderá ser injectado, com recurso a um sistema “*dual fuel*”, o hidrogénio deverá ser injectado em paralelo com o combustível de origem (gasóleo ou fuel óleo pesado). Como hipótese também será alvo de estudo a injeção simples do hidrogénio no grupo gerador presente no navio.

## 1.1 - Objectivos

Os objectivos compreendidos neste trabalho serão:

- Compreender a real viabilidade do modulo COR a uma aplicação naval, percebendo os níveis reais de energia térmica dissipada;
- Conhecer os componentes fundamentais que constituem o ciclo e as considerações a serem feitas para selecção de qualquer um deles;
- Conhecer todas possibilidades de arquitectura para um possível sistema de produção, armazenamento e consumo de hidrogénio;
- Sustentar a viabilidade de produção e consumo de hidrogénio.
- Perceber a viabilidade económica das soluções estudadas ao longo do documento.

## Capítulo 2

# 2 - Enquadramento

Para uma boa percepção dos objectivos pretendidos e o caminho a percorrer até eles é de todo necessário perceber o enquadramento que determinada tecnologia tem nos dias de hoje e como chegou até aqui, é então neste capítulo que isso será abordado.

## 2.1 - Ciclo Orgânico de Rankine

### 2.1.1 - Enquadramento Histórico

O ciclo orgânico de Rankine, tal como o nome indica, apresenta como base o ciclo de Rankine, mais conhecido na sua generalidade e nomeado com o nome do seu mentor William John Macquorn Rankine, este ciclo é responsável pela geração de 90% da energia eléctrica do mundo.

Na ilustração seguinte podemos observar o conceito básico de um ciclo de Rankine, onde é notória a presença de uma fonte quente e de uma fonte fria, bem como a unidade de produção de trabalho.

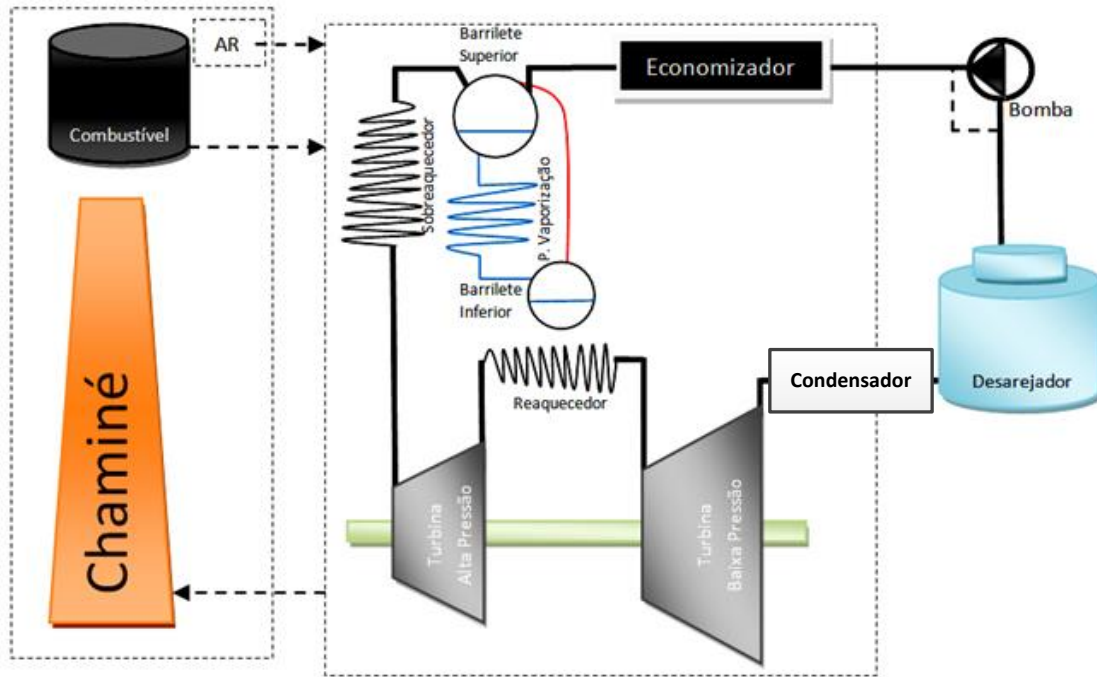


Figura 1. Esquematização da estrutura de um ciclo de Rankine.

Em uma análise mais detalhada podemos verificar a presença de uma bomba, elemento que aparece para pressurizar o fluido de trabalho, o qual num Ciclo de Rankine é a água. No equipamento a jusante da bomba a água irá vaporizar retirando calor à fonte quente, este processo de vaporização existe na indústria sob várias formas, desde caldeiras a simples recuperadores de calor montados em condutas de escape de motores, recuperando o potencial térmico de gases de escape, entre outros. Neste ponto, o vapor poderá encontrar-se no seu estado saturado ou sobreaquecido, dependendo do tipo de turbina na qual irá expandir. É na turbina que o trabalho é produzido, ou seja, a energia térmica é transformada em energia mecânica e por sua vez, se for caso disso, eléctrica. No escape da turbina a água deverá encontrar-se no estado de vapor saturado para que não ocorra condensação e assim prolongar a vida dos equipamentos, pelo que o condensador a jusante da turbina deverá trabalhar com pressões inferiores à atmosférica. No condensador a água deverá por sua vez passar ao seu estado de líquido saturado.

### 2.1.2 - “State of the Art”

O Ciclo Orgânico de Rankine, assentando no molde do ciclo anteriormente explicado, aparece com a necessidade de se aproveitar a energia disponível em quantidades mais reduzidas, no entanto possível de se aproveitar em vários pontos, utilizando para isso um fluido de trabalho que não a água mas sim um fluido orgânico.

Nos últimos anos têm sido experimentados diferentes fluidos, sendo que o consenso sobre a melhor opção recai no R245fa, cujas propriedades são explicadas no capítulo 4, no entanto o seu baixo ponto de ebulição é um dos principais factores para esta opção.

Nos dias de hoje existem duas configurações comuns para ciclos orgânicos de Rankine:

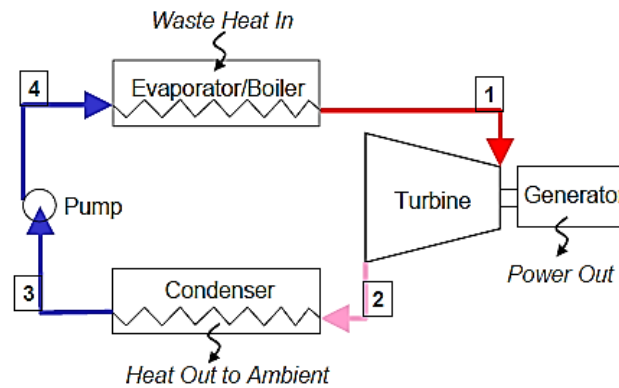


Figura 2. Esquemática de um ciclo orgânico de Rankine sem regeneração.

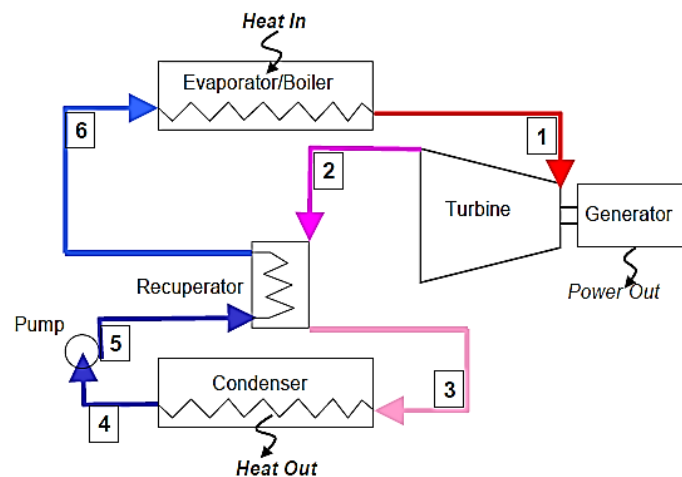


Figura 3. Esquemática de um ciclo orgânico de Rankine com regeneração.

Perante as duas opções, o esquema presente na figura 3 aparece com uma eficiência maior, devido à presença de um regenerador, pois desta forma é conseguido um reaproveitamento de alguma energia que o fluido ainda apresenta depois da expansão na turbina, além de que permite reduzir a energia a dissipar no condensador. Esta é a configuração utilizada pela grande maioria das entidades que têm investido na investigação deste tipo de sistemas.

## 2.2 - Hidrogénio

O hidrogénio é um tema que não reúne grande consenso dentro dos entusiastas, nas várias matérias em que aparece. Desde a forma como deverá ser produzido, até à forma como deverá ser utilizado, o assunto hidrogénio é tema para longas discussões.

### 2.2.1 - Introdução

O hidrogénio aparece representado pelo símbolo H, em primeiro lugar na tabela periódica o hidrogénio apresenta-se geralmente na sua forma molecular, formando o gás diatómico  $H_2$  que é altamente inflamável, incolor, inodoro, não metálico e insolúvel em água. O hidrogénio é o elemento com menor densidade, o que só por si trás grandes dificuldades no seu armazenamento. O átomo Hidrogénio é curiosamente o elemento mais abundante do universo, constituindo-o em 75%, no entanto é no seu estado elementar, relativamente raro na natureza, pelo que é industrialmente produzido a partir de hidrocarbonetos presentes no gás natural ou através da electrólise da molécula da água ( $H_2O$ ). O hidrogénio não aparece no seu estado elementar devido a ser bastante reactivo, contudo podemos encontrá-lo de uma forma simples associado a outros elementos [19] constituindo:

- Água
- Hidrocarbonetos Fósseis
  - Carvão
  - Petróleo
  - Gás Natural
  - Óleo de Xisto
- Substancias Biológicas
  - Proteínas
  - Celulose
- Minerais

Desta forma é então lógico que teremos de adicionar energia a um processo para que consigamos obter hidrogénio no seu estado elementar, fazendo deste elemento uma fonte energética não primária.

## 2.2.2 - Formas de Obtenção

Embora não sendo o foco desta dissertação, o estudo das formas de obtenção de hidrogénio, é interessante para o leitor o contacto com todas as outras formas de produção de hidrogénio que não aquela que será inteiramente abordada no documento, umas economicamente mais importantes que outras.

### Combustíveis Fósseis.

Nos combustíveis fósseis, hidrocarbonetos, podemos encontrar hidrogénio associado a átomos de carbono em diferentes ratios:

Tabela 1. Ratio de átomos de hidrogénio e carbono de alguns combustíveis.

Substancia	Ratio H/C
Metano	4
Fuel Óleo Pesado	1,5-1,6
Óleo de Xisto	1,6
Carvão	0,72-0,92

É de forma curiosa que se pode observar o facto de que a substancia mais favorável à produção de Hidrogénio e é o metano, que por sua vez é o composto principal do gás natural. Para que aconteça a separação do hidrogénio no metano é usado uma metodologia designada por “**Reformulação do Metano**”, que consiste numa serie de reacções químicas envolvendo o metano, vapor, um catalisador e calor. Efectivamente o Hidrogénio é retirado tanto do metano como da água, pelo que os elementos sobrantes se dissipam na forma de CO<sub>2</sub>. Esta tecnologia apenas apresenta 70% de eficiência.

Também com origem em combustíveis fósseis mas não com um ratio H/C tão interessante como no metano, no entanto economicamente bastante promissora, aparece o hidrogénio com base no carvão, pelo que a “**Gasificação do Carvão**” é vista como uma das tecnologias chave para a implementação do hidrogénio ainda este século.

### Electrólise

Esta é a tecnologia mais conhecida, pois é abordada desde tenra idade nas escolas preparatórias, contudo pouco tem evoluído, muito devido ao limitado interesse económico. A electrólise consiste no processo da separação da molécula da água por intermédio da aplicação de corrente eléctrica, que origina um “curto-circuito” elevando as

temperaturas para mais de 1000°C o que provoca a separação da molécula da água. Neste processo teremos então a produção de Hidrogénio e Oxigénio. Em baixo pode ser observado um esquema que demonstra esquematicamente o processo electrólise.

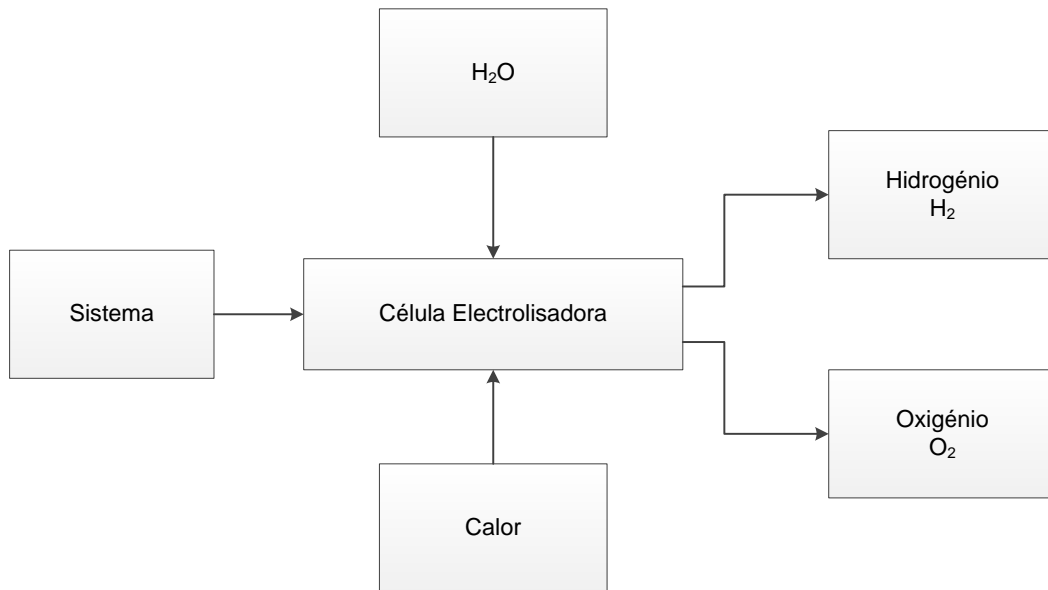


Figura 4. Esquematização do processo “electrólise”.

O rendimento deste processo pode ser descrito por intermédio da seguinte equação:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Energia do Hidrogénio Produzido}}{\text{Energia Eléctrica Induzida}}$$

Podemos ainda, de uma forma introdutória, salientar um dos pontos fortes desta tecnologia, além da simplicidade, é a forma como pode ser instalada em pouco espaço, pois os electrolisadores apresentam uma enorme versatilidade nos tamanhos em que podem surgir.

Além destas duas fontes de hidrogénio, as mais comuns, existem ainda algumas outras tal como a decomposição térmica de água em ciclo fechado, um processo híbrido que junta a decomposição térmica e electrolítica da água e ainda de uma outra forma com base na fusão termonuclear.

### 2.2.3 - “*State of the Art*”

Hoje em dia ainda pouco hidrogénio é usado, comparado com aquele que, de acordo com previsões, se poderá vir a usar, e na sua grande parte é conseguida a partir da reformulação do metano, em que um dado curioso será o facto de que o hidrogénio utilizado na propulsão das diversas missões espaciais tem origem neste método. Contudo, devido à crescente procura do hidrogénio e escassez do metano este não é um método tido como viável para um futuro sustentável. Por sua vez, é pela gasificação do carvão que o hidrogénio ganha sustentabilidade na voz dos críticos, no entanto com o seu desenvolvimento hipotecado uma vez que os esforços dos departamentos de I&D dos grandes grupos têm-se focado na produção de metano para substituição do Gás Natural.

Quanto ao processo “Electrólise”, que até recentemente não terá tido grande interesse e viabilidade económica, encontra-se agora no foco de todos os grandes fabricantes de automóveis quando abordam o tema Hidrogénio, pois as famosas “*fuel cells*” não são mais que electrolisadores funcionando num modo reversível. Hoje em dia os Electrolisadores disponíveis no mercado apresentam eficiências na ordem dos 70%, o que recorrendo a electricidade da rede ou com origem fóssil se torna um processo economicamente inviável, ou seja e tomando como exemplo electricidade proveniente de uma central termoelétrica que, considerando um ciclo combinado, apresenta actualmente um rendimento que ronda os 60%, temos então um processo com um rendimento global de 42%. Pelo que o recurso à electrólise é hoje em dia bem visto quando tratamos de fontes de energia eléctrica renováveis ou dissipadas até então, uma vez que o hidrogénio é também considerado como uma forma de armazenamento de energia, sendo então este o assunto abordado neste trabalho.

## Capítulo 3

### 3 - O Meio Naval, Panorama.

O mercado naval está, nos dias de hoje, a atravessar uma das suas maiores crises, tal como muitas outras indústrias. A crescente competição entre prestadores de serviços e reduzida procura leva a que os armadores fretem os seus navios por valores cada vez mais baixos, causando uma asfixia em determinados ramos do meio naval.

Além da decrescente procura e crescente competitividade na oferta de fretes, aumenta cada vez mais o cerco aos focos de poluição, pelo que o consumo de energias com origem fóssil, nomeadamente as fontes com origem petrolífera, tende cada vez mais a ser prejudicado em prol de energias mais limpas. Por exemplo, a partir de 2020 qualquer navio que navegue os oceanos não poderá queimar combustíveis que apresentem um teor de enxofre superior a 0,50%, eliminando desta forma a queima de combustíveis residuais, que por norma apresentam um valor mínimo de 1,00%. Desta forma restará a queima de gasóleo marítimo, com um teor de enxofre normalmente na casa dos 0,01%, facto que representa um enorme acréscimo de custos de exploração para alguns armadores. É por esta razão que qualquer forma que possibilite a redução no consumo directo de gasóleo será bem-vinda.

### 3.1 - Tipologias

A cruzar os nossos oceanos encontramos diferentes tipos de navios, adequados às mais diversas áreas, podendo ser divididas em 4 principais grupos, e diversos subgrupos como podemos ver de seguida.



No âmbito deste documento serão tidos como objeto de estudo alguns navios que pertencem a diferentes subgrupos dentro dos navios de comércio. Esta opção é tomada devido ao facto de que perante uma fase de estudo aparecem facilidades quando existe um possível interesse económico, pelo que os navios de comércio, os que reinam nos sete mares, aparecem como os mais apetecíveis no que toca a rentabilidade, existindo sempre a hipótese de adaptação posterior.

Como podemos observar na figura 5, existem dois tipos de navios de comércio, os de carga e os de passageiros.

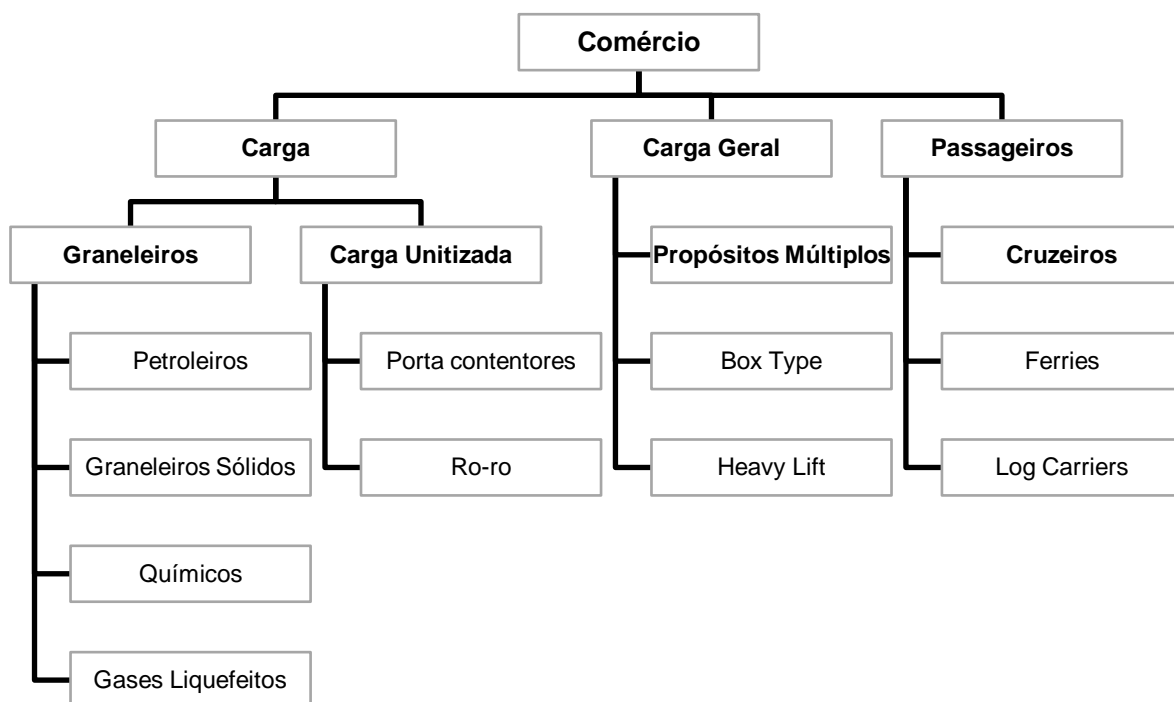


Figura 5. Esquemática da tipologia dos navios comerciais.

Para desenvolvimento, o autor teve a oportunidade de efectuar o registo de inúmeras variáveis abordo de diferentes navios, pelo que é dado a conhecer ao leitor o potencial técnico-económico para navios dos tipos: petroleiro e porta-contentores, os navios visitados e tomados como possíveis instalações hospedeiras.

### 3.1.1 - Navio Petroleiro

O navio petroleiro é normalmente classificado de duas formas, por produto transportado bem como por porte, sendo a segunda forma a mais comum.

Tabela 2. Classificação de navios petroleiros.

Classificação por Produto	Classificação por Tamanho
Crude	Handysize
Produtos Limpos	Panamax
Produtos Sujos	Aframax
	Suezmax
	VLCC*
	ULCC*

\*VLCC- Very Large Crude Carrier, ULCC – Ultra Large Crude Carrier

### 3.1.2 - Navio Porta-Contentores

Os navios Porta-Contentores, tal como o nome indica, são navios cuja funcionalidade é o transporte de contentores com os mais diversos bem materiais. A sua classificação pode ser visualizada na seguinte tabela:

Tabela 3. Classificação de navios porta-contentores.

Tipo	Capacidade
Feeder	100-449
Feedermax	500-999
Handy	1.000-1.999
Sub-Panamax	2.000-2.999
Panamax	3.000-4.500
Post-Panamax	>4.500

## 3.2 - Sistemas Consumidores

Logicamente, uma inúmera variedade de navios apresenta uma inúmera variedade de configurações no que diz respeito à sua arquitectura mecânica. A bordo de um navio existem vários sistemas consumidores e conversores de energia, pois logicamente todas as formas de energia têm de ser tratadas a bordo, tendo como origem, energia primária, o combustível que lhe é fornecido (energia química).

Neste momento podemos abreviar as conversões e necessidades energéticas no seguinte esquema entre a origem e o fim:

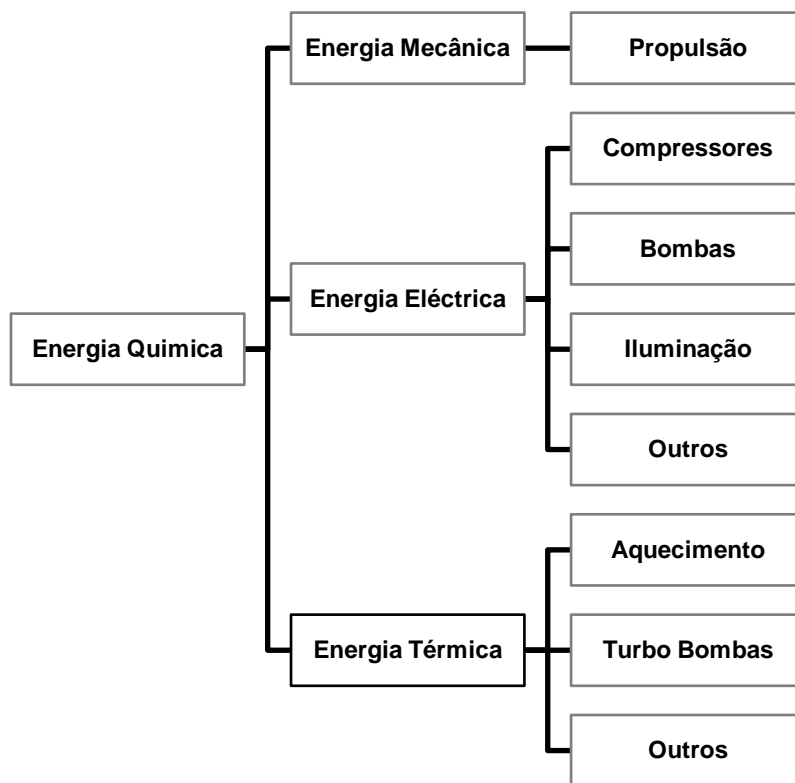


Figura 6. Esquemática do fluxo que a energia química no navio

O esquema presente na figura anterior, sendo um esquema genérico, representa na realidade os equipamentos que proporcionam a gestão energética de um navio, os quais, geralmente, são:

- Máquina Principal;
- Geradores Auxiliares;
- Caldeira.

Existem casos em que a propulsão é conseguida através de motores eléctricos o que faz com que todos os geradores sejam auxiliares, pois toda a energia necessária à propulsão com origem em energia química é transformada em eléctrica.

Neste ponto do documento é importante ao leitor perceber que é impossível ao autor expor no presente documento todas as configurações possíveis, sendo que a opção passa por tentar abordar o assunto segundo o que foi experienciado e perceber os tipos de equipamentos em análise para que assim seja possível perceber o potencial de aproveitamento térmico existente.

### 3.2.1 - Máquina Principal

O termo máquina principal está associado ao equipamento responsável pela propulsão do navio, sendo que o sistema mais comum hoje em dia são motores térmicos de ciclo *diesel*, a dois ou quatro tempos. Existem também casos em que a propulsão é conseguida através de turbinas, não sendo muito comum por vários motivos, sendo que os motivos estruturais (flexão do casco) dificultam o perfeito funcionamento deste tipo de equipamentos.

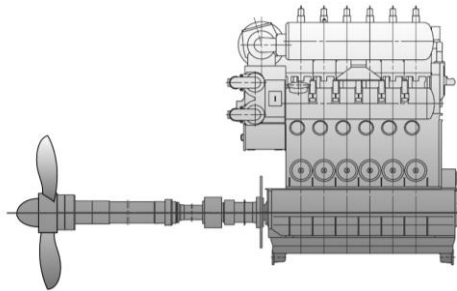


Figura 7. Representação de um motor marítimo a dois tempos.

Da máquina principal, em muitas situações, é também conseguida a produção de energia eléctrica. Com a instalação de uma caixa redutora é possível dividir parte do trabalho do motor em energia mecânica e outra parte em energia eléctrica.

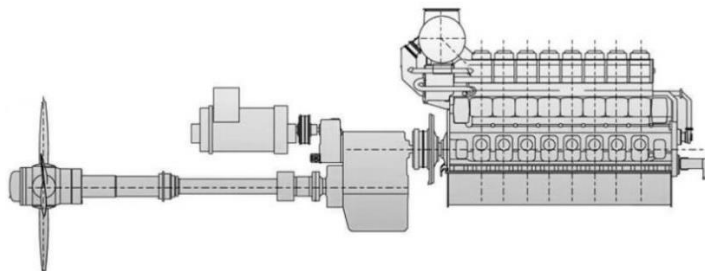


Figura 8. Representação de um motor marítimo a quatro tempos com PTO.

### 3.2.2 - Geradores Auxiliares

Os geradores auxiliares são em tudo idênticos ao motor principal, contudo e como é normal apresentam potências mais reduzidas e aparecem com a necessidade de redundâncias, ou seja, para que seja possível uma gestão energética de acordo com necessidades transientes de energia eléctrica a bordo é comum a instalação de 2 ou mais geradores auxiliares. Desta forma é garantido que as necessidades mínimas estão sempre garantidas, no entanto é exigido ainda que a bordo esteja presente ainda outro gerador de emergência.

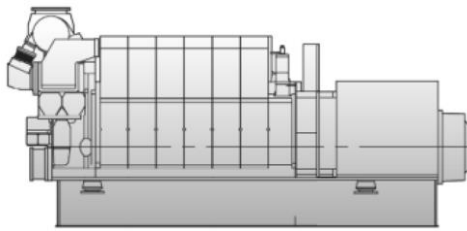


Figura 9. Representação de um motor gerador marítimo.

### 3.2.3 - Caldeiras

As caldeiras existem em todos os tipos de navios, variando a sua aplicabilidade e por consequência a potência e tipologia associadas. A bordo é possível assistir-se à instalação de dois tipos de caldeiras, as auxiliares e as recuperativas, sendo que por vezes podem estar associadas constituindo caldeiras compostas. As caldeiras auxiliares são o tipo de caldeira que apresenta queimador, ou seja, apresenta consumo de energia primária. Por sua vez as recuperativas asseguram a recuperação de energia proveniente de gases de escape não necessitando de queima para geração de vapor ou aquecimento de água. As caldeiras compostas são sistemas que aparecem na linha de escape dos motores térmicos para recuperação de gases, no entanto, estas apresentam queimador para adição suplementar de energia térmica na geração de vapor.

As caldeiras podem existir no navio com diferentes objectivos, desde o simples aquecimento de águas, mas também com o objectivo de geração de vapor que poderá ser utilizado para aquecimento de carga mas também como fluido de trabalho de turbinas presentes numa instalação de bombeamento de carga, isto por exemplo no caso de um navio petrolífero.



Figura 10. Representação de uma caldeira.

### 3.3 - Casos de Estudo

No decorrer da elaboração do projecto, foram identificados dois navios, que dentro dos disponíveis, apresentaram mais vantagens no que diz respeito ao estudo técnico para dimensionamento e instalação de um módulo COR. Esta escolha teve não só em conta a potência dissipada dos navios mas também, o equipamento presente e a gestão energética que é levada a bordo de cada um deles.

Os navios escolhidos como possíveis hospedeiros, são navios de diferentes tipos.

Tabela 4. Caracterização dos navios presentes neste estudo.

Nome	NAVIO A	NAVIO B
<b>Tipo de Navio</b>	Porta Contentores	Petroleiro
<b>Comprimento entre perpendiculares</b>	120m	274m
<b>Boca</b>	20m	48m
<b>GT</b>	5599ton	79235ton
<b>Potência da Máquina Principal</b>	5940kW	16440kW
<b>Número e Potência de Geradores</b>	2x380kW	3x800kW

Nas alíneas seguintes são descritas com maior detalhe as principais características técnicas dos navios, bem como a sua gestão energética.

#### 3.3.1 - Navio A: Porta Contentores

Um dos navios escolhidos trata-se de um navio porta contentores, um navio Português, construído nos estaleiros de Viana do Castelo, é um dos navios que faz o fornecimento de bens aos arquipélagos dos Açores e da Madeira, este pode ser visto regularmente nos terminais de Santa Apolónia, Lisboa, Portugal.



Figura 11. Aparência de um navio porta contentores – Navio A.

O navio, como já foi descrito apresenta uma configuração simples, com uma máquina principal, um gerador eléctrico acoplado ao veio de propulsão, dois geradores, uma caldeira recuperativa e uma caldeira auxiliar.

No que toca a gestão energética é também levada uma gestão simples, pelo que recorrem à utilização em porto dos geradores auxiliares, um ou dois, conforme a carga, bem como à caldeira auxiliar. Durante a travessia, toda a energia a bordo é conseguida por intermédio da máquina principal, energia mecânica, eléctrica e térmica.

O Navio A é também objecto piloto da empresa TecnoVeritas, no âmbito do projecto VEEO+ (*Voyage Energy and Emissions Optimizer*) que visa a instalação de um sistema de monitorização a bordo com a capacidade de enviar informação adquirida para qualquer dispositivo em que corra um explorador web. A inclusão deste navio no projecto VEEO+, teve só por si um peso na sua selecção para o estudo da viabilidade de instalação de um COR, pois desta forma teríamos dados adquiridos em tempo real durante um vasto período de aquisição. Os dados adquiridos são demonstrados no capítulo 3.5.

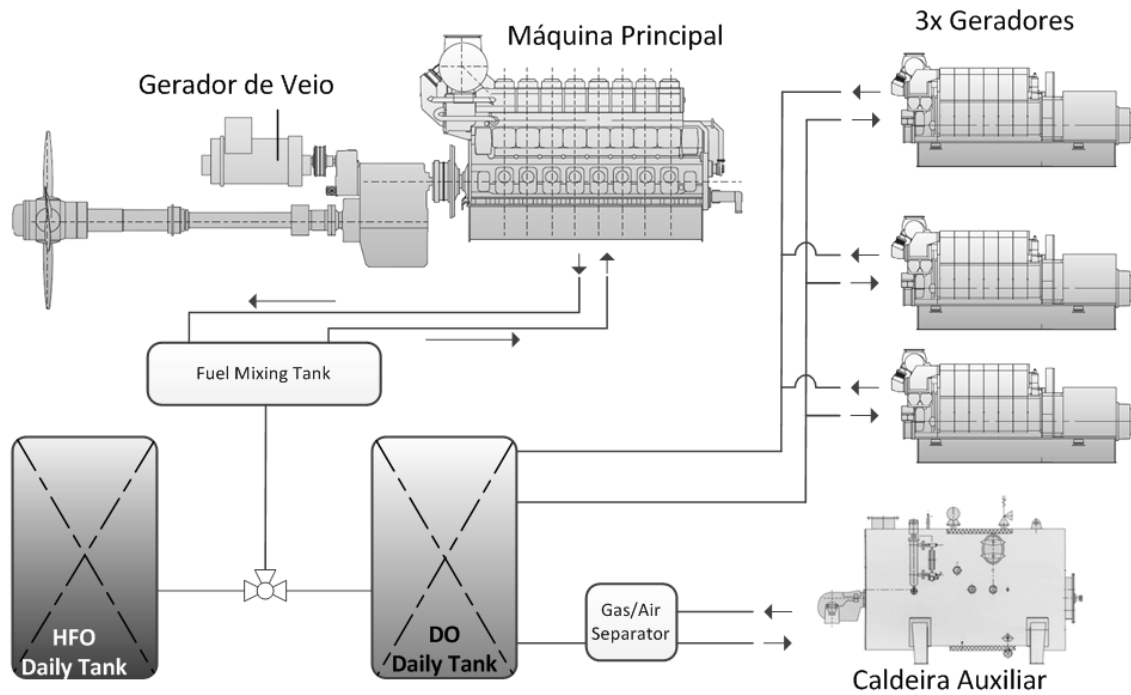


Figura 12. Esquema da linha de abastecimento de combustível – Navio A.

De uma forma sucinta é possível resumir a gestão energética efectuada a bordo do avio A da seguinte forma:

Tabela 5. Caracterização da gestão energética – Navio A.

	Em Porto	Em Manobra	Em Mar aberto
Máquina Principal		<b>X</b>	<b>X</b>
PTO*		<b>X</b>	<b>X</b>
Gerador 1	<b>X</b>		
Gerador 2			
Caldeira Recuperativa			<b>X</b>
Caldeira Auxiliar	<b>X</b>		

\*PTO é a designação utilizada para fazer referência ao gerador de veio, querendo dizer “Power take of”.

### 3.3.2 - NAVIO B: Petroleiro.

Dentro do leque de hipóteses para uma instalação hospedeira, encontrou-se também disponível um navio petroleiro, hipótese que representa uma análise diferente da do primeiro navio, o Spyridon por sua vez faz viagens longas de longos ciclos de cargas constantes com utilização de energia própria de um navio petroleiro.

O navio apresenta na sua constituição, além dos principais consumidores (M/E – *Main Engine* e A/E – *Auxiliar Engine*) duas caldeiras auxiliares que fazem parte da instalação de carga, em que geram vapor responsável por accionar as turbinas das bombas de carga.



Figura 13. Aparência de um navio petroleiro – Navio B.

Neste navio, para além da propulsão grande parte da energia química é consumida para efeito de descarga da carga transportada, ou seja, também em porto este tipo de navio necessita de grande disponibilidade energética. Este facto sugere que se torna atractivo a produção de hidrogénio durante a viagem, recorrendo à recuperação da energia térmica dissipada pela máquina principal e geradores.

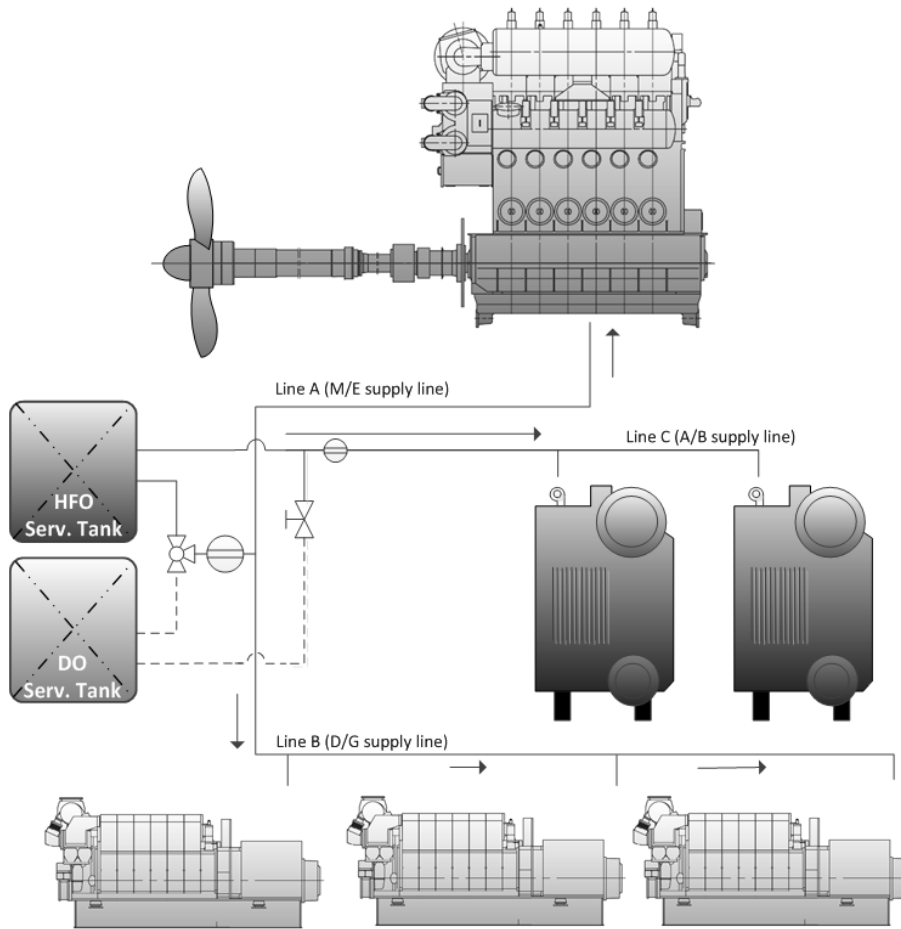


Figura 14. Esquema da linha de abastecimento de combustível – Navio B.

De uma forma sucinta podemos resumir a gestão energética efectuada a bordo do Navio B da seguinte forma:

Tabela 6. Caracterização da gestão energética – Navio B.

	Em Porto	Em Manobra	Em Mar aberto
Máquina Principal		X	X
Gerador 1	X	X	X
Gerador 2	X	X	X
Gerador 3		X	
Caldeira Recuperativa			X
Caldeira Auxiliar	X		

### 3.4 - Aquisição de dados reais

No início do projecto foram identificadas as principais variáveis a serem registadas, para que posteriormente se chegasse ao correcto dimensionamento do módulo COR. Numa primeira abordagem, para que se conseguisse ter noção da energia térmica dissipada, é notória a dificuldade de medição exacta desta grandeza uma vez que não existe instrumentação capaz de nos fornecer este dado. Deste modo é opção seguir pelo método indirecto calculando as ineficiências através da energia útil.

As variáveis a ter em conta para o dimensionamento técnico e cálculo da viabilidade económica são:

- Consumo da Máquina Principal;
- Potência Mecânica produzida pela Máquina Principal;
- Potência Eléctrica produzida pela Máquina Principal;
- Consumo dos Geradores;
- Potência Eléctrica produzida pelos Geradores;

As variáveis anteriores tornam-se fundamentais no cálculo técnico e económico, para que numa primeira linha se perceba como é dissipada a energia e posteriormente a sua viável recuperação e utilização, seja por via eléctrica ou química.

#### 3.4.1 - Registo da Potência Consumida

A potência consumida é, de entre as variáveis necessárias, uma das mais fáceis de se aceder. A bordo dos navios tidos como cobaias, estão instalados caudalímetros (sensores de caudal) que nos ajudam a conhecer instantaneamente o caudal de combustível (kg/h) que alimenta o motor.

A potência de alimentação é conseguida através da seguinte expressão:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m} \times PCI$$

O PCI, poder calorífico inferior, é energia útil por massa de combustível (kWh/ton) que este apresenta, este valor varia conforme o tipo de combustível em questão e é um valor que é conseguido através da observação do certificado de combustível, recebido pelo navio em cada operação de abastecimento. Na ausência deste dado é utilizado um valor de referência para cada tipo de combustível (tabela 7).

Tabela 7. Caracterização do poder calorífica de HFO e Diesel marítimo.

	PCI
Fuel óleo pesado	40500 kJ/kg
Diesel Óleo Marítimo	42000 kJ/kg

### 3.4.2 - Registo da Potência Mecânica Produzida

A potência mecânica fornecida ao veio do navio é, talvez, das variáveis necessárias a que mais complicação apresenta. Para medir a potência terá sido necessário instalar um sistema para medição de binário e rotação para que posteriormente se tivesse acesso à potência, uma vez que a potência é resultante do seguinte produto:

$$\dot{Q}_{mec\_out} = \tau \times \omega$$

Verifica-se então que a potência fornecida ao veio,  $kW$ , é o produto resultante entre o binário,  $T$ , e a velocidade angular de rotação do veio,  $\omega$ . A velocidade de rotação é conhecida e o binário será então obtido com recurso à extensometria, por intermédio de uma ponte de Wheatstone completa.

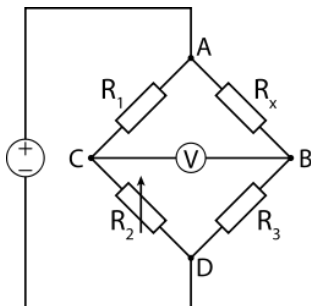


Figura 15. Ponte de Wheatstone completa.

Na figura ao lado observamos o esquema de uma ponte de Wheatstone completa. Esta montagem permite a medição de uma tensão que varia conforme a torsão do veio, ou seja, através de uma tensão de excitação e partindo de um estado de repouso, a torsão do veio provocado pelo momento torsor devido à resistência de rotação do hélice na água fará com que as resistências alterem a sua resistividade. É desta forma que a tensão de saída, medida, irá variar de acordo com o binário aplicado no veio.

Na figura 16 é possível a visualização de uma montagem de um extensómetro.

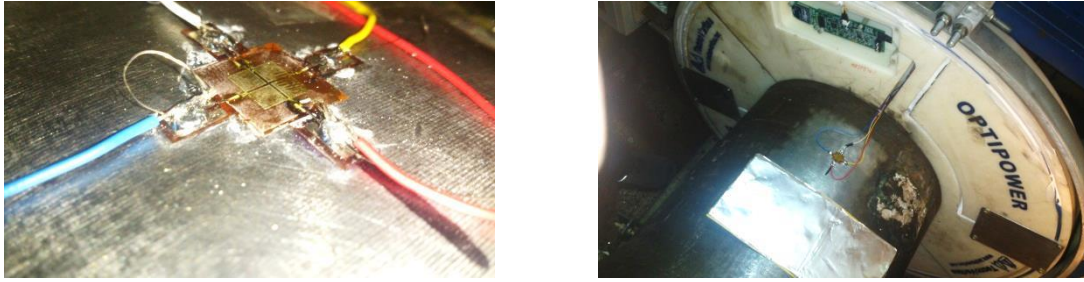


Figura 16. Montagem de equipamento para medição de potência ao veio.

As imagens anteriores foram registadas aquando da instalação de um equipamento para medição contínua do binário.

### 3.4.3 - Registo da Potência Eléctrica Produzida

A potência eléctrica é conseguida através da medição directa nos pontos de produção. Utilizando transformadores de corrente é registada em contínuo a corrente que atravessa os barramentos à saída dos geradores. Medindo a corrente podemos chegar á potência activa de produção através da seguinte expressão:

$$P = U_e \times I_e \times \cos \phi \times \sqrt{3}$$

Conhecendo a tensão da instalação,  $U$ , e atribuindo um factor de potência conhecido,  $\cos \phi$ , conseguimos aferir a potência eléctrica produzida.

## 3.5 - Verificação de Dados

### 3.5.1 - Dados – NAVIO A

Como já foi referido anteriormente neste documento, o navio Navio A revelou-se um excelente caso de estudo devido à possibilidade de acesso aos dados em contínuo, através do *software* instalado a bordo temos acesso em terra à gestão energética diária do navio em porto, em manobras e em mar aberto.

Para efeitos de cálculos vamos considerar o seguinte intervalo de tempo:

- 4 a 20 de Junho de 2014

## Potência Consumida:

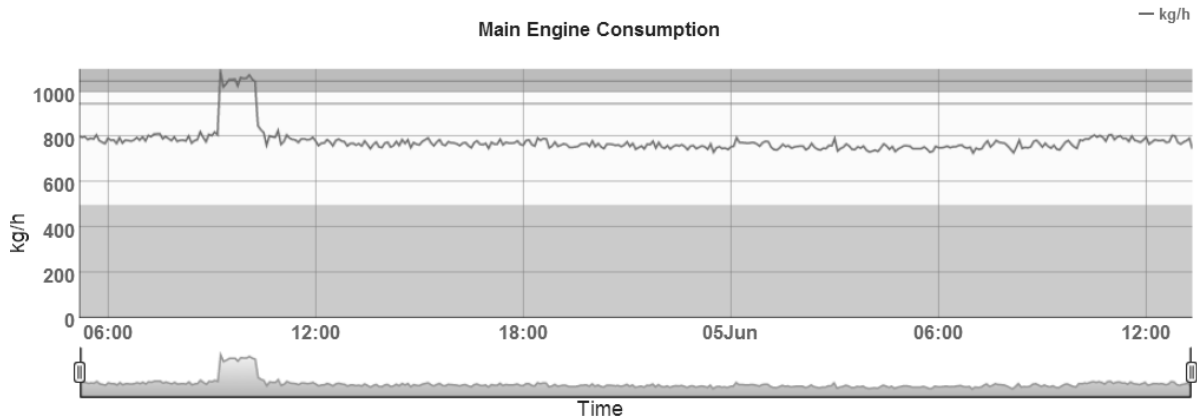


Figura 17. Aquisição de dados sobre o consumo da máquina principal – Navio A.

No seguimento da análise do gráfico anterior é considerado um consumo médio de 780kg/h, considerando um poder calorífico inferior 40500 kJ/kg durante as 31 horas observadas temos uma potência média de consumo a rondar os 8750kW.

## Potência Produzida

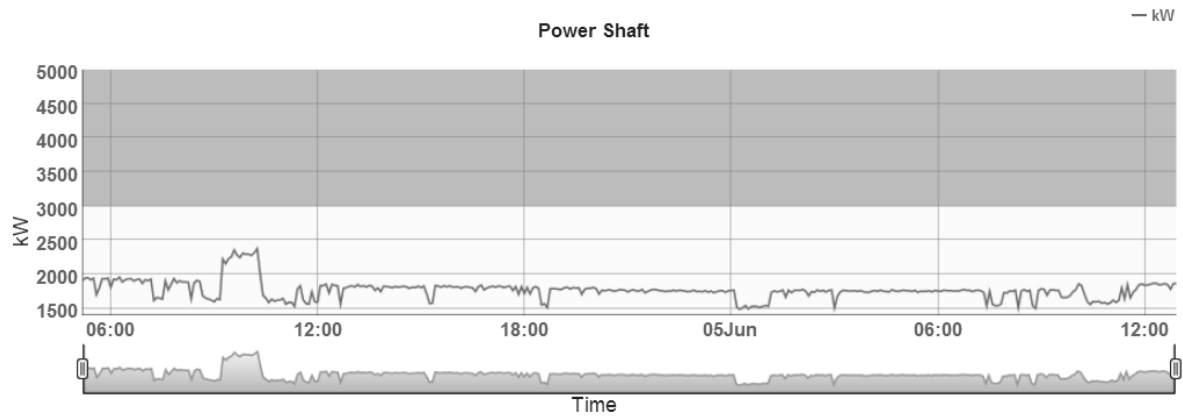


Figura 18. Aquisição de dados sobre a potência transferida ao veio – Navio A.

Através da leitura deste gráfico é aferido um valor médio de potência no veio de 1770kW<sub>M</sub>.

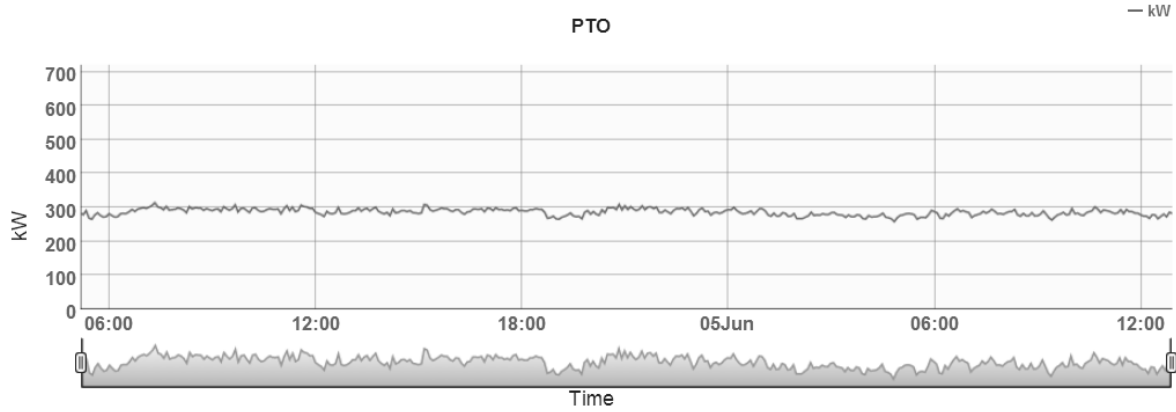


Figura 19. Aquisição de dados sobre o a potência produzida no PTO – Navio A.

Do gráfico anterior concluímos que do gerador eléctrico acoplado à máquina principal extraímos uma potência eléctrica média de  $290 kW_E$ .

Das anteriores leituras podemos determinar a potência térmica que normalmente é dissipado para o mar e atmosfera:

$$8550 kW_Q = 1770 kW_M + 290 kW_E + x kW_T \leftrightarrow$$

$$x kW_T = 8550 kW_Q - (1770 kW_M + 290 kW_E) \leftrightarrow$$

$$x = 6715 kW_T$$

Note-se que os valores anteriormente apresentados têm já em consideração as perdas mecânicas na caixa redutora onde estão acoplados ambos os veios, pelo que a ineficiência alcançada deve-se apenas a perdas térmicas. Temos então uma potência térmica dissipada de  $6715 kW_T$ , revelando um rendimento térmico de 23%, valor bastante reduzido face ao que é tido como *standard*, deve-se isto ao facto de que o navio labora com a sua máquina principal muito abaixo das condições de projecto.

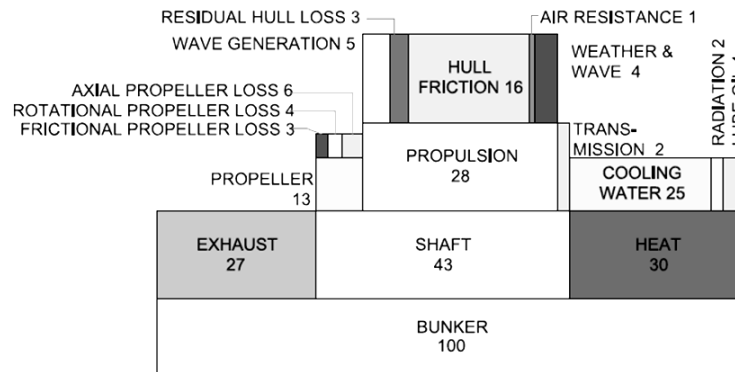


Figura 20. Diagrama de perdas de um motor térmico, imagem retirada da IMO, *International Maritime Organization*.

Na figura 20, está presente um diagrama que a IMO, *International Maritime Organization*, apresenta como normal no que diz respeito ao comportamento termodinâmico de uma instalação propulsora de um navio. Observando este diagrama concluímos que é normal grande parte da energia ser dissipada em energia térmica, mais de 57% da energia primária. No entanto esta energia engloba toda a energia térmica necessária ao funcionamento do próprio motor, como por exemplo a capacidade de arrefecimento das partes móveis, as águas de arrefecimento, energia que não será considerada no desenvolvimento do módulo COR, apenas a energia presente nos gases de escape será contabilizada.

Extrapolando a parcela da energia que é dissipada através dos gases de escape (normalmente 27% da energia química fornecida, equivalendo 47% da energia térmica dissipada no total) para o caso do Navio A estão presentes nos gases 3180kW, associando um coeficiente de segurança de 15%, é aferido um potencial térmico de gases para aproveitamento que rondarão os 2700kW<sub>T</sub>. Contudo na linha de escape do motor está instalada uma caldeira recuperativa que, na sua folha de características, conta com um aproveitamento térmico de até 580kW, sendo considerado um rendimento de 90%, a caldeira irá absorver então aos gases uma potência que rondará os 640kW. Assume-se que a caldeira trabalha sempre à sua carga máxima.

No balanço energético é, neste ponto, necessário ter também em conta o fluxo de gases e a sua temperatura, que traduz a potência em questão. A temperatura dos gases não é registada continuamente nem existe informação sobre o seu valor após passagem pela caldeira recuperativa, contudo com recurso ao manual técnico do motor é possível o acesso ao caudal mássico dos gases de escape às diferentes cargas. Na carga em questão verifica-se um caudal de 6,08 kg/s. A partir daqui, com recurso à seguinte equação em baixo, é possível determinar a temperatura dos gases em questão.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T - T_{ref})$$

Resolvendo a equação, tendo em conta uma potência disponível de 2050kW<sub>T</sub>, um valor de temperatura de referência de 20°C e considerando um valor de calor específico, c<sub>p</sub>, de 1,025 kJ/Kg·K, resulta um valor de temperatura de gases a rondar os 350°C. Esta será a temperatura a que os gases irão entrar na serpentina que definirá a fonte quente do módulo COR.

Existe ainda uma última condição para que a instalação de um módulo COR seja viável, que diz respeito à formação de enxofre durante o arrefecimento de gases. O ponto

de orvalho dos gases de escape que contêm óxidos de enxofre é de 180°C, pelo que em momento algum a temperatura dos gases deverá baixar desta temperatura.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times c_p \times (T_{in} - T_{out})$$

Considerando os 500kW<sub>T</sub> que é tido como objectivo recuperar, um c<sub>p</sub> médio de 1,025 kJ/Kg·K, e um caudal mássico de 6,08 kg/s teremos:

$$500 = 6,08 \times 1,025 \times (350 - T_{out}) \leftrightarrow$$

$$T_{out} = 270^\circ\text{C}$$

Conclui-se, por final, que o navio Navio A é um bom caso de estudo para implementação de um COR, e, possivelmente, para utilização de hidrogénio na sua forma liquefeita, caso que é verificado mais à frente neste documento.

### 3.5.2 - Dados – NAVIO B

Ao contrário do Navio A, o Navio B não apresenta na sua instalação a bordo qualquer equipamento de monitorização em contínuo, pelo que o registo de dados foi totalmente realizado “in loco”.

#### Potência Consumida

A quantificação da potência consumida na unidade de propulsão do Navio B, é conseguida através da observação do totalizador presente no sensor de caudal que contabiliza o combustível consumido.

Na tabela seguinte estão os registos efectuados aquando da leitura.

Tabela 8. Registos de leitura de consumo – Navio B.

Valor Inicial (litros)	Valor Final (litros)	Diferença (litros)	Temperatura (°C)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
2673602	2674131	529	127	965,1

Os dados registados apresentam um intervalo de 15 minutos (0,25 horas), então no seguimento da análise da tabela anterior é considerado um consumo médio de 1940kg/h. No caso do navio Spyridon considerando o poder calorífico inferior que vem no certificado, 41.050 kJ/kg, é aferida uma potência média de consumo a rondar os 22122kW.7

## Potência Produzida

A potência produzida pelo motor principal, no caso do Navio B, aparece apenas sob a forma de potência mecânica, que é entregue ao hélice, pois neste navio não existe PTO, ou qualquer caixa redutora.

Para se aferir a potência produzida é utilizado um equipamento que, também recorrendo à extensometria, devolve o binário a que o veio está sujeito.

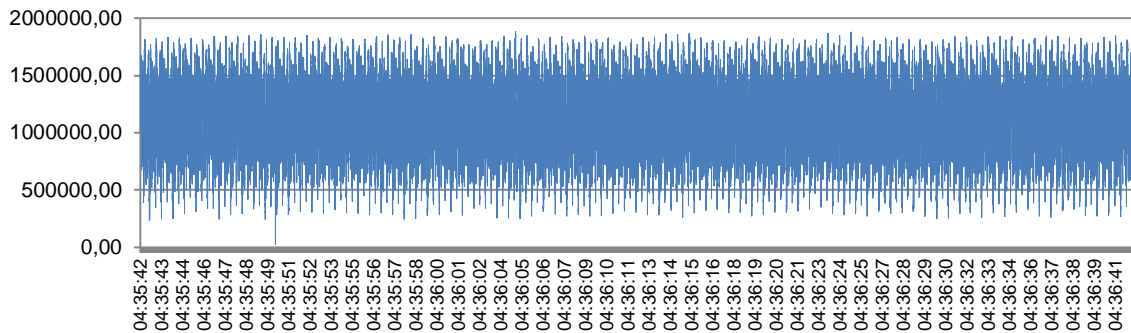


Figura 21. Aquisição de binário – Navio B

$$T_{\text{médio}} = 1171,94 \text{ kN.m}$$

Nota: A grande amplitude do sinal adquirido no tempo (1 minuto) deve-se à existência de vibrações torsionais a que o veio está sujeito neste regime.

Temos então para uma velocidade de rotação de 86RPM a seguinte potência:

$$\omega = 2 \times \pi \times \frac{86}{60} = 9 \text{ rad/s}$$

$$Q_{\text{Mec}} = 1171,94 \times 9 = 10554 \text{ kW}_M$$

Seguindo o raciocínio levado a cabo para o navio Navio A, temos uma potência nos gases que rondará os 5480kW, presentes num caudal de 14kg/s.

Tal como o Navio A, o Navio B apresenta também uma caldeira recuperativa, a qual apresenta uma capacidade de recuperação de 1000kW.

Com o mesmo coeficiente de 15% de segurança, para perdas como radiação nas tubagens, ficaremos com uma potência disponível nos gases de escape de 3614 kW a 234°C.

Na verificação para que se tenha em atenção a produção de enxofre o resultado é positivo, uma vez que os gases de escape deixam o navio a 202°C, suficientemente superior aos 180°C tidos como limite.

## Capítulo 4

### 4 - COR, Desenvolvimento.

Neste capítulo serão abordados todos os pontos inerentes à construção de um módulo COR, bem como a forma como o controlo da qualidade da electricidade que será gerada.

São feitas as primeiras considerações para que, com um determinado objectivo, se tome um princípio de desenvolvimento a fim de se conseguir o correcto dimensionamento para determinada potência produzida.

No desenvolvimento do módulo é necessário apontar para uma determinada potência máxima de recuperação, para que seja possível o correcto dimensionamento dos equipamentos constituintes, bem como o correcto comportamento do ciclo termodinâmico. Através desta potência será possível aferir temperaturas de funcionamento, prevendo também a evolução do fluido de trabalho ao longo do ciclo. Será considerada, então, uma potência térmica recuperável de 500 kW nos gases de escape, potência que terá sido comprovada como possível de se recuperar no capítulo anterior.

## 4.1 - Fluido de Trabalho

Nos últimos anos a recuperação de energia a partir de efluentes térmicos de baixa temperatura tem ganho alguma expressão, pelo que os ciclos orgânicos de Rankine oferecem um meio efectivo de viabilizar a produção de energia eléctrica. É neste facto que assenta a principal diferença em relação a um convencional ciclo de Rankine que apresenta como fluido de trabalho a água, necessitando de fontes térmicas com muito maior temperatura. No entanto para que um ciclo Orgânico de Rankine (COR) explore a sua principal vantagem, necessita de contar com um fluido de trabalho próprio com determinadas características.

Como será fácil de perceber a escolha do fluido de trabalho deverá obedecer a determinados critérios tendo sempre em conta a capacidade de conservação da energia, critérios esses que assentam também em determinadas características definidas ao longo do tempo. Segundo J.M. Calm e G. C. Hourahan 2011, os refrigerantes passaram por quatro importantes e distintas fases [1]:

- 1830-1930 – Tudo Funciona: CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, HCOOCH<sub>3</sub>, HCs, H<sub>2</sub>O, CCl<sub>4</sub>, CHCs, etc.
- 1931-1990 – Seguros e Duráveis: CFCs, HCFCs, HFCs, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, etc.
- 1990-2010 – Protecção à camada de Ozono: HCFCs, HFCs, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HCs, CO<sub>2</sub>, etc.
- 2010-Presente – Alarme Geral: muito baixa taxa de destruição da camada de ozono, baixo GWP\*, HFCs, alta eficiência.

\*GWP – Global Warming Potencial

Como é possível observar [2], no início da utilização de fluidos de trabalho existia como simples objectivo o funcionamento próprio da instalação, no entanto com o aperfeiçoamento deste tipo de utilização surgem as preocupações de sustentabilidade e segurança, sendo promovida uma fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento de fluidos compostos, fase que durou 70 anos. Por volta dos anos 90 surgem as primeiras preocupações ambientais, altura em que é assinado o protocolo de Kyoto, promovendo a preocupação ambiental globalizada. A terceira fase decorreu durante 20 anos, denotando-se uma rápida resposta dos fabricantes, pelo que em 2010 surge uma nova fase que generaliza a preocupação ambiental.

Tendo em conta a fase em que estamos no que diz respeito à selecção, optimização e utilização de um fluido de trabalho é necessário seguir determinados

critérios de selecção. De acordo com H. Chen, D. Y. Goswami e Elias K. Stefanakos, 2010, teremos os seguintes critérios a respeitar:

- Termodinâmica e Propriedades físicas:
  - Tipo de Fluido;
  - Influência do calor latente, densidade e calor específico;
  - Eficiência de Sobreaquecimento;
  - Pontos críticos do fluido.
- Estabilidade e compatibilidade com os materiais;
- Aspectos ambientais;
- Segurança;
- Viabilidade e Custos.

No mesmo estudo os autores, tendo em conta os pontos em cima mencionados, resumiram 35 diferentes fluidos que poderiam ser utilizados em ciclos orgânicos de Rankine [3]:

Tabela 9. Propriedades de fluidos.

SHRAE number	Name	Molecular weight	$T_c$ (K)	$P_c$ (MPa)	Vapor $C_p$ (J/kgK)	Latent heat $L$ (kJ/kg)	$\xi$ (J/kgK <sup>2</sup> )
R-21	Dichlorofluoromethane	102.92	451.48	5.18	339.85	216.17	-0.78
R-22	Chlorodifluoromethane	86.47	369.30	4.99	1069.13	158.46	-1.33
R-23 <sup>a</sup>	Trifluoromethane	70.01	299.29	4.83	3884.02	89.69	-6.49
R-32	Difluoromethane	52.02	351.26	5.78	2301.61	218.59	-4.33
R-41 <sup>a</sup>	Fluoromethane	34.03	317.28	5.90	3384.66	270.04	-7.20
R-116 <sup>a</sup>	Hexafluoroethane	138.01	293.03	3.05	4877.91	30.69	-5.54
R-123	2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane	152.93	456.83	3.66	738.51	161.82	0.26
R-124	2-Chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane	136.48	395.43	3.62	908.70	132.97	0.26
R-125	Pentafluoroethane	120.02	339.17	3.62	1643.89	81.49	-1.08
R-134a	1,1,1,2-Tetrafluoroethane	102.03	374.21	4.06	1211.51	155.42	-0.39
R-141b	1,1-Dichloro-1-fluoroethane	116.95	477.50	4.21	848.37	215.13	0.00
R-142b	1-Chloro-1,1-difluoroethane	100.50	410.26	4.06	1036.52	185.69	0.00
R-143a	1,1,1-Trifluoroethane	84.04	345.86	3.76	1913.97	124.81	-1.49
R-152a	1,1-Difluoroethane	66.05	386.41	4.52	1456.02	249.67	-1.14
R-170 <sup>a</sup>	Ethane	30.07	305.33	4.87	5264.72	223.43	-8.28
R-218	Octafluoropropane	188.02	345.02	2.64	1244.87	58.29	0.45
R-227ea	1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane	170.03	375.95	3.00	1013.00	97.14	0.76
R-236ea	1,1,1,2,3,3-Hexafluoropropane	152.04	412.44	3.50	973.69	142.98	0.76
R-245ca	1,1,2,2,3-Pentafluoropropane	134.05	447.57	3.93	1011.26	188.64	0.60
R-245fa	1,1,1,3,3-Pentafluoropropane	134.05	427.20	3.64	980.90	177.08	0.19
HC-270	Cyclopropane	42.08	398.30	5.58	1911.81	366.18	-1.54
R-290	Propane	44.10	369.83	4.25	2395.46	292.13	-0.79
R-C318	Octafluorocyclobutane	200.03	388.38	2.78	896.82	93.95	1.05
R-3-1-10	Decafluorobutane	238.03	386.33	2.32	928.83	77.95	1.32
FC-4-1-12	Dodecafluoropentane	288.03	420.56	2.05	884.25	86.11	1.56
R-600	Butane	58.12	425.13	3.80	1965.59	336.82	1.03
R-600a	Isobutane	58.12	407.81	3.63	1981.42	303.44	1.03
R-601	Pentane	72.15	469.70	3.37	1824.12	349.00	1.51
R-717	Ammonia	17.03	405.40	11.33	3730.71	1064.38	-10.48
R-718	Water	18.00	647.10	22.06	1943.17	2391.79	-17.78
R-744 <sup>a</sup>	Carbon dioxide	44.01	304.13	7.38	3643.72	167.53	-8.27
R-1270	Propene	42.08	365.57	4.66	2387.36	284.34	-1.77
	Propyne	40.06	402.38	5.63	2100.54	431.61	-1.87
	Benzene	78.11	562.05	4.89	1146.72	418.22	-0.70
	Toluene	92.14	591.75	4.13	1223.90	399.52	-0.21

É no seguimento da análise dos dados anteriores que aparece a possibilidade de utilização de um fluido de trabalho denominado por R-245fa ou HFC-245fa. Este fluido não representará a vanguarda das preocupações ambientais, no que diz respeito a GWP, no entanto é tido como amigo do ambiente e não tóxico, apresentando uma das

eficiências mais elevada segundo Lars J. Braz e William M. Bibow, 2004, autores que procederam ao estudo (tabela 10) de diversos e possíveis fluidos [4].

Tabela 10. Eficiências referentes a diferentes fluidos.

Fluido de Trabalho	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
R11	0,130	0,148	0,136	0,156	0,100	0,120	0,046	0,078
R123	0,123	0,141	0,137	0,157	0,096	0,116	0,047	0,079
R113	0,124	0,142	0,143	0,164	0,097	0,117	0,047	0,078
R114	0,107	0,124	0,126	0,147	0,086	0,105	0,046	0,076
R245fa	0,114	0,131	0,131	0,151	0,091	0,110	0,047	0,078
R236fa	0,098	0,115	0,115	0,135	0,081	0,100	0,047	0,078

Os resultados do estudo anterior são conseguidos com recurso à modelação de um ciclo orgânico de Rankine que não apresenta regeneração e tem em conta as seguintes assunções:

- Eficiência da Bomba: 40%
- Eficiência Mecânica da Turbina: 95%
- Eficiência Eléctrica do Alternador: 96%
- Perdas de Carga: 2%

Desta forma, segundo os autores, existem quatro fluidos que traduzem a sua utilização em semelhantes eficiências, contudo nem todos apresentam as melhores propriedades no que diz respeito ao ambiente, segurança e disponibilidade, pelo que no resultado final é possível verificar que no geral será o fluido R245fa a melhor opção para este tipo de aplicações [5].

Mais à frente, no presente trabalho, será descrito termo e matematicamente o comportamento do ciclo, recorrendo a uma diferente configuração onde será utilizado um regenerador, e serão testadas as diferenças no que diz respeito a eficiência quando se alteram as temperaturas das fontes.

## 4.2 - Constituição e caracterização do Ciclo

No ciclo a dimensionar será tido em conta como objectivo de recuperação uma potência térmica de 500kW, que terá como base a temperatura na fonte quente a rondar os 180°C e na fonte fria os 15°C.

Será aplicado um regenerador, com o objectivo de aproveitar a energia presente ainda no fluido aquando da saída da turbina [6]. O ciclo pretendido pode ser representado através do esquema presente na seguinte figura.

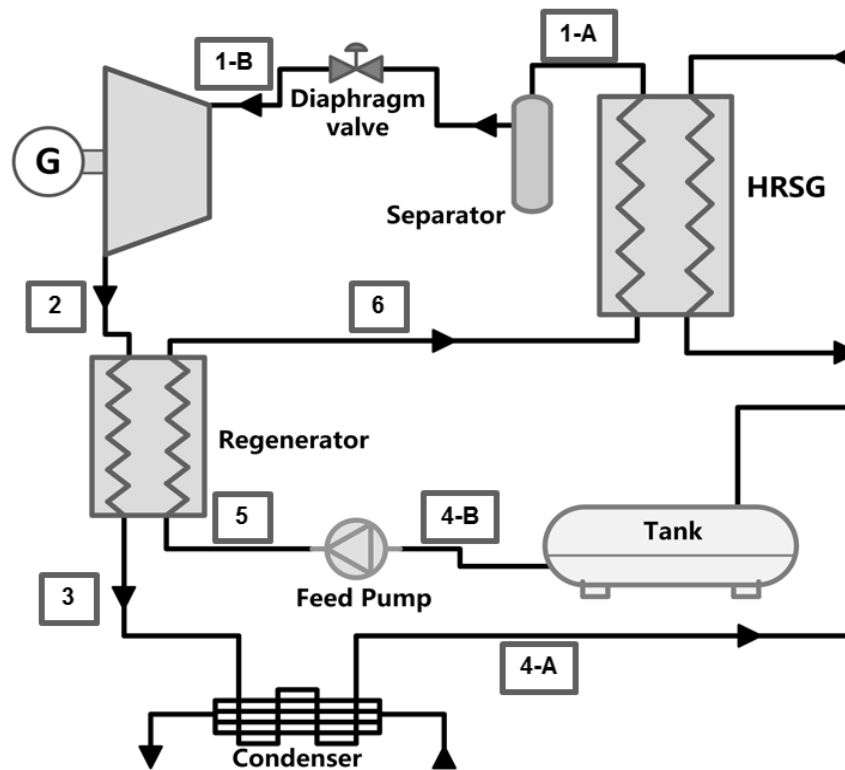


Figura 22. Caracterização de um Ciclo Orgânico de Rankine.

Tabela 11. Designação dos pontos em análise no Ciclo Orgânico de Rankine.

Ponto	Designação
1-A	Saída do Evaporador / Entrada no separador de líquido
1-B	Entrada na Turbina / Saída do separador de líquido
2	Saída da Turbina / Entrada do Regenerador (Lado Quente)
3	Saída do Regenerador (Lado Quente)
4-A	Saída do Condensador / Entrada no Tanque
4-B	Entrada na Bomba de Circulação / Saída do Tanque
5	Entrada no Regenerador (Lado Frio)
6	Entrada no Recuperador / Saída do Regenerador (Lado Frio)

Na tabela anterior está presente a descrição correspondente a cada ponto. De seguida é feita uma análise pormenorizada aos elementos do ciclo bem como ao seu comportamento termodinâmico.

### 4.2.1 - Análise Termodinâmica.

Como não poderia deixar de ser, o ciclo orgânico de Rankine apresenta em toda a sua configuração semelhanças com o ciclo que lhe deu origem, o Ciclo de Rankine, facto que pode ser observado na figura 23.

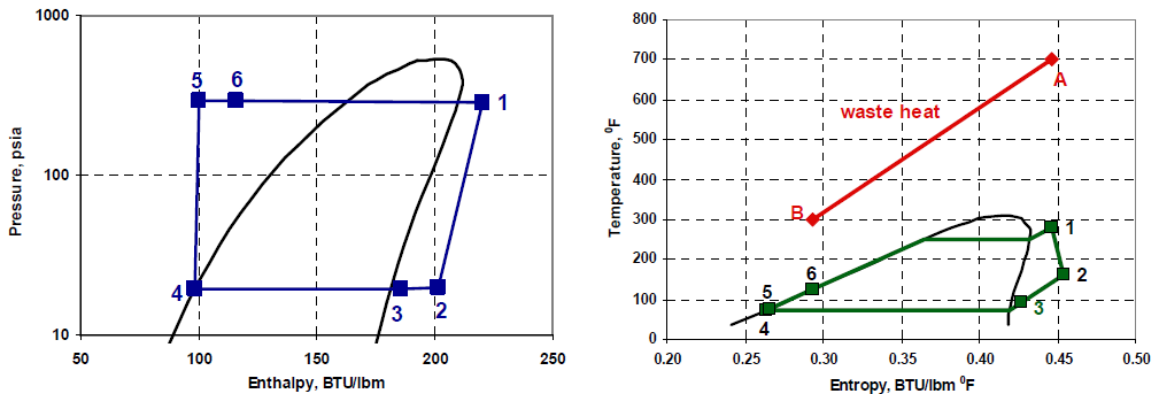


Figura 23. Evolução termodinâmica do R245 ao longo do ciclo.

Nos gráficos pode ser observada a evolução termodinâmica do fluido de trabalho [4], R245fa, ao longo do ciclo. É de seguida, neste documento, elaborada uma explicação detalhada de cada um dos pontos e componentes importantes que definem o ciclo termodinâmico.

#### 4.2.1.1 - Saída do Recuperador - Entrada na Turbina

Este será o ponto que é definido, com objectivo, o ciclo, o ponto 1 do gráfico presente na figura 23 (em cima). É neste ponto que a partir da troca de energia com um óleo térmico (fonte quente) será necessário apresentar determinadas condições para que à saída do evaporador seja possível que o R245fa se apresente no estado sobreaquecido, 180°C @ 30bar, correspondendo ao valor limite a que o fluido poderá ser aquecido e pressurizado [16]. Entre a saída do recuperador e a turbina deverá encontrar-se um separador de líquido para que se garanta a ausência de líquido na turbina [18].

Para efeitos de cálculo é considerada a mudança de estado, no evaporador (recuperador de calor), um processo isobárico, tendo consciência de que na realidade existirá um ligeiro aumento de pressão neste equipamento bem como uma queda entre o evaporador e a turbina, mais precisamente no depósito separador de líquido.

#### 4.2.1.2 - Saída da Turbina - Entrada no Regenerador (lado quente)

No processo entre o ponto 1 e 2 (turbina) a energia térmica é transformada em energia mecânica, assistimos neste ponto a uma queda de pressão e temperatura. A pressão para qual o fluido expande será ligeiramente superior à pressão de

funcionamento do condensador, uma vez que pelo meio ainda existirá o regenerador, permutador no qual o fluido irá sofrer um ligeiro arrefecimento e por sua vez perda de pressão (lado quente).

Será necessário conhecer:

- Pressão de Saída;
- Temperatura de Saída;

#### **Considerações:**

- A expansão na turbina atinge uma pressão próxima da que é possível obter no condensador em função da temperatura do fluido frio.
- A temperatura de saída da turbina num processo isentrópico deveria rondar os 82°C (+/-2). Note-se que num processo real a temperatura de saída deverá rondar os 93°C (+/-2).

#### **4.2.1.3 - Saída do Regenerador - Entrada no Condensador**

Após uma ligeira perda de carga no Regenerador, temos o fluido a entrar no condensador a uma temperatura mais baixa, perto da temperatura a que o fluido está no depósito de acumulação, pois este será o fluido frio desta permuta. A temperatura a que o fluido se encontra no depósito será conseguida em função da temperatura a que o fluido frio do condensador se encontra.

#### **Considerações:**

- A pressão de saída não se deverá afastar da pressão correspondente à temperatura do fluido de refrigeração no condensador, fácil de se conhecer uma vez que neste ponto teremos o R245fa perto do seu estado saturado, iremos considerar, como podemos ver mais à frente, 15°C.

#### **4.2.1.4 - Saída do Condensador – Entrada no depósito**

O objectivo do condensador será retirar o calor sensível de sobreaquecimento e o calor latente presente no fluido e fazer com que este passe ao seu estado de líquido saturado, para que posteriormente possa ser pressurizado pela bomba presente no ciclo.

#### **Considerações:**

- No desenvolvimento deste sistema será considerada uma temperatura de 15°C na fonte fria, correspondente à temperatura do mar, e que proporciona ao ciclo a melhor eficiência, atingindo-se sem dificuldade através de um módulo a implementar na indústria naval. A esta temperatura o fluido encontrar-se-á, idealmente, a 1bar, pressão de admissão da bomba.

#### 4.2.1.5 - Saída da Bomba - Entrada no Regenerador (lado frio)

À saída da bomba pretende-se como objectivo uma pressurização de 30bar, garantindo assim o estado de líquido comprimido no fluido. No regenerador o fluido irá recuperar parte do calor que sobra à saída da turbina, esta acção permitirá a redução da capacidade do condensador, tornando o ciclo com um rendimento superior e economicamente mais apetecível.

#### 4.2.1.6 - Saída da Regenerador (lado frio) - Entrada no Evaporador

Após aquecimento no regenerador, o fluido R245 permanecerá ainda no seu estado de líquido comprimido, no entanto registando uma acentuada subida de temperatura. No regenerador é recuperada a energia equivalente à energia cedida pelo fluido no estado de vapor previamente sobreaquecido, pois o rendimento desta permuta será bastante elevado. Será então no evaporador que o nosso fluido de trabalho irá recuperar a potência térmica dos gases de escape, até então dissipado.

### 4.2.2 - Considerações de Projecto

Como já foi referido, o objectivo inicial no desenvolvimento deste módulo será atingir a produção de energia eléctrica, cujo valor nominal rondasse os 100kW de potência. É então com base nesse valor que são assumidos alguns parâmetros, temperatura e pressão, destinados a garantir para que se atinja 100kW.

Em suma, para o dimensionamento dos componentes do módulo COR, nomeadamente dos permutadores, depósito de líquido, selecção da turbina, etc., tendo em conta o comportamento detalhado nas alíneas anteriores, será considerada a evolução presente no gráfico, conseguida com a representação do ciclo no diagrama Ph e TS, demonstrada no capítulo 6, obedecendo às leis da termodinâmica que o precedem.

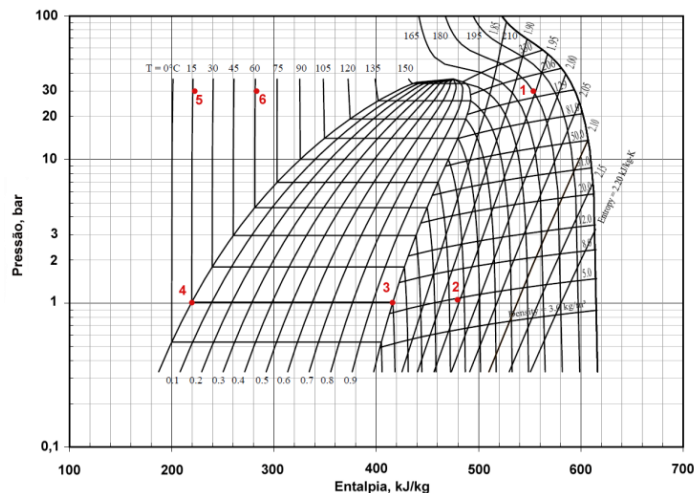


Gráfico 1. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama Ph, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina.

## 4.3 - Turbina

A Turbina é, como será fácil de perceber, o coração de um sistema COR, pelo que é onde se nota a maior atenção de quem desenvolve este tipo de equipamentos. É devido a este facto que a turbina surge como um dos componentes onde reside a maior dificuldade de encontrar informação descritiva.

Estudos sugerem que para este tipo de aplicação, onde as potências envolvidas são menores e as pressões mais baixas, equipamentos de expansão volumétrica são os mais indicados. Deve-se isto ao facto de que este tipo de equipamentos revela menor número de partes móveis, pelo que serão mais fiáveis e apresentam rendimentos isentrópicos mais elevados. Neste caso específico é sugerida a aplicação de turbina uma vez que é o tipo de expansor aplicado na gama de pressões que iremos ter em conta (baixas pressões na ordem dos 35bar). Por sua vez a expansão com recurso a êmbolo seria aplicável se estivessemos a abordar maiores pressões, na ordem dos 100bar.

No módulo COR, a ser desenvolvido na empresa TecnoVeritas, onde o autor é parte integrante no projecto, é tido como objectivo a montagem de uma turbina existente no mercado, de fabrico já massificado, devendo, deste modo, ser possível conseguir-se uma redução tanto nos custos de desenvolvimento como nos custos de produção do módulo, tornando-o assim mais competitivo.

A turbina seleccionada para o caso de estudo será então seleccionada de entre as turbinas que equipam determinados turbocompressores no mercado.



Figura 24. Turbocompressor marítimo MAN.



Figura 25. Turbocompressor marítimo Mitsubishi.

Por certo, a opção tomada poderá vir a prejudicar aquela que seria a eficiência óptima de aproveitamento da energia contida no fluido de trabalho, contudo é uma opção válida quando se aborda o assunto da recuperação do investimento, tomando menor o seu o tempo de retorno.

Durante o desenvolvimento do projecto, nomeadamente na procura de uma turbina cujo regime de funcionamento fosse ao encontro do pretendido, a TecnoVeritas adquiriu um turbo compressor no qual se encontra montada uma turbina com as seguintes características:

- Tipo: KKK
- Potência de Projecto: 150kW
- Regime de Rotação: 20000 RPM

Note-se que a potência de projecto da turbina é superior ao pretendido, o que dará alguma margem para trabalhar com as ineficiências potencialmente envolvidas.



Figura 26. Turbina seleccionada para o módulo.

É de total importância que o leitor tenha noção de que o fluido de trabalho tido em conta no projecto da turbina, nada tem a ver com fluido térmico utilizado no módulo COR, pois estamos a falar de gases de escape, cujas propriedades são muito idênticas às do ar.

#### 4.3.1 - Considerações Mecânicas e Estruturais

Uma vez que o fluido de trabalho a utilizar não será o fluido de projecto é importante ter em atenção o que pode essa diferença originar, nomeadamente ao nível mecânico e estrutural [17].

No dimensionamento ou projecto de uma turbina é constante a influência que os aspectos mecânicos têm sobre os aspectos aerodinâmicos, ou seja, qualquer que sejam os aspectos levados num projecto para uma turbina altamente eficiente, estes terão de ser simultaneamente verificados a nível estrutural para que se garanta um tempo de vida adequado e uma integridade estrutural aceitável. Mesmo a nível preliminar, num projecto, deve ter-se em conta aspectos iniciais no que diz respeito às tensões (*stress*) admissíveis nas pás que irão constituir a turbina. Para que isto seja levado em consideração é necessário ter noção dos tipos de tensões a que uma pá está sujeita, devendo ser feita a distinção entre tensões estáveis e instáveis (*steady* e *unsteady state*). As principais fontes de tensão estáveis numa pá são:

- Força centrífuga;
- A pressão aplicada;

- Condições térmicas a que estará submetida.

A tensão centrífuga ocorre em virtude da velocidade de rotação, as tensões devido a pressões serão, logicamente, causadas pela diferença de pressão entre a admissão e escape da turbina, sendo a principal causa de dobragem de uma pá de uma turbina. A tensão térmica terá origem nas diferenças de temperatura das diferentes partes da turbina, as pás e o disco. As tensões instáveis aparecem devido à interacção da acção da rotação com as características estacionárias na vizinhança da pá, sendo que o foco principal desta tensão ocorrerá nas arestas a montante e a jusante da pá, ou seja, no bordo de ataque e bordo de fuga da pá, pois à medida que a pá roda esta é submetida a um campo de pressões instáveis, gerando então tensões instáveis.

A noção da diferença entre os tipos de tensões é importante, num projecto que envolve selecção de turbinas, devido ao facto de que determinadas falhas lhes estão associadas, sendo que, por exemplo, a tensão estável poderá originar a falha progressiva, levando à perda de rendimento, através da fluência da pá acabando na deformação plástica. As tensões instáveis, por sua vez, já darão origem à falha da pá através de fadiga devido ao aparecimento de fissuras e proliferação das mesmas. No presente trabalho é tida especial atenção no que diz respeito às tensões estáveis que a turbina seleccionada irá suportar e à consequente resistência à fluência, sendo que a fluência traduz a deformação permanente de um material quando é sujeito a uma determinada carga constante ao longo do tempo. Tendo em conta a fluência do material, existem então quatro fases de deformação na vida de uma pá:

1. Extensão inicial instantânea;
2. Estágio onde a taxa de fluência vai decrescendo até atingir a próxima fase.
3. Estágio onde a fluência ocorre a uma taxa constante.
4. Estágio onde a taxa de fluência acelera até acontecer a fractura.

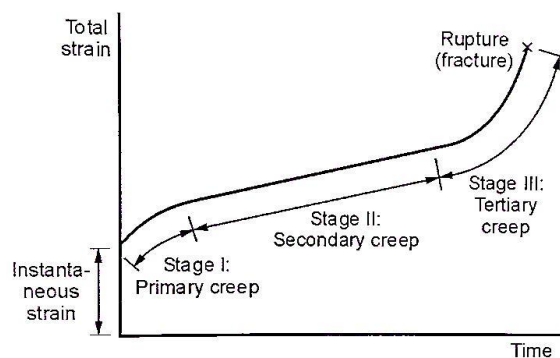


Gráfico 2. Evolução gráfica dos estágios de fluência que turbina está sujeita no seu período de vida, Hany Moustapha, Mark F. Zelesky, Nicholas C. Baines, David Japikse, “Axial and Radial Turbines”, 2003.

Posto isto, é importante ter atenção para que o estágio de laboração em que a turbina irá residir não se situe na quarta fase, quando trabalhar com o novo fluido. Para esta análise, pode ser seguido o mesmo princípio que o utilizado aquando do projecto da turbina, na análise por métodos finitos, em que se consideram as tensões originadas pela diferença de pressões e temperaturas mínimas quando comparadas com as tensões originadas pela força centrífuga, ou seja, de uma forma simples podemos considerar que pressões e temperatura não influenciam significativamente as análises iniciais, que permitirão garantir que o *design* da turbina não irá resultar na presença de tensões que serão superiores ao que o material suporta. É então possível com uma verificação simples controlar minimamente os valores de tensão a que a turbina estará sujeita e garantir assim que a escolha da turbina em questão não será comprometida.

Posto isto, podemos através de uma simples equação (Marscher 1992) verificar a tensão aplicada, devido à força centrífuga, num rotor de uma turbina radial.

$$\sigma = K\rho U_4^2$$

Em que  $\rho$  é a densidade do material,  $U$  é a velocidade periférica do topo da pá e  $K$  é uma constante que relaciona as tensões associadas à geometria da pá, situando-se este valor entre 0,2 e 0,4.

Observando a anterior equação podemos concluir que na alteração do fluido de trabalho deve ser tido em especial atenção o resultado que esta mudança implica na velocidade de rotação periférica da pá,  $U$ , uma vez que o  $K$  e a densidade do material não se alteram.

$$U \uparrow \leftrightarrow \sigma \uparrow \uparrow \quad \text{ou} \quad U \downarrow \leftrightarrow \sigma \downarrow \downarrow$$

Esta velocidade de rotação está por sua vez directamente relacionada com a massa de fluido que é turbinada e pela diferença de pressões existentes, pelo que será neste ponto que deve residir a maior atenção para que não se altere significativamente a tensão centrífuga.

Na tabela seguinte será possível comparar as propriedades dos dois fluidos nas condições de trabalho a que cada fluido sujeitaria a turbina.

Tabela 12. Comparação entre fluidos de trabalho na turbina.

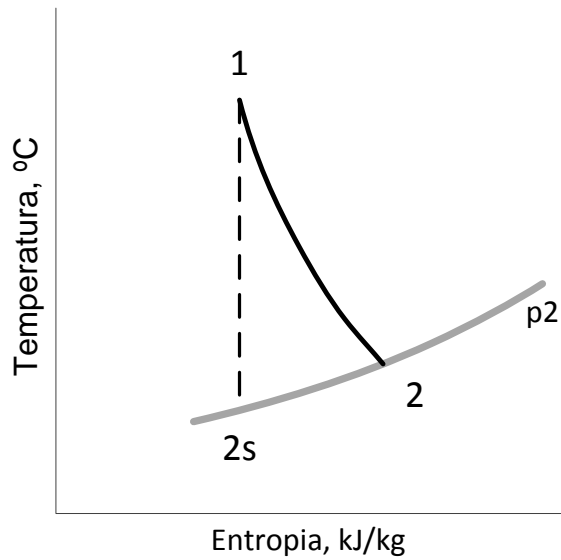
	<b>R245fa</b>	Gases de Escape Caso 1	Gases de Escape Caso 2
Temperatura de Entrada	180°C	400°C	300°C
Pressão de Entrada	30bar	40bar	20bar
Pressão de Saída	1bar	2bar*	2bar*
Densidade	1,07kg/m <sup>3</sup>	2,59kg/m <sup>3</sup>	1,83kg/m <sup>3</sup>
Caudal Mássico	1,8kg/s	3,5kg/s	2,0kg/s

*Nota: a pressão de saída nos casos 1 e 2 varia significativamente com a existência de caldeiras recuperativas a jusante da turbina.*

Na tabela anterior pode observar-se duas definições distintas para as propriedades de gases de escape, em virtude de se desconhecer o regime a que a turbina estaria sujeita quando instalada num motor. Posto isto, o autor optou por comparar as condições conhecidas a que o fluido R245fa irá ser turbinado com limites conhecidos de funcionamento da turbina estaria quando instalada num motor. Observando a tabela 12, concluímos que comparando com as condições, tanto no caso 1 como no 2, as novas condições de trabalho da turbina não serão de todo preocupantes no que toca à tensão originada nas pás, tendo ainda alguma margem para variar a velocidade de rotação aquando da selecção e aplicação de um determinado gerador.

#### 4.3.2 - Evolução não isentrópica

Num ciclo ideal seria considerado um rendimento de 100% da acção do fluido na turbina, uma evolução isentrópica, em que a recta de expansão do vapor é completamente vertical. Contudo este facto não acontece na realidade existindo perdas, justificadas pelo facto de que o fluido não consegue transferir para a turbina toda a energia que seria idealmente transferida ( $h_1-h_{2s}$ ), transferindo um valor de energia real ( $h_1-h_2$ ). Desta forma o fluido irá sair da turbina contendo uma energia residual superior à que deveria ter, a uma mesma pressão, conceito que se pode apreender com a observação do gráfico 2.



$$\text{Rendimento da Turbina} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Gráfico 3. Representação do rendimento isentrópico da turbina.

Nas considerações para cálculo de um caso prático, será considerado uma eficiência da turbina próxima dos 80%, valor que é bastante inferior aos valores que verificados na realidade, no entanto esta será a forma de garantir que não é inflacionado o valor de produção do módulo.

## 4.4 - Permutadores

Nos dias de hoje são na indústria utilizados de forma mais comum dois tipos de permutadores, os tubulares e os de placas.

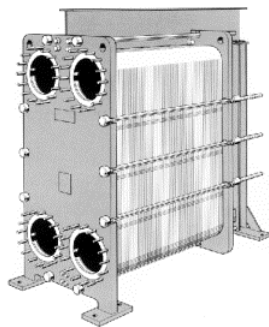


Figura 27. Permutadores de placas.



Figura 28. Permutador tubular.

Os permutadores de placas são na sua grande maioria bastante eficientes apresentando um rendimento térmico elevado, podendo mesmo a diferença entre fluidos chegar a apenas 1°C, contudo em aplicações onde seja fundamental minimizar a perda de carga este tipo de permutadores perde vantagem, o que acontece no caso do ciclo COR. Associando o facto anterior ao facto de que os permutadores de placas não são aconselhados para situações em que algum dos fluidos sofra mudança de fase torna a sua utilização pouco válida. Então, tendo a interior informação em conta são seleccionados para este sistema, três permutadores de calor do tipo tubular.

No desenvolvimento deste módulo será tido em conta as seguintes condições de permuta:

Tabela 13. Caracterização de permutadores para o módulo de 100kW.

	<b>Evaporador</b>	<b>Regenerador</b>	<b>Condensador</b>
Potência Trocada	451,4kW	145,9kW	352,8kW
Fluido Quente	Therminol	R245fa (Sobreaquecido)	R245fa
Fluido Frio	R245fa	R245fa (Subarrefecido)	Água
Temperatura de entrada Fluido Quente	350°C*	102°C	15°C
Temperatura de entrada Fluido Frio	74°C	15°C	15°C

Nota: \*Temperatura máxima dos gases presentes na chaminé.

Para a construção dos permutadores, tal como para todo o resto dos equipamentos, é necessário ter em conta as compatibilidades que o fluido apresenta em matérias de corrosão e durabilidade de ambos. Segundo o fornecedor do fluido R245fa, este é um fluido compatível com uma vasta gama de metais, entre eles o aço, o alumínio, o cobre e o aço inoxidável, contudo também alguns elastómeros foram testados apresentando uma compatibilidade satisfatória.

Considerando como válida a informação do fornecedor, a construção dos permutadores terá como base o aço e o cobre. O aço para os corpos tubulares exteriores, sendo que o cobre será destinado aos tubos interiores para incremento da transferência de calor.

## 4.5 - Geração de Energia Eléctrica

Neste capítulo será descrito a forma como a energia deverá ser convertida da sua forma mecânica para a sua forma eléctrica. São diversos os componentes que garantem que a energia será de qualidade e própria de ser utilizada sem que ocorram grandes oscilações na sua frequência. É importante salientar o facto de que a turbina não rodará constantemente a uma velocidade definida, uma vez que esta velocidade de rotação dependerá das condições a que o fluido se encontra pelo que estas não serão, por regra, contínuas. É então devido a este facto que deverá ser considerada uma forma de rectificação para que a corrente apresente qualidade suficiente e para que a energia possa ser consumida pelos demais equipamentos presentes no navio, especialmente pelo electrolisador, equipamento que será visto como prioritário no que diz respeito ao consumo da energia produzida através do módulo COR.

### 4.5.1 - Gerador

Na selecção do gerador será necessário ter em conta alguns aspectos importantes:

- Velocidade de Rotação
- Potência Máxima Produzida
- Binário
- Sincronismo
- Número de Polos
- Dimensões

Para análise dos pontos anteriormente mencionados deve-se ter então noção do princípio de funcionamento do gerador ou, neste caso, alternador, uma vez que será tido como objectivo a geração de corrente alternada.

É conhecida a relação entre a frequência da tensão produzida e a velocidade de rotação do rotor.

$$f = P \cdot n$$

A frequência será o produto entre o número de pares de polos,  $P$ , e o número de rotações por minuto. Uma vez que os pares de polos serão constantes fácil será concluir que a frequência irá depender da velocidade de rotação da própria turbina.

O rendimento será também muito importante, sendo que este será tanto maior quanto maior a potência do motor ou gerador. O valor de rendimento para um gerador de 100kW ronda actualmente os 95%.

Um outro factor com bastante importância na selecção do alternador será o binário resistente a que este estará sujeito, uma vez que para atingir uma dada potencia necessitará tanto menos binário quanto maior for a rotação, sendo que este binário será traduzido recorrendo à seguinte expressão:

$$T = \frac{P}{n} \cdot 9550$$

No módulo a desenvolver, como já foi referido, o objectivo será alcançar os 100kW, pelo que, com uma margem de segurança, deverá ser seleccionado um gerador cujo rotor apresente um binário resistente apropriado. Contudo, e devido a algum grau de incerteza quanto ao comportamento da turbina e tratando-se de um protótipo, deve ter-se em atenção o facto de que o gerador escolhido deverá trabalhar numa elevada gama de rotações, mais uma vez com consciência que será um procedimento que prejudicará a eficiência. Então para a referida situação teremos:

Tabela 14. Relação de potência e rotação em função do binário.

Potência RPM	80	100	120	150
10000	76,4	95,5	114,6	143,3
15000	50,9	63,7	76,4	95,5
20000	38,2	47,8	57,3	71,6
25000	30,6	38,2	45,8	57,3
30000	25,5	31,8	38,2	47,8

A observação da tabela anterior possibilita uma maior noção sobre o valor do binário resistente que o gerador seleccionado deverá apresentar para a gama de funcionamento esperado para a turbina, pois, de uma forma consciente, possibilita-nos a selecção de um gerador que permita jogar com o regime de rotação da turbina, que como sabemos poderá variar ligeiramente. Posto isto, a tabela anterior diz-nos que o valor de binário deverá situar-se entre os 45N.m e 55N.m, então no gráfico seguinte é possível a verificação da potência conseguida com a variação do binário dentre deste intervalo.

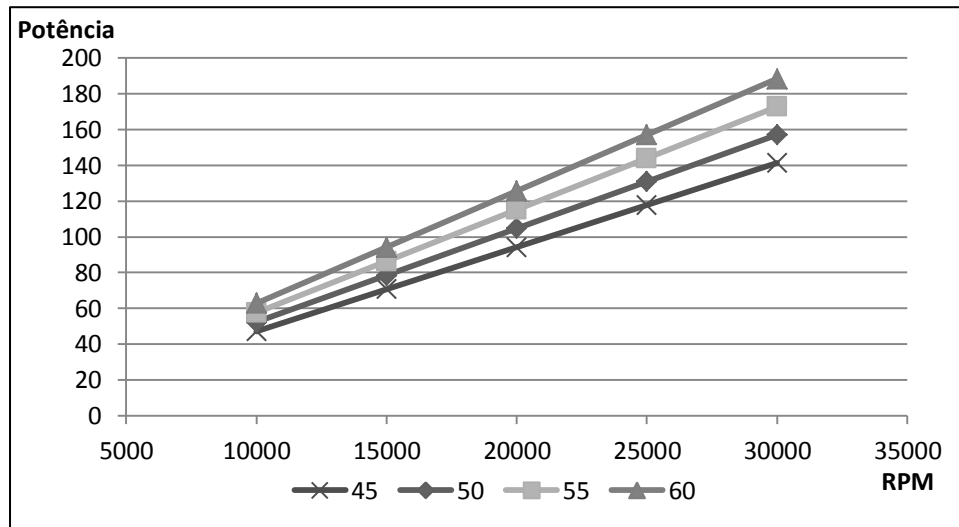


Gráfico 4. Potência e rotação em função do binário resistente seleccionado.

Com todas as considerações feitas anteriormente, é essencial que sejam dadas algumas seguranças, fundamentalmente na escolha do binário, pois será uma característica que influencia a potência produzida em última instância, ou seja, desconhecendo a eficiência de trabalho do novo fluido de trabalho na turbina, é importante que se dê uma ligeira tolerância reduzindo o valor de binário para que a resistência ao movimento da turbina não se faça sentir de tal forma que posteriormente seja necessário o aumento de caudal, originando tensões prejudiciais nas pás da turbina. Olhando para o gráfico é sugerida a selecção de um gerador com um binário que ronde os 45N.m, pois à velocidade de rotação de projecto da turbina (20.000rpm) temos uma produção de 94kW.

Tabela 15. Potência em função da rotação para um determinado binário.

Binário	RPM:	10000	15000	20000	25000	30000
45N.m	Potência (kW):	47	71	94	118	141

É então preferível seleccionar um gerador com um binário resistente baixo e caso seja necessário aumentar posteriormente o caudal de fluido de trabalho para aumentar a potência do que a exigência de um caudal maior para que seja simplesmente possível rodar a turbina sujeitando todo o conjunto a tensões desnecessárias.

Concluído, o gerador de 100kW seleccionado, apresentará uma eficiência que rondará os 95%.

#### 4.5.2 - Regulação da corrente produzida

Para que se consiga utilizar a energia produzida no módulo COR, esta deve obedecer a determinados parâmetros de qualidade, esta qualidade garantirá a capacidade de consumo e preservação dos equipamentos consumidores. Devendo-se então prestar atenção às seguintes propriedades da energia produzida [21]:

- Frequência;
- Tensão;
- Harmónicas.

Como já foi referido, o regime de rotação do rotor não será constante, variando em larga escala de acordo com a disponibilidade energética presente no fluido de trabalho do módulo, pelo que será necessário a montagem de um dispositivo que nos garanta uma corrente com determinada frequência, 50/60Hz, e uma tensão de 400V.

Para atingir estes objectivos a solução à vista será o recurso a conversores electrónicos de potência, que quando comparados com conversores electromecânicos apresentam as seguintes vantagens:

- Perdas bastante menores;
- Consumo significativamente menor;
- Quase ausência de manutenção;
- Dimensões reduzidas;
- Custo de montagem;

E principalmente:

- Maior facilidade de controlo quanto à tensão e frequência de saída.

Estes tipos de conversores electrónicos apresentam na sua construção díodos, transístores e tirístores, sendo que a sua aplicabilidade irá variar com o tipo de controlo e potência pretendida.

Os díodos são, principalmente, utilizados na rectificação de corrente quando o objectivo se trata, por exemplo, da geração de corrente alternada e esta será armazenada numa bateria, recorrendo a uma ponte rectificadora de onda completa teremos o seguinte esquema:

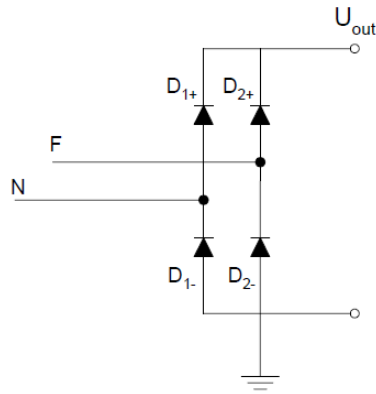


Figura 29. Ponte rectificadora de onda completa.

O esquema anterior é a representação de uma ponte rectificadora de onda completa, utilizada para conversão da corrente alternada em corrente contínua. O mesmo princípio será utilizado no módulo COR a ser desenvolvido. No desenvolvimento deste rectificador é importante que o leitor tenha noção de que o esquema anteriormente montado traduz um rectificador não controlado, e que tanto um transístor como um tirístor poderiam ser aqui aplicados proporcionando uma rectificação totalmente controlada. O controlo nesta operação é importante se por algum motivo existir a necessidade de controlar a potência do sinal rectificado, o que não é o caso. A forma da tensão à entrada e saída da ponte de rectificação pode ser observada na imagem em baixo.

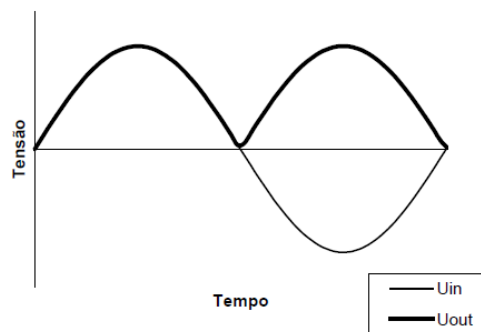


Figura 30. Formas de tensão de entrada e saída.

Uma vez conseguida a rectificação de onda, AC-DC, é posteriormente necessário o incremento da qualidade da energia recorrendo-se a um filtro capacitivo ou, na prática, um condensador.

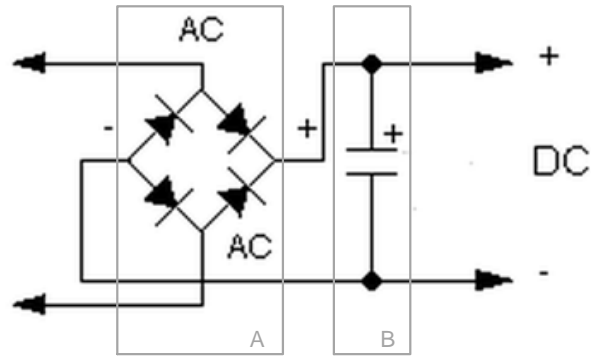


Figura 31. A – Ponte Rectificadora; B – Filtro Capacitivo.

Neste ponto existe então, de uma forma controlada, uma fonte de corrente contínua, sendo agora possível a aplicação de um sistema que possibilita a criação de uma fonte de corrente alternada com valores de frequência e tensão variável. Na construção deste sistema de conversão será baseada na utilização de díodos e transístores, sendo que este inversor será classificado como de modelação de largura de Impulsos (MLI ou PWM) e terá como base IGBTs, “*Insulated Gate Bipolar Transistor*”.

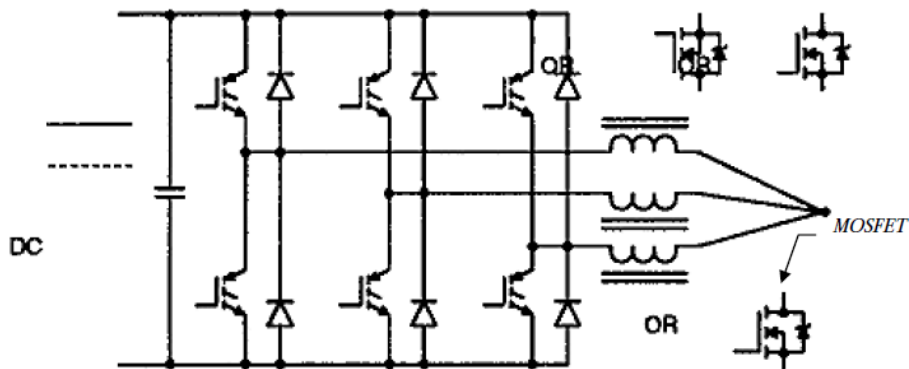


Figura 32. Inversor trifásico baseado em IGBTs.

O modelo anterior possibilitará a geração de impulsos, modelados de acordo com o objectivos que irão permitir gerar uma sinusóide com a tensão e frequência necessária. Não sendo o objecto primordial deste trabalho, o autor optou por reduzir a explicação do funcionamento deste aplicativo focando a semelhança a um gerador de impulsos de alta frequência, que origina um determinado número de ondas quadradas que somadas à sinusóide fundamental, originará uma sinusóide praticamente perfeita, com frequência e tensão pretendida. A observação da figura 33, ajudará o leitor a perceber a forma como é traduzida a geração modulada de pulsos.

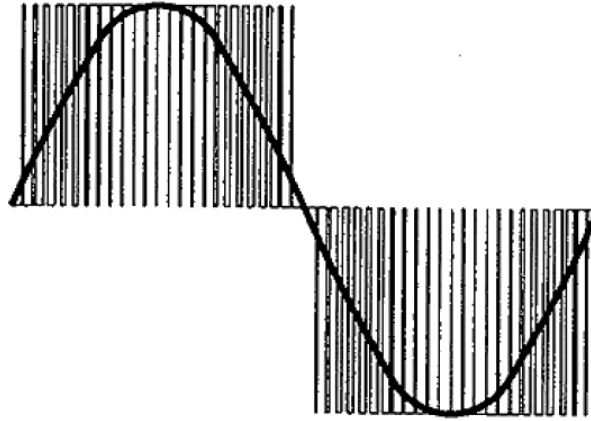


Figura 33. Forma de um sinal com modulação de largura de impulsos (PWM).

Agregando os anteriores componentes é obtido o seguinte esquema:

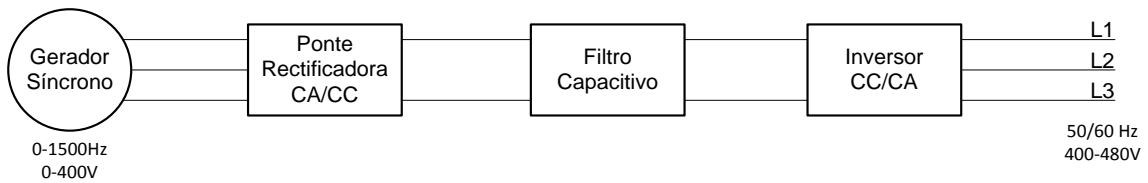


Figura 34. Desenho esquemático de um regulador AC-DC-AC.

Desta forma teremos então uma corrente limpa e com qualidade para ser utilizada a bordo do navio, com as características pretendidas.

## Capítulo 5

# 5 - Hidrogénio, aplicabilidade.

### 5.1 - Associar o Hidrogénio.

Como referido anteriormente, o Hidrogénio é o elemento mais comum no cosmos, sendo este uma fonte de energia com um poder calorífico significativo, aparece então um vasto leque de vantagens em explorar as mais diversas formas de o obter, uma vez que não existe na sua forma elementar. Após uma cuidadosa análise dos diferentes processos de obtenção de Hidrogénio, considerando a tremenda energia térmica que é dissipada para atmosfera e a infinita abundância de água, torna-se simples concluir que a electrólise é o melhor dos processos de obtenção para se aplicar num sistema como um navio.

#### 5.1.1 - Caracterização do Hidrogénio

É objecto de estudo no presente trabalho a utilização de hidrogénio em substituição de um combustível do tipo hidrocarboneto, como fuelóleo pesado e Diesel óleo marítimo. Para que essa substituição seja consciente é necessário que exista uma completa noção no que diz respeito às propriedades termodinâmicas de cada fluido em questão.

Uma das propriedades termodinâmicas mais importante a serem identificadas será o poder calorífico inferior de cada um dos combustíveis, pelo que teremos:

Tabela 16. Propriedades dos combustíveis: Diesel, HFO e Hidrogénio.

<b>Combustível</b>	<b>Poder calorífico inferior (PCI)</b>	<b>Densidade</b>
Diesel Óleo Marítimo	42000kJ/kg	850,0kg/m <sup>3</sup>
Fuelóleo Pesado	40500kJ/kg	965,0kg/m <sup>3</sup>
Hidrogénio	120000kJ/kg	0,089kg/m <sup>3</sup>

Nota: Os valores de PCI e densidade para os combustíveis com origem fóssil foram estimados de acordo com os valores aferidos em vários certificados de qualidade de combustível, variando ligeiramente de combustível para combustível. Já o valor de PCI e densidade para o hidrogénio é aferido após intensa pesquisa, sendo o valor indicado semelhante nas várias fontes às mesmas condições de 25°C e 1atm.

Com a observação da tabela anterior é fácil concluir que com uma quantidade mássica inferior de hidrogénio conseguiremos atingir a mesma energia consumida, no entanto, devido à reduzida densidade do Hidrogénio, maior capacidade volumétrica na injeção será necessária, tal como no armazenamento.

## 5.2 - Produção de Hidrogénio

Como já foi descrito anteriormente neste documento, existem várias formas de obtenção de hidrogénio, sendo que hoje em dia o custo do hidrogénio obtido através de electrólise é superior ao do hidrogénio obtido com origem na reformulação de combustíveis fósseis, nomeadamente do gás natural, contudo para a aplicação naval estudada neste documento será por intermédio de electrólise que se revelam as maiores vantagens, uma vez que a fonte de energia para este processo é até então dissipada. O facto de que o hidrogénio de origem electrolítica revela uma pureza mais elevada é também uma vantagem devido ao objectivo de injeção nos motores geradores e caldeira presentes no navio.

### 5.2.1 - Electrólise

Na verdade a electrólise não é apenas o processo simples de separação de água ( $H_2O$ ) mas sim de uma solução aquosa de potássio ou soda cáustica [20]. A junção destes elementos à água a electrolisar servirá para aumentar a condutividade da água. Normalmente as maiores condutividades são observadas em soluções com 20% de potássio cáustico e 28% de soda cáustica. Estes produtos electrolíticos são também úteis para aumentar a pureza do produto resultante e é importante que, embora também apresentem resultados, cloretos e sulfatos não devem ser utilizados como electrolíticos devido à sua elevada capacidade de corrosão nos eléctrodos, principalmente os ânodos.

A electrólise consiste então na separação dos protões e electrões de um átomo ou molécula, sendo que os protões de um átomo são os seus constituintes positivamente carregados e os electrões os negativamente carregados, por intermédio da aplicação de uma determinada corrente contínua. As altas temperaturas ocorridas com a aplicação da corrente irão fazer com que a separação da molécula da água ocorra, sendo que o elemento cátodo do electrolisador atrairá o Hidrogénio (protão) e o ânodo atrairá o Oxigénio (electrão), como pode ser melhor entendido observando a figura a baixo.

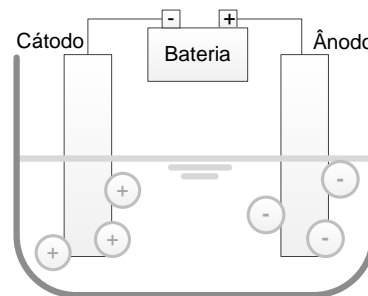


Figura 35. Explicação esquemática de um electrolisador.

Contudo é importante ter-se a noção que num recipiente do género do da figura será de todo impossível separar o hidrogénio e o oxigénio, formando um composto gasoso designado por HHO, não o dito hidrogénio livre. Este será o gás mais acessível de se retirar da electrólise da água, no entanto não o mais seguro, pois como é do conhecimento geral, para termos combustão são necessárias os 3 elementos, combustível, comburente e fonte de calor, pelo que recorrendo ao HHO apenas ficará a faltar a fonte de calor, revelando assim um elevado nível de perigo. Juntando ainda o facto de que o objectivo deste combustível pretendido, o hidrogénio, será a injeção numa máquina térmica, essa fonte de calor será fácil de encontrar, aumentando ainda mais o nível de perigo.

Com o recurso ao HHO também o controlo e eficiência da combustão na câmara de combustão de um motor fica limitado, pois durante a injeção parte deste gás poderá inflamar-se quando em contacto com resíduos térmicos de ciclos anteriores, por exemplo carvões incandescentes, ficando assim difícil controlar a frente de chama na explosão diminuindo o trabalho que esta deveria produzir e por sua vez a eficiência que se deveria alcançar é dissipada.

### 5.2.2 - Caracterização do Electrolisador

Para que a separação aconteça e se consiga a molécula de hidrogénio, deve ter-se em atenção aspectos construtivos do electrolisador e chegar aquilo que é designada com uma célula electrolítica bipolar. Essa construção é demonstrada de uma forma esquemática na imagem seguinte.

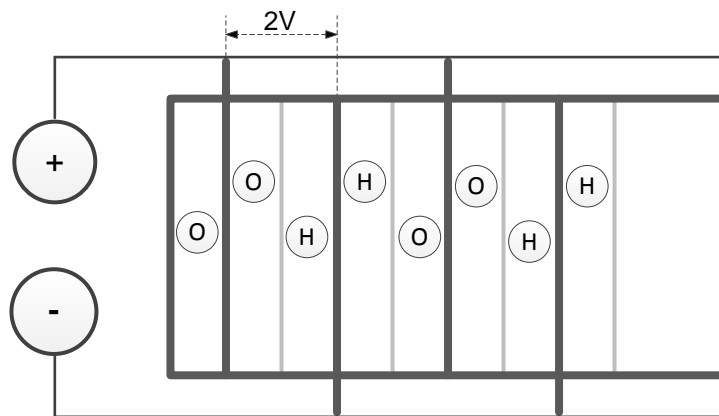


Figura 36. Construção de uma célula bipolar de electrólise

Este tipo de electrolisador separa individualmente os eléctrodos por placas isoladoras, o diafragma, pelo que um lado de cada câmara será o cátodo e o outro lado será o ânodo da célula adjacente, será então uma construção traduzida por camadas alternadas entre diafragmas e eléctrodos. Desta forma é possível obter-se tanto o hidrogénio como o oxigénio separados, podendo-se aplicar cada um para fins distintos e aplicações correctas.

Na figura 36 é possível perceber-se também que um electrolisador irá necessitar de tanta tensão como duas vezes o número de pares de eléctrodos que apresente.

$$\text{Tensão de Alimentação da Célula} = 2V \times \text{Número de Pares de Electrodo}$$

Hoje em dia, no mercado, segundo pesquisa, existem electrolisadores do tipo bipolar que obedecem à curva demonstrada no gráfico 5.



Gráfico 5. Produção de hidrogénio em função da potência seleccionada.

Nota: Volume de produção é obtido às condições de pressão e temperatura de 1atm e 0°C, respectivamente.

A curva que demonstra a potência necessária em função da produção do electrolisador servirá, mais à frente neste documento, para que se possa com consciência seleccionar o correspondente sistema à melhor gestão a bordo.

Tendo em conta a densidade do hidrogénio, verificada na alínea 4.1.1, poderemos desde já antever que para 82kW teremos uma capacidade de produção mássica que rondará os 1,23kg/h, o equivalente a uma potência de 46kW, traduzindo a já referida falta de eficiência nos geradores de hoje em dia. Estes 82kW será a potência do electrolisador de mercado com a gama de funcionamento mais perto do pretendido.

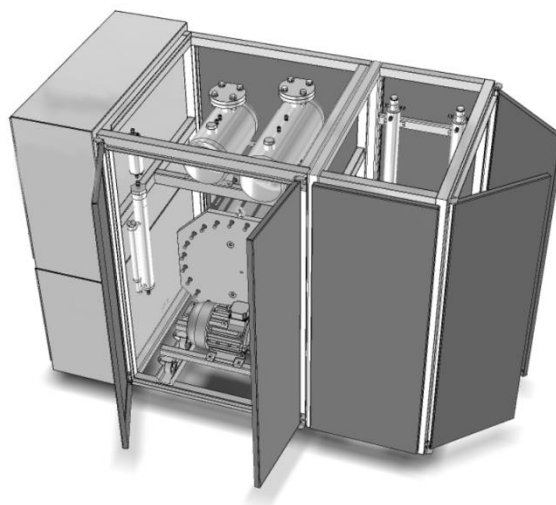


Figura 37. Representação de um electrolisador disponível no mercado.

## 5.3 - Armazenamento de Hidrogénio

O armazenamento de hidrogénio é notoriamente um dos tópicos mais importantes quando se aborda o assunto hidrogénio, preocupação justificada pelo aspecto de segurança que este envolve, principalmente por se tratar de um sistema destinado à indústria naval.

Este tema, ao longo dos anos, tem sido considerado como um problema não resolvido e vem revelando uma necessidade na criação de equipas de I&D para que esta aplicação se torne uma verdadeira solução energética.

Existem então três formas possíveis de armazenar o hidrogénio conseguido através da electrólise [11], nos estados gasoso, líquido e sólido, pelo que não existe melhor forma de armazenamento, dependendo da aplicação final do Hidrogénio. Embora os estudos e desenvolvimentos não tenham ainda satisfeito todas as exigências industriais, tecnologias de armazenamento de hidrogénio pressurizado e hidrogénio líquido têm sido usados por décadas em instalações industriais. Uma das causas para que o armazenamento de hidrogénio seja considerado pouco maduro deve-se ao facto de que, embora recentes pesquisas o tenham melhorado, os cilindros de armazenamento continuam muito volumosos e pesados, sendo que os melhoramentos conseguidos vieram reduzir estas condições não pondo em causa a segurança.

Um dos desafios do presente, nesta matéria de hidrogénio e sua utilização, é conseguir que se olhe para o hidrogénio como uma fonte de alta densidade energética de reduzido volume, sendo que é aqui que a tecnologia de armazenamento deve contribuir e ser aprimorada, objectivando o desenvolvimento de um meio de armazenamento que permita uma determinada quantidade de hidrogénio num reduzido espaço que permita uma taxa de utilização suficiente para fornecer energia para uma aplicação particular. Por exemplo, em aplicações móveis, por exemplo num navio, é necessário que se consiga a entrega de energia para o sistema consumidor (máquina principal, gerador ou caldeira) suficiente para uma determinada potência em toda a sua gama de variação.

Um dos outros pontos importantes para um armazenamento eficiente será a taxa a que o hidrogénio é transferido para o armazenamento, ou seja, o reabastecimento tem de ser conseguido e gerido, neste caso, de acordo com a taxa de produção [15].

Em suma poderemos resumir os objectivos de um sistema de armazenamento nos seguintes pontos:

- Aplicabilidade:
  - Armazenamento Conveniente;
  - Alta capacidade energética;
  - Alta capacidade de entrega (cinética);
  - Integridade do meio e componentes de armazenamento;
  - Operacionalidade simples
  - Segurança no armazenamento (baixas pressões, baixos focos de incêndio e baixa toxicidade);
- Baixo Custo:
  - Materiais de fabrico (comuns e disponíveis)
  - Baixo custo de manutenção e custos de operação.
- Alta fiabilidade:
  - Repetibilidade da performance;
  - Ciclo de vida considerável;
  - Boa integridade de materiais;
  - Baixa taxa de deterioração;
  - Resistência a contaminações;

A combinação dos factos de que tanto a produção como a utilização do hidrogénio a bordo será feita na forma gasosa vem sugerir de que a será esta a fase mais conveniente para que o elemento seja armazenado e transportado a bordo dos navios, contudo, como já foi referido, não é a solução que permite o armazenamento num menor espaço, necessitando também de alguma energia para pressurização do gás e alta eficiência no isolamento devido ao tamanho da molécula do hidrogénio, referencialmente estima-se que para a compressão do gás se utilize o equivalente a 5% da energia presente no hidrogénio. As vantagens principais de se armazenar o hidrogénio como gás comprimido serão a simplicidade e a inexistência de perdas energéticas com o passar do tempo, contudo é o método que implica maiores cuidados com a segurança uma vez que se estará a lidar com pressões entre 200 e 250bar em aplicações de pequena escala e entre 500 e 600bar para aplicações a uma maior escala. Este processo de armazenamento apresenta uma densidade de armazenamento de 6 a 10% (*wt. %H*).

$$wt. \%H = \frac{H}{M + H} \cdot 100$$

A densidade de armazenamento é calculada tendo em conta a capacidade de armazenamento e o peso do metal hidreto.

A dificuldade de espaço a bordo vem sugerir a hipótese de armazenamento em fase líquida, permitindo reduzir significativamente o volume ocupado para a mesma quantidade de hidrogénio, ou seja aumentando a densidade energética, contudo energia considerável seria despendida para esta conversão e manutenção de estado, visto que o hidrogénio liquefaz a uma temperatura que ronda os  $-252,87^{\circ}\text{C}$ , pelo que será necessário bastante energia para converter e manter o hidrogénio nestas condições, referencialmente 40% da energia contida no hidrogénio. Toda esta necessidade de energia reduzirá a eficiência da instalação, aumentando o tempo de retorno do investimento e minimizando as vantagens de exploração, notando-se que este é um método de armazenamento cujas preocupações na segurança serão mais reduzidas quando comparadas com o primeiro método referido. Este processo de armazenamento apresenta uma densidade de armazenamento 20% ( $wt. \%H$ ).

Tendo noção de todas as desvantagens que os meios de armazenamento mais convencionais trazem à instalação de um sistema a bordo, surge a necessidade de se abordar uma nova solução. Solução que poderá passar pelo armazenamento do hidrogénio num estado sólido. Esta é uma tecnologia ainda pouco explorada a grande escala mas que, ao que tudo indica, possibilitará o armazenamento de hidrogénio com uma densidade superior ao estado líquido, recorrendo-se para isso a determinados materiais metálicos que funcionam como “esponjas” de hidrogénio. Esses metais, designados por hidretos, estarão instalados dentro de uma estrutura cilíndrica a qual será considerada, então, como depósito.

Um metal hidreto é um metal que, quando banhado por hidrogénio na forma gasosa, de uma forma natural atrai átomos de hidrogénio ( $\text{H}^{\cdot}$ ) que se vão localizar nos interstícios desse metal, ou seja, através da injeção das moléculas de hidrogénio ( $\text{H}_2$ ) no seu estado gasoso num depósito, estas moléculas irão ser absorvidas e posteriormente dissociadas em átomos [10]. Esta absorção ocorre de uma forma espontânea e contínua formando novas fronteiras metal-hidrogénio, acontecendo a uma taxa que varia de acordo com o material em questão e também com a pressão e temperatura a que este se encontra. Para contrariar a absorção, num processo designado por libertação, existe a necessidade aplicar calor ao metal, libertando assim os átomos de hidrogénio permitindo

que estes se combinem e voltem assim a formar moléculas de Hidrogénio ( $H_2$ ). Este calor necessário irá variar com o tipo de metal em questão. Na imagem seguinte é esquematicamente explicado o processo.

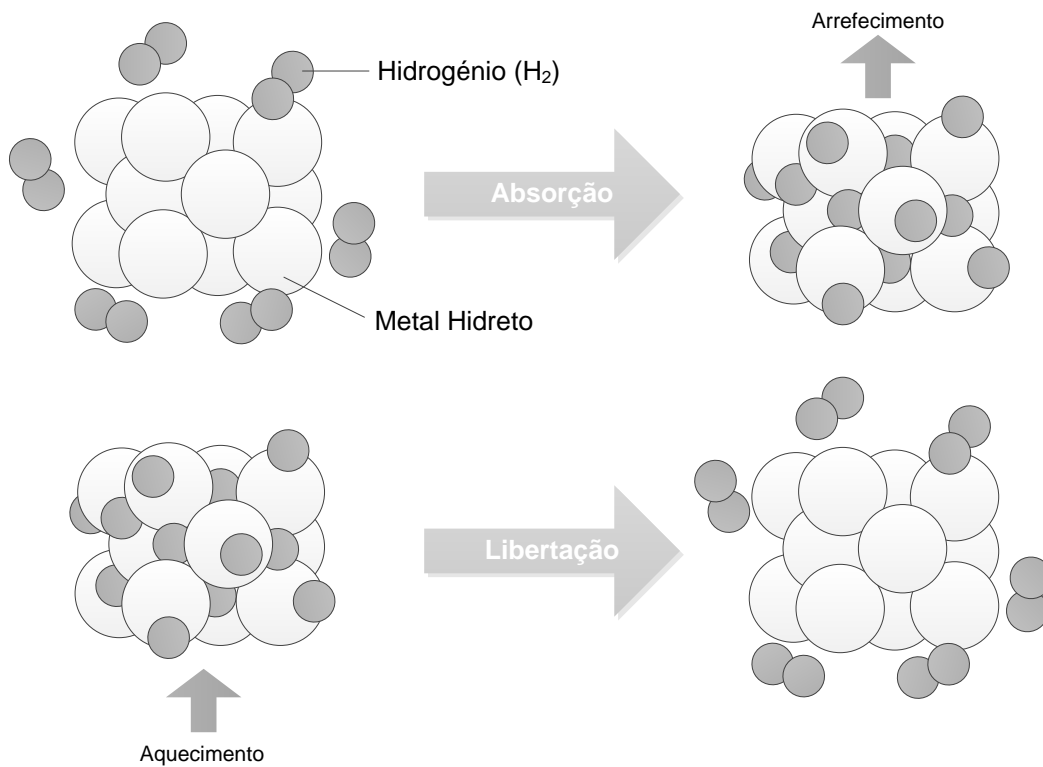


Figura 38. Representação dos processos de absorção e libertação do hidrogénio pelo metal hidreto.

Existem na tabela periódica cerca de 50 elementos que poderão funcionar como hidreto, uns de uma forma mais eficiente que outros, apresentando vantagens e desvantagens, que de uma forma resumida podem ser descritas em capacidade de armazenamento, peso, taxa de libertação e temperatura necessária para a libertação. Segundo a última publicação da Agência Internacional de Energia (IEA), para sistemas de armazenamento em estado sólido, devem ser considerados dois grupos importantes de metais hidretos, os alumínio e os boro [11].

Tabela 17. Propriedades chave dos hidretos com base Alumínica (fonte IEA).

Tipo	Densidade de Armazenamento wt.% $H_2$	Temperatura de Libertação $^{\circ}C$
$LiAlH_4$	10,6	190
$NaAlH_4$	7,5	100
$Mg(AlH_4)$	9,3	140
$Ca(AlH_4)$	7,8	>230

Tabela 18. Propriedades chave dos hidretos com base Bórica (fonte IEA)

Tipo	Densidade de Armazenamento wt.%H <sub>2</sub>	Temperatura de Libertação °C
LiBH <sub>4</sub>	18,5	300
NaBH <sub>4</sub>	10,6	350
KBH <sub>4</sub>	7,4	125
Be(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	20,8	125
Mg(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	14,9	320
Ca(BH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	11,6	260

Observando a tabela anterior, pode ser afirmado que em qualquer dos casos a temperatura de deserção pode ser atingida, existindo calor suficiente na grande maioria dos navios para que a este processo se possa fornecer a energia térmica necessária. É importante referir que este tipo de solução de armazenamento, no processo de libertação, permite jogar entre temperatura necessária e pressão a que o metal se encontra.

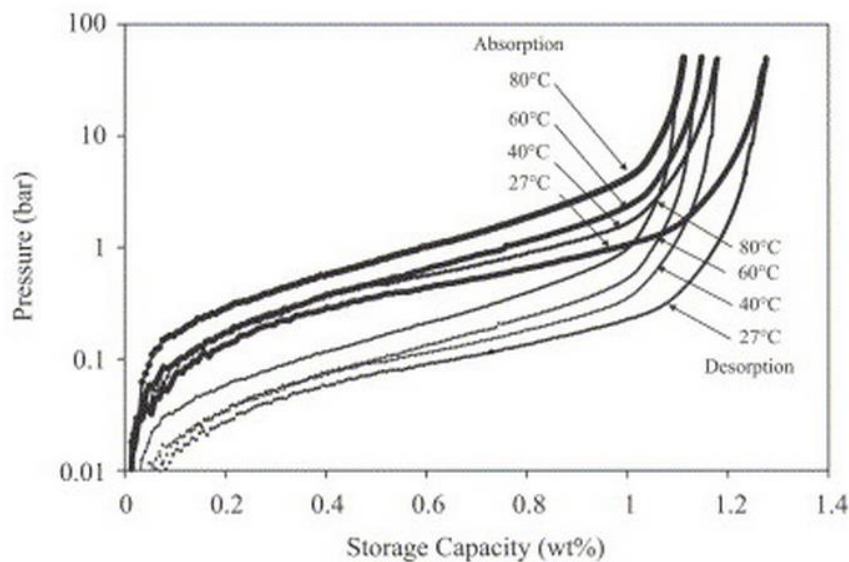


Gráfico 6. Densidade de armazenamento energético em função da temperatura e pressão aplicada.

Outra consideração que se deve ter aquando da selecção deste tipo de armazenamento, é o facto de que estes hidretos poderem sofrer alguma “desactivação” devido a impurezas.

Podemos então verificar algumas vantagens de um sistema de armazenamento através de hidretos:

- Alta densidade de armazenamento;
- Facilidade de libertação do Hidrogénio com baixa temperatura;
- Paragem rápida;
- Flexibilidade no tamanho do tanque;
- Materiais de construção com elevada disponibilidade.

Quando comparamos esta forma de armazenamento com os outros dois teremos:

- Menor volume;
- Menor pressão (processo bastante mais eficiente e mais seguro);
- Hidrogénio mais puro;

Concluindo esta análise, sobre as várias formas de armazenamento possível de hidrogénio a bordo de um navio, verifica-se o seguinte:

- Hidrogénio Pressurizado:
  - É comercialmente viável no entanto bastante volumoso e a tecnologia menos segura.
  - Densidade de armazenamento: 6 a 10 wt.%H<sub>2</sub>
- Hidrogénio Liquefeito:
  - É comercialmente inviável, devido à dissipação de o equivalente a 40% da energia presente no hidrogénio aquando da liquefacção.
  - Densidade de armazenamento: 20 wt.%H<sub>2</sub>
- Hidrogénio Sólido:
  - Embora exista pouca experiencia e a investigação efectuada seja mínima nos últimos anos, esta parece ser uma tecnologia apropriada à instalação a bordo de um navio;
  - Densidade de armazenamento: potencialmente 8 wt.%H<sub>2</sub>.

Um último pormenor que se deve ter em conta se seleccionado este tipo de armazenamento será o facto de que no início da actividade, estes hidretos necessitam sofrer um processo de activação baseado num tratamento térmico e de vácuo, processo

que pode ser repetido aquando da redução de eficiência de armazenamento, reactivando o metal hidreto. Este processo deverá ser inserido numa rotina de manutenção para que se promova a eficiência de armazenamento.

Deve ter-se, então, em conta a forma e a quantidade de armazenamento de acordo com o regime de produção e utilização de hidrogénio, analisando cada navio caso a caso. Na tabela seguinte está uma comparação dimensional para os tipos de armazenamento possíveis, tendo em conta o armazenamento de 3kg de Hidrogénio [11].

Tabela 19. Armazenamento de hidrogénio, 3 kg como referência.

Tecnologia	Volume (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidade de Armazenamento wt.%H <sub>2</sub>
H <sub>2</sub> Comprimido (350bar)	0,145	45	6,7
H <sub>2</sub> Comprimido (700bar)	0,100	50	6,0
H <sub>2</sub> Liquefeito	0,090	40	7,5
Metal hidreto de libertação a baixa temperatura	0,055	215	1,4

No entanto na tabela o hidreto em questão trata-se de um metal com reduzida densidade de armazenamento energético e de libertação a baixa temperatura, o que trabalhando com uma alta temperatura (disponível no navio) assiste-se a uma drástica redução de peso do tanque de hidretos.



Figura 39. Depósito de hidrogénio de metais hidretos.

Mais à frente, neste documento, está presente uma demonstração de um caso prático onde é feita uma análise ao tipo de armazenamento ideal.

## 5.4 - Consumo de Hidrogénio

A discussão sobre o uso de hidrogénio em motores de combustão com ignição por faísca já é investigado desde o século passado, contudo o uso em motores de ignição por compressão só nos anos 90 começou a ser investigado e discutido.

Um dos pontos mais importantes a ter em conta na queima de um combustível é a relação estequiométrica, ou seja, a quantidade de ar, por parte, que cada combustível necessitará para reagir, e quanto maior for essa relação mais económico se torna um motor. Por exemplo, a gasolina pura tem uma relação de 14,7:1 enquanto o diesel terá 14,9:1, tornando esses motores mais económicos. Na tabela seguintes está presente uma comparação entre as propriedades do hidrogénio a ter em conta quando o injectamos num motor, em comparação com as propriedades do diesel [13].

Tabela 20. Propriedades do diesel e do Hidrogénio inerentes à combustão.

	Hidrogénio	Diesel
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	120	42
Relação Estequiométrica	34,3:1	14,9:1
Temperatura de Auto ignição (°C)	571,95	251,35
Velocidade da Chama (m/s)	2,92	0,38

Observando a tabela, surge realçada a quantidade de ar que é necessária para que a combustão do hidrogénio aconteça, querendo isto dizer, à partida, que uma maior taxa de compressão será necessária.

Existem, então, 3 formas conhecidas de injeção de hidrogénio num motor de combustão interna.

- Fumigação do Hidrogénio;
- Ignição por compressão homogénea;
- Injecção Directa

### 5.4.1 - Fumigação do Hidrogénio

A fumigação do hidrogénio será o método mais acessível para que se consiga consumir hidrogénio em máquinas de combustão interna, podendo acontecer de duas formas. A primeira forma de fumigação de hidrogénio surge injectando hidrogénio no

colector de ar de admissão a uma pressão pouco superior à atmosférica, sendo que a segunda forma será através do canal de admissão, injectando enquanto a válvula de admissão está aberta e a válvula de escape está fechada. O primeiro método é o mais eficaz no que diz respeito ao uso do hidrogénio, uma vez que não existe injeção do gás durante o período de cruzamento de válvulas, sem que este se perca com o escape.

São então uma forma de utilização de hidrogénio simples de implementar recorrendo a pressões relativamente modestas, contudo com alguns problemas a serem associados:

- Risco de explosões no colector de ar;
- Perda de potência devido ao deslocamento do ar de admissão.
- Fuga de hidrogénio pelos gases de escape.

#### 5.4.2 - Ignição por compressão homogénea

Este método é conseguindo usando um rácio de compressão elevada, para que a temperatura final da compressão seja suficiente para inflamar o gás injectado na camara de combustão. Nesta solução o hidrogénio é injectado apenas durante a compressão, mais uma vez também que se evite a perda de hidrogénio pelo escape. Esta solução, não sendo de controlo tão simples, acarreta também problemas ao nível do controlo e à possibilidade de explosões fora de tempo. Além destes problemas, este tipo de injeção e ignição traduzem dificuldades no controlo de rotação e carga do motor, estabilidade de operação e efectivamente menor potência resultante da combustão quando comparado com o método de injeção directa, devendo-se todos estes contras devido à velocidade de combustão do hidrogénio bem como à quantidade de hidrogénio que se injecta por ciclo, devido ao volume específico.

#### 5.4.3 - Injeção directa

Este será o método que mais garantia apresenta para uso comercial [14]. A injeção pode ser conseguida recorrendo a diferentes pressões, acontecendo apenas quando as válvulas do cilindro estão ambas fechadas. Com pressões baixas o hidrogénio é injectado numa fase inicial da compressão, o que faz com que o tempo de injeção seja difícil de controlar. Por sua vez a injeção a alta pressão é feita no final da compressão quando a temperatura do ar na câmara é já superior à da temperatura de auto-ignição, assemelhando-se ao comportamento de uma injeção de diesel convencional. As vantagens que este método apresenta serão:

- Não existe perda de potência devido ao deslocamento do ar de admissão;
- Gases de escape são facilmente controlados, nomeadamente as emissões de  $\text{NO}_x$ ;
- Uma vez que o hidrogénio apenas é injectado com o cilindro fechado a segurança desta operação será superior;
- O controlo do tempo de injeção é conseguido possibilitando a optimização do padrão de injeções para cada carga da máquina.

Na figura seguinte pode ser observada a diferença entre os conceitos de injeção através do colector de admissão, injeção externa, e o conceito de injeção directa onde o hidrogénio é injectado directamente no cilindro com as válvulas fechadas.

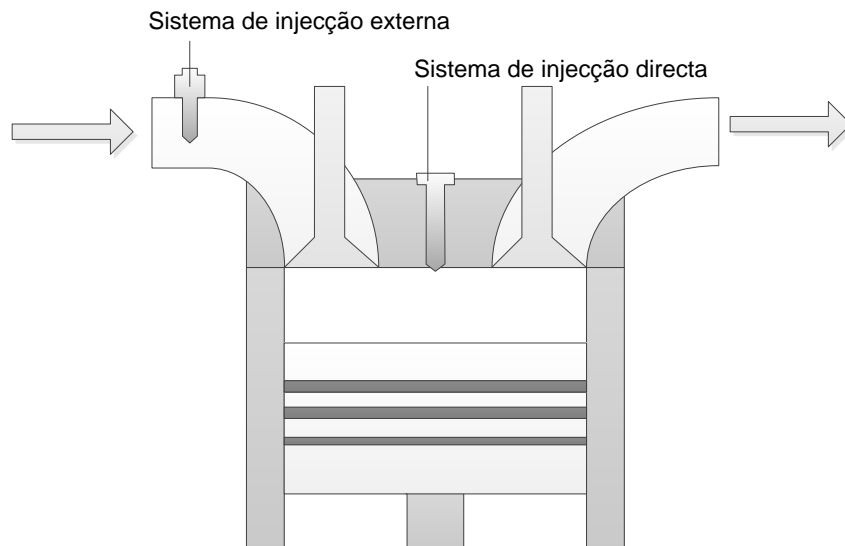


Figura 40. Sistema de injeção externa e injeção directa.

Rotengrubber e outros (2004) demonstraram a real aplicabilidade dos dois géneros de injeção, pelo que são uma válida opção para o futuro de veículos, nomeadamente marítimos [22]. Embora nos testes tenham usado ignição por faísca e não por compressão, os autores da pesquisa mantêm a ideia que a combustão com recurso a hidrogénio poderá fornecer melhores performances que os combustíveis convencionais.

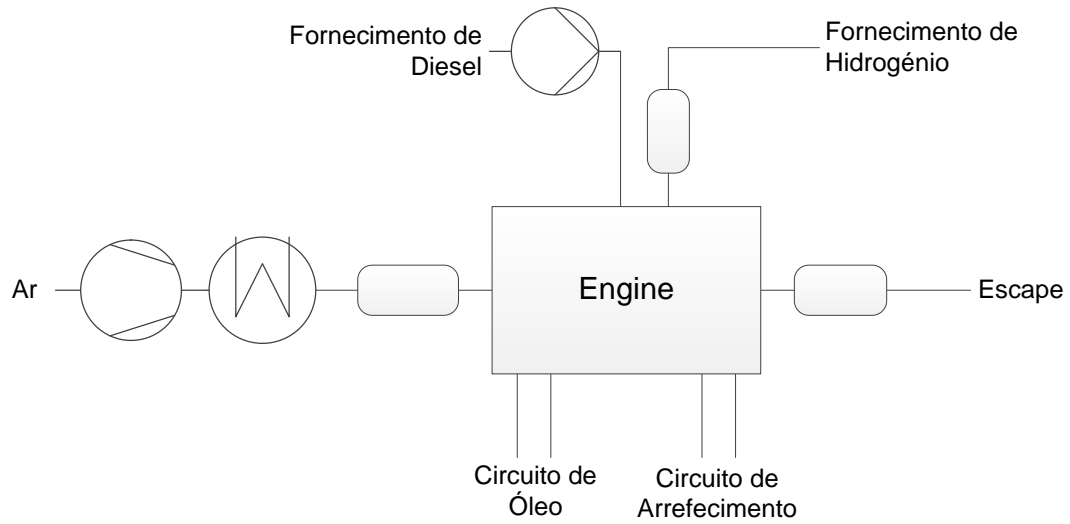


Figura 41. Esquema utilizado para testes de injeção directa de Hidrogénio.

Nas experimentações o convencional sistema de injeção diesel foi mantido e a injeção de hidrogénio é controlada electronicamente.

## Capítulo 6

### 6 - Casos Práticos

Desde o início do presente trabalho que o seu objectivo se trata da construção e correcto dimensionamento de um Ciclo Orgânico de Rankine para produção de electricidade a bordo, e, por acréscimo, sempre que exista a impossibilidade de consumo dessa energia então sim o armazenamento da mesma na sua forma química, nomeadamente em hidrogénio por electrólise da água. Neste capítulo, será demonstrada então a ordem lógica das considerações a serem feitas para o dimensionamento do ciclo e utilização da energia resultante.

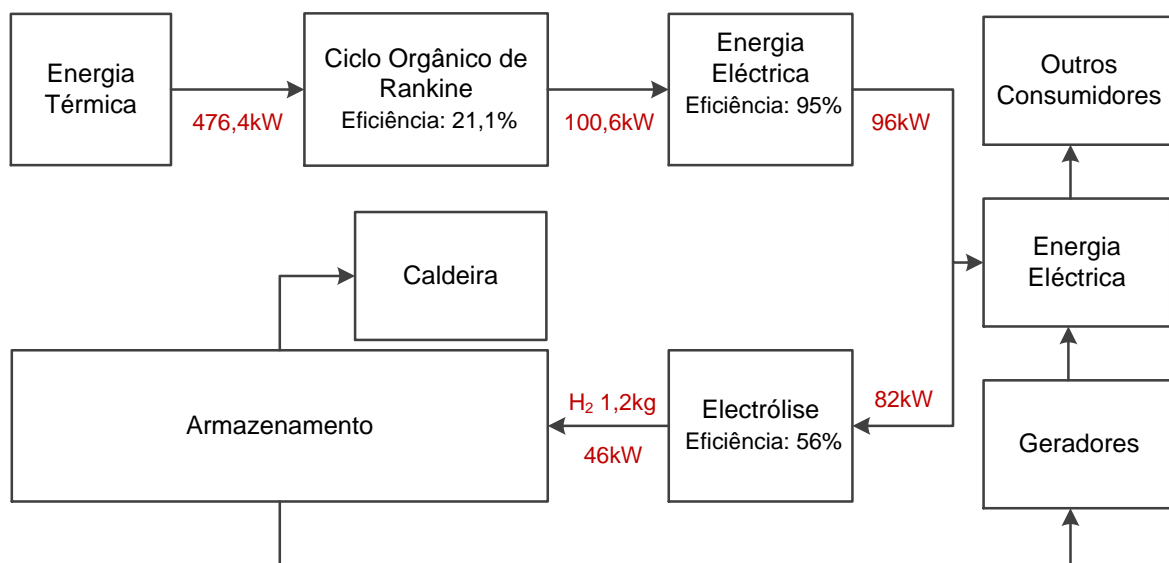


Figura 42. Fluxo de energia Recuperação-Consumo.

A imagem 42 vem mostrar o resultado de todas as considerações feitas nos tópicos anteriores, nomeadamente no dimensionamento e eficiência do módulo COR, selecção e eficiência do gerador, selecção e eficiência do electrolisador. Estas são as considerações feitas que serão semelhantes nos módulos preparados para uma produção de 100kW, independente do navio em questão, restando o dimensionamento e forma de armazenamento que dependerá então do navio. Para um correcto dimensionamento e selecção do modo como o Hidrogénio irá ser armazenado em cada navio é necessário ir mais uma vez de encontro à forma como a energia está disponível a bordo.

## 6.1 - Projecto de 100kW

Como já foi descrito anteriormente, várias considerações tiveram de ser feitas para chegar a um correcto dimensionamento do ciclo, com base nas temperaturas de fonte quente e fonte fria, 180°C e 15°C, são, nesta alínea, justificados na prática o valor de pressão e temperatura em cada ponto do ciclo.

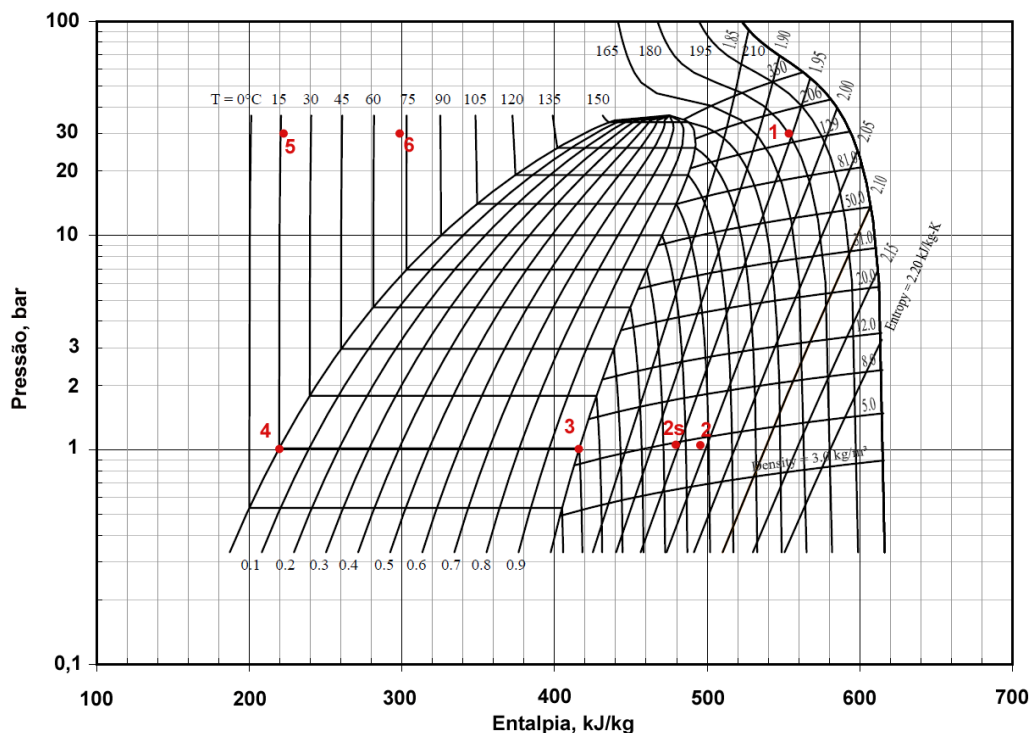


Gráfico 7. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama Ph, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina.

Marcando o ponto 1, tido como objectivo, correspondente a uma pressão de 30 bar e 180°C, considerando uma eficiência da turbina de 80%, poderemos então, traçar uma linha representativa de uma evolução isentrópica, 1-2, sabendo que a pressão à entrada

do regenerador rondará o 1,05 bar, identifica-se a temperatura à saída da turbina como tendo um valor rondando os 82°C, a evolução não isentrópica considerada está representada no gráfico 8. O regenerador, como já foi referido, foi dimensionado para que a permuta de energia seja o equivalente até à saturação do “vapor”, 2-3, seguindo-se a condensação no condensador, 3-4. De 4 para 5 observamos a pressurização necessária para recuperação de energia 30 bar, seguindo-se a pré recuperação de calor no regenerador, 5-6. Para finalizar, temos o evaporador de 6 para 1, dimensionado para que a recuperação seja de um valor a rondar os 500kW.

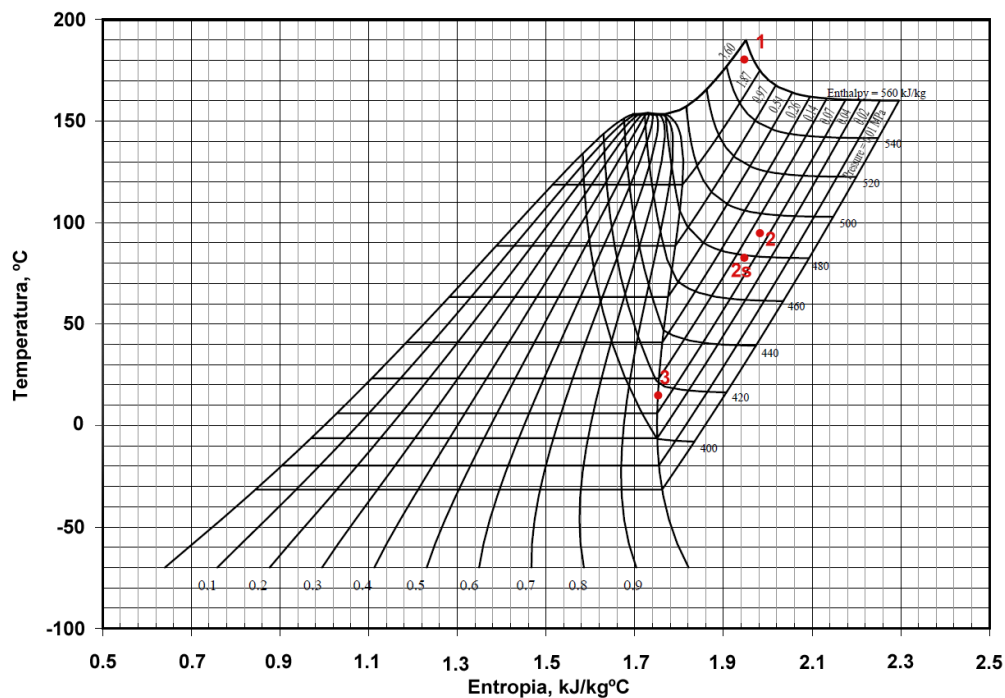


Gráfico 8. Evolução termodinâmica do fluido no diagrama TS, tendo em conta o rendimento isentrópico da turbina.

Tabela 21. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine.

Ponto	Potência (kW)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Estado
1A	1054,5	555,0	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
1B	1054,5	555,0	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
2s	908,2	478,0	1,05	82	Vapor Sobreaquecido
2	937,5	493,4	1,1	101	Vapor Sobreaquecido
3	792,3	417,0	1,0	15	Vapor Saturado
4	418,0	220,0	1,0	15	Líquido Saturado
4B	418,0	220,0	1,0	15	Líquido Saturado
5	423,7	223,0	31,0	17	Líquido Subarrefecido
6	568,9	299,4	30,0	73	Líquido Subarrefecido

## 6.2 - Variação de parâmetros

As variações exteriores dizem muito quanto ao rendimento de um ciclo de Rankine, acontecendo o mesmo num Ciclo Orgânico de Rankine, então, é neste capítulo demonstrada a influência que as fontes de calor e as fontes de arrefecimento terão no respectivo rendimento do módulo.

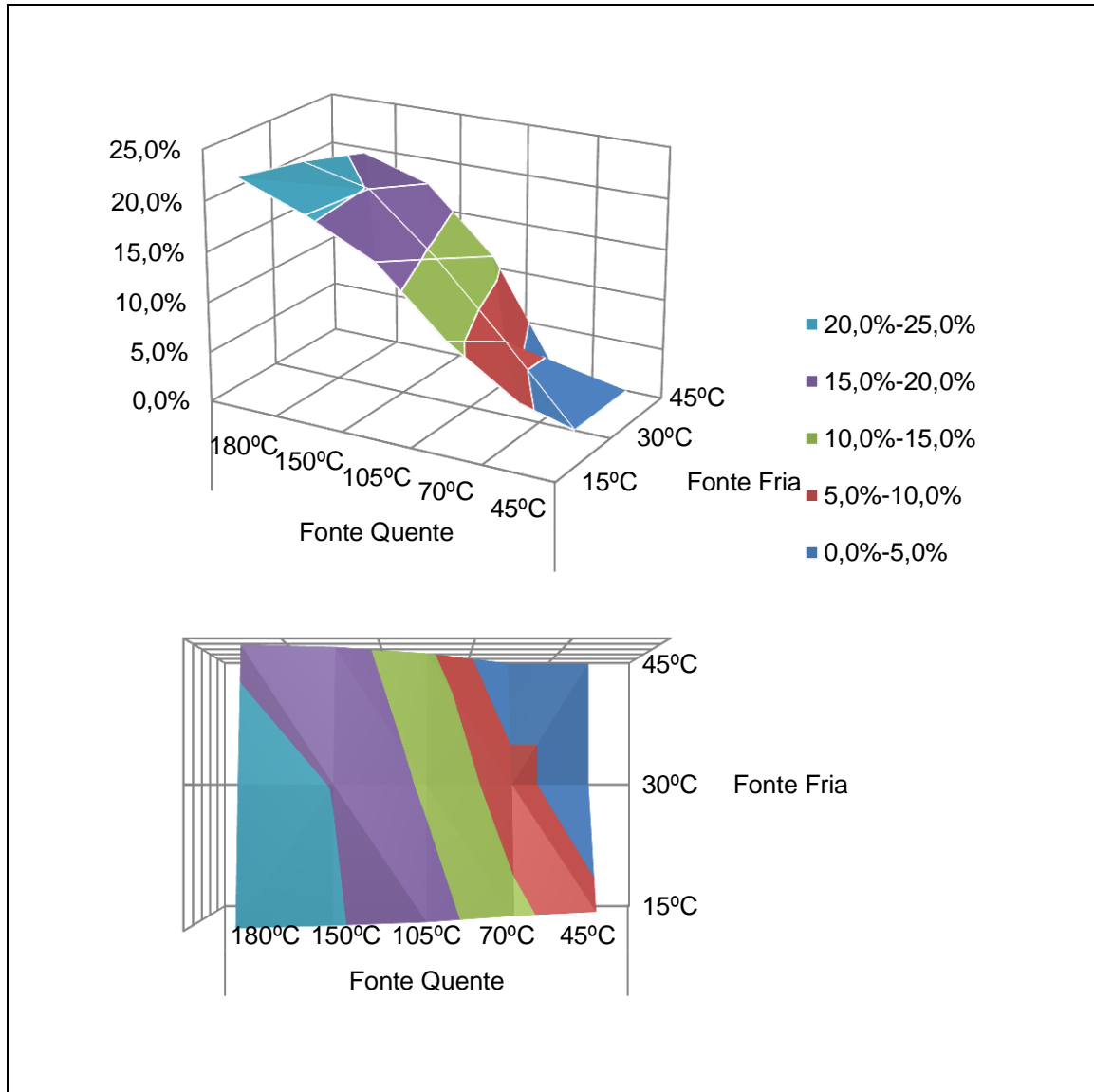


Figura 43. Rendimento do ciclo orgânico de Rankine de acordo com as temperaturas da fonte quente e fonte fria.

No gráfico anterior é possível observar-se a influência que alterações nas fontes térmicas terão na eficiência do ciclo. Para obtenção dos gráficos foram simulados cenários fazendo variar a fonte quente entre os 180°C e os 45°C e a fonte fria entre os 15°C e as 45°C. As simulações de maior realce estão caracterizadas ao pormenor nos separadores seguintes.

## 6.2.1 - Variação da fonte fria

Fonte Quente: 180°C | Fonte Fria: 30°C

Tabela 22. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 180-30°C.

Ponto	Potência (kW)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Estado
1A	767,2	403,8	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
1B	767,2	403,8	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
2'	670,2	352,8	2,0	107	Vapor Sobreaquecido
3	527,8	277,8	1,8	30	Vapor Saturado
4A	170,8	89,9	1,8	30	Líquido Saturado
4B	170,8	89,9	1,8	30	Líquido Saturado
5	172,9	91	31,0	32	Líquido Subarrefecido
6	315,3	166,0	30,0	82	Líquido Subarrefecido

Tabela 23. Eficiência do COR, 180-30°C.

Potência Térmica	Potência Gerada	Eficiência
451,9kW	97,0kW	21,5%

Fonte Quente: 180°C | Fonte Fria: 45°C

Tabela 24. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 180-45°C.

Ponto	Potência (kW)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Estado
1A	403,8	403,8	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
1B	403,8	403,8	30,0	180	Vapor Sobreaquecido
2'	361,2	361,2	3,1	117	Vapor Sobreaquecido
3	289,0	289,0	3,0	45	Vapor Saturado
4A	110,4	110,4	3,0	45	Líquido Saturado
4B	110,4	110,4	3,0	45	Líquido Saturado
5	112,5	112,5	31,0	47	Líquido Subarrefecido
6	184,7	184,7	30,0	96	Líquido Subarrefecido

Tabela 25. Eficiência do COR, 180-45°C.

Potência Térmica	Potência Gerada	Eficiência
219,1kW	42,6kW	19,5%

## 6.2.2 - Variação da fonte quente

Fonte Quente: 150°C | Fonte Fria: 15°C

Tabela 26. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 150-15°C.

Ponto	Potência (kW)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Estado
1A	678,3	357,0	30,0	150	Vapor Sobreaquecido
1B	678,3	357,0	30,0	150	Vapor Sobreaquecido
2'	583,3	307,0	1,1	60	Vapor Sobreaquecido
3	506,4	266,5	1,0	15	Vapor Saturado
4A	132,6	69,8	1,0	15	Líquido Saturado
4B	132,6	69,8	1,0	15	Líquido Saturado
5	136,8	72,0	30,0	17	Líquido Subarrefecido
6	213,8	112,5	30,0	45	Líquido Subarrefecido

Tabela 27. Eficiência do COR, 150-15°C.

Potência Térmica	Potência Gerada	Eficiência
464,6kW	95,0kW	20,4%

Fonte Quente: 105°C | Fonte Fria: 15°C

Tabela 28. Evolução termodinâmica do ciclo orgânico de Rankine, 105-15°C.

Ponto	Potência (kW)	Entalpia (kJ/kg)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Estado
1A	642,8	338,3	10,0	105	Vapor Sobreaquecido
1B	642,8	338,3	10,0	105	Vapor Sobreaquecido
2'	565,3	297,5	1,1	49	Vapor Sobreaquecido
3	506,4	266,5	1,0	15	Vapor Saturado
4A	132,6	69,8	1,0	15	Líquido Saturado
4B	132,6	69,8	1,0	15	Líquido Saturado
5	134,9	71,0	10,0	17	Líquido Subarrefecido
6	193,8	102,0	10,0	38	Líquido Subarrefecido

Tabela 29. Eficiência do COR, 105-15°C.

Potência Térmica	Potência Gerada	Eficiência
449,0kW	77,5kW	17,3%

### 6.3 - Navio A - Caso prático.

No caso do Navio A, temos um regime de laboração bastante normalizado, uma vez que é um navio que faz regularmente a mesma carreira entre o continente e as ilhas. Na imagem seguinte está presente uma simulação energética de uma viagem tipo do Navio A.

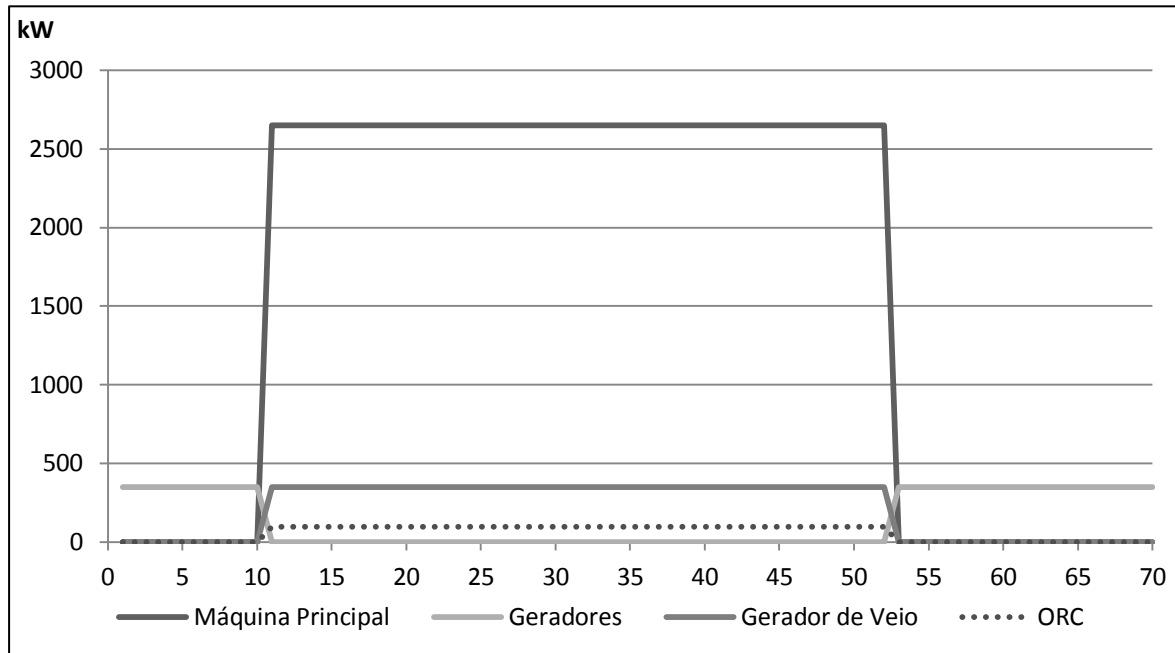


Gráfico 9. Representação gráfica do perfil energético de uma viagem de referência do navio A

No gráfico 9 é possível de se observar o perfil de operação energética do navio englobando todas as formas de transformação energética presentes no navio, com toda a potência eléctrica e mecânica que de cada um deles se retira. Como se pode concluir a potência produzida por um ciclo orgânico de Rankine é inferior à potência produzida no gerador de veio, pelo que nunca será possível substituir o seu funcionamento, podendo apenas reduzir-se quanto à potência que lhe é solicitada em 100kW. Contudo o motor irá baixar a sua carga e com isso piorar o seu consumo específico de combustível (gr/kWh), pelo que será interessante a comparação sobre qual das opções de funcionamento residem as maiores poupanças, (i) redução de carga ou (ii) produção de hidrogénio para posterior queima nos geradores.

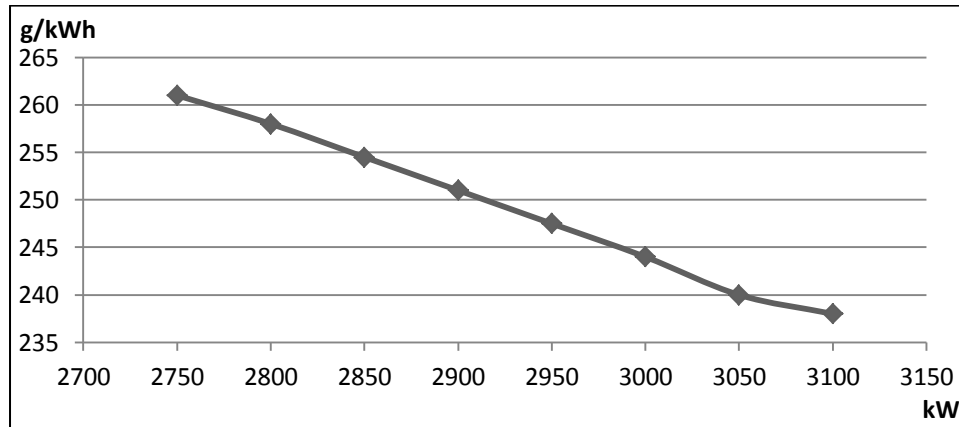


Gráfico 10. Curva do consumo específico da máquina principal do navio A.

Analisando os dados do *software* BOEM-S, assistimos que a máquina principal do Navio já labora normalmente em regimes cujos valores de consumo específico são notoriamente altos, sendo por isso que a redução da carga solicitada ao gerador de veio poderá não ajudar. Numa viagem tipo, o navio, com a máquina a 3000kW, irá consumir cerca de 29548,4kg (42 horas), apresentando um consumo específico de 244gr/kWh, no entanto se à potência da máquina se retirar os 100kW provenientes do ciclo COR, teremos um consumo de 28933kg, contudo com um consumo específico de 247,5g/kWh, representando uma poupança de 616kg, cerca de 2,1% da energia em fuelóleo pesado.

Será importante agora ter-se uma noção da influência que o hidrogénio produzido e armazenada terá na redução de consumo dos geradores quando o navio se encontra em porto, que é a segunda hipótese sugerida pelo perfil energético observado no gráfico 9.

Os geradores do navio em questão estão também eles a laborar a reduzidas cargas, o que incrementa também o consumo específico que se situa nos 380gr/kWh, valor significativamente elevado. Este valor de consumo específico origina um consumo de combustível na ordem dos 133kg/h, mais ou menos 3724kg, nas 28 horas de referência que o navio se encontra no porto, que representam 43447kWh.

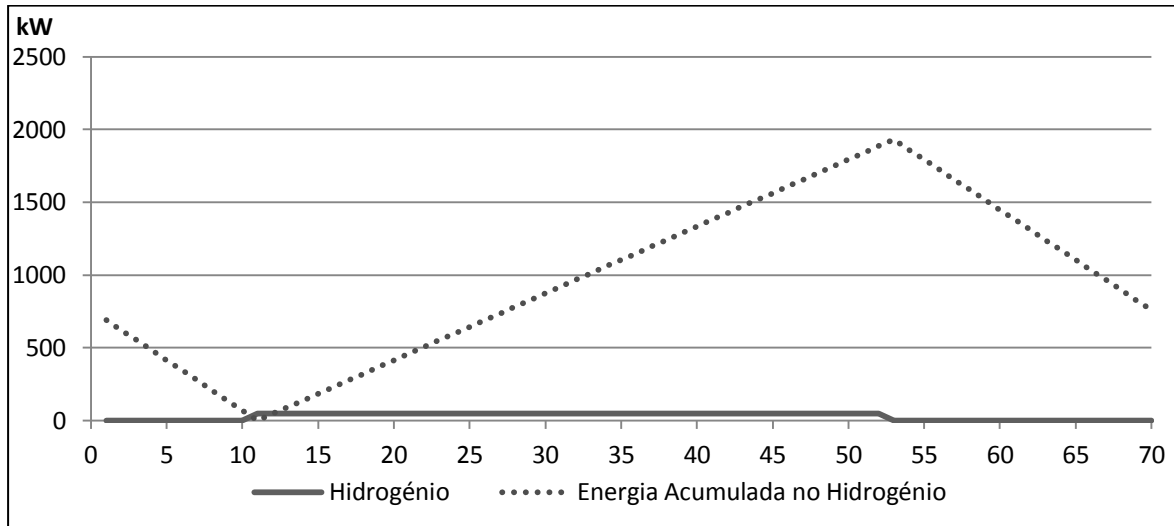


Gráfico 11. Representação gráfica da gestão energética face à produção e consumo de hidrogénio.

O gráfico 11, traduz a produção e acumulação de Hidrogénio em armazenamento durante uma viagem típica do navio, num processo semelhante a um banco de gelo utilizado hoje em dia para acumulação de energia para refrigeração, chegando a uma potência acumulada de 1932kWh em energia química, um número bastante inferior aos 4200kWh que seriam registados caso fosse “consumida” a energia directamente proveniente do gerador presente no módulo COR. Perante esta capacidade de acumulação seria permitido um consumo horário de 69kW provenientes do hidrogénio para injeção nos geradores, o que significa uma redução de 4% nos consumos dos geradores, o equivalente a 156kg de Diesel óleo marítimo, uma redução pouco significativa, quando comparada com a redução da carga do gerador de veio, já presente no navio.

De uma forma sucinta, concluímos que a instalação de electrolisadores e respectivo armazenamento não se revela vantajosa no que diz respeito ao navio em questão uma vez que a utilização directa da electricidade revela uma redução de consumo bastante superior.

Tabela 30. Poupanças considerando consumo eléctrico ou de hidrogénio.

	<b>COR simples</b>	<b>COR com Hidrogénio</b>
Redução por viagem tipo:	616kg de HFO	165kg de MDO

Embora o valor do fuelóleo pesado seja inferior, a produção de hidrogénio não compensará o investimento num tempo de vida útil do navio, rendendo sim a instalação

de um Ciclo Orgânico de Rankine por si só. Se juntarmos ainda o facto de que o módulo poderá produzir energia recorrendo também a energia perdida pelos geradores ou caldeira auxiliar, ainda que em menor quantidade, o módulo aumentará a sua capacidade de produção anual, reduzindo assim o tempo de retorno do investimento.

## 6.4 - Navio B - Caso prático.

No regime de laboração do Navio A, a instalação de um módulo de produção de hidrogénio não se revelou vantajosa, contudo a disposição energética e arquitectura mecânica do Navio B revela-se diferente o que poderá proporcionar maiores poupanças com a produção e consumo do hidrogénio, contudo é um navio que não apresenta uma carreira regular, não apresentando um perfil energético constante sendo mais difícil estimar o regime de produção, armazenamento e consumo de hidrogénio, pelo que o estudo será baseado em dados instantâneos focando-se na redução do consumo por parte dos geradores ou caldeira.

Os geradores presentes no Kara G seguem também eles a trabalhar a cargas demasiado reduzidas, muitas vezes pela obrigação de levar dois geradores ligados a baixas cargas para que se caso exista uma demanda súbita de energia esta não falte muitas vezes apenas por picos que acontecem devido a arranques simultâneos que justifiquem mais 100kW, muitas vezes por má gestão da tripulação. Nesta situação a necessidade de um Ciclo Orgânico de Rankine torna-se flagrante, uma vez que possibilitará o aumento da eficiência de um dos geradores e o desligar do outro, dando alguma liberdade de gestão à tripulação.

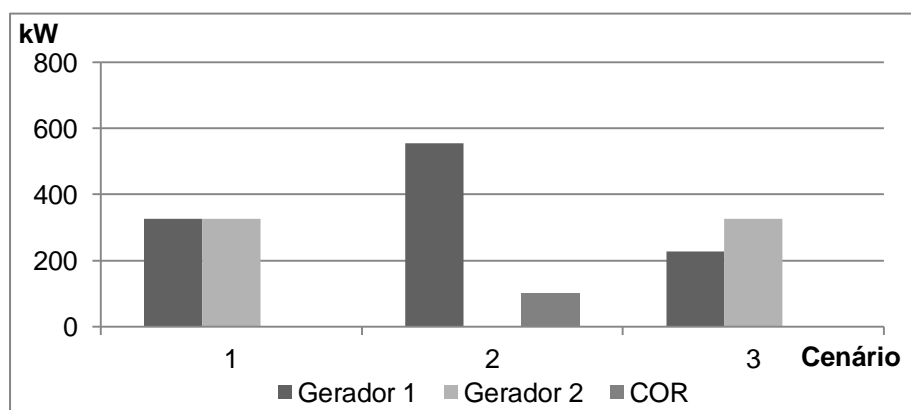


Gráfico 12. Comparação entre possíveis cenários para utilização da energia eléctrica a bordo.

No gráfico é possível verificar-se a diferença entre os dois casos. No caso 1 o consumo específico dos dois geradores situa-se nos 349,2gr/kWh e nos 358,4gr/kWh o que são valores significativamente altos, proporcionando um consumo de 114,2 kg/h e

117,2kg/h respectivamente. Recorrendo à hipótese que o caso 2 possibilita o consumo específico de um dos geradores cairá para valores que a bibliografia técnica deste tipo de motores dizem ser completamente aceitáveis para 70% de carga, os quais rondarão os 240gr/kWh (valor de referência uma vez que é desconhecido o verdadeiro valor de consumo específico do motor em questão), valor esse que uma demanda de 554kW traduz em 133kg/h, registando um diferença de 98,5kg/h a menos com esta solução. Pela auditoria realizada ao navio, este encontra-se com este regime de laboração durante 58,4 dias do ano no mínimo, o que equivale a uma poupança de 137,4 toneladas. Se toda esta gestão dos geradores não for possível existe ainda a possibilidade de aplicação do cenário 3, que se resume a reduzir a carga de um dos geradores em 100kW, prejudica o consumo específico que cai para 400gr/kWh (também segundo bibliografia) no entanto o consumo absoluto cai em 23,4 kg/h, 32797,5kg anuais segundo as mesmas condições. Sendo claramente válido o investimento no ciclo COR em qualquer dos casos.

Na forma como o navio B está estruturado, a sua Instalação não apresenta vantagens no armazenamento de energia por intermédio do hidrogénio. Justificada pela falta de rentabilidade apresentada nos electrolisadores, esta conclusão surge devido ao facto de existir continuamente demanda de potência eléctrica, sendo que teremos sempre um gerador com carga suficiente que se justifique a redução da sua potência para uso da energia com origem directa do COR.

Se, por outro lado, juntarmos a indicação de que num futuro próximo os navios serão severamente taxados de acordo com o nível de emissões que estes estão a libertar para o meio ambiente, a queima e armazenamento de hidrogénio poderá voltar a fazer sentido uma vez que a combustão de hidrogénio é considerada uma reacção cujas emissões nocivas para o ambiente perto de zero. Este cenário é especialmente atractivo quando o navio está em porto, onde a emissão carbónica é mais elevada e controlada pelas autoridades.

## Capítulo 7

# 7 - Conclusões e Perspectivas

Neste capítulo são expostas as principais conclusões em forma de aprendizagem com o trabalho desenvolvido. De uma forma resumida são expressas as ideias gerais que a pesquisa inerente permitiu gerar bem como sugestões para desenvolvimentos futuros.

### 7.1 - Conclusões gerais

Seguindo o objectivo principal, que seria verificar a aplicação de um Ciclo Orgânico de Rankine a bordo de um navio, conseguiu-se com o presente trabalho, ter uma noção do que se pode esperar quando abordamos o tema aplicado à indústria naval. Construiu-se uma noção dos cuidados a ter para que todos os subsistemas funcionem em conjunto resultando, no final, em redução de consumos energéticos que são por sua vez dispendiosos.

Numa análise inicial, concluiu-se que não é difícil encontrar um navio, de operação considerável, onde um módulo de 100kW possa ser aplicado, mesmo que operando em reduzidas cargas, prejudicando o consumo específico de cada sistema consumidor, então aos dois navios tidos como cobaias é compensatório a instalação de um COR.

Uma vez viável a instalação de um sistema e o benefício que este poderá trazer ao mercado, com a abordagem individual a cada equipamento e à evolução do ciclo foi

possível perceber-se a importância que cada equipamento tem na performance deste. Objectivando uma potência de produção e sabendo as condições das fontes térmicas disponíveis, é acessível a percepção do estado do fluido em cada ponto bem como o caudal de fluido necessário para que se possa atingir a desejada potência. Conclui-se também as potências de permuta que os 3 permutadores devem assegurar.

Durante o trabalho foi também possível perceber o porquê do facto de o mercado e principais fabricantes de sistemas semelhantes, apostarem no fluido R245fa, que embora não seja o mais eficiente para este tipo de aplicação é o mais fácil de trabalhar, não é tóxico e é considerado amigo do ambiente.

Sobre a transformação da energia mecânica em energia eléctrica, pode-se também concluir que devido ao desconhecimento do comportamento da turbina, a quando operação com o R245fa, tem de se dar uma certa margem na selecção do gerador, em função do binário e rotação que este terá de suportar, sendo esta uma das principais dificuldades.

Numa fase mais final, conclui-se que a produção de hidrogénio a bordo pode não se revelar só por si uma solução óptima nos dias de hoje, isto devido ao facto de que os processos de separação da molécula de água, nomeadamente a electrólise, hoje em dia não apresentam eficiências que beneficiem o processo de consumo energético, sendo que energia eléctrica por energia química, torna-se mais vantajoso o consumo directo da energia eléctrica. Contudo, avizinha-se num futuro próximo a aplicação de várias taxas sobre as emissões provocadas no navio, e aí será de todo benéfico o recurso ao hidrogénio, pois é um combustível cujas emissões resultantes são consideradas perto de zero.

Em suma, pode-se concluir que toda a matéria abordada neste trabalho é de extrema importância para um futuro próximo no mercado naval, podendo, se mais aprofundado, dar origem a um sistema de engenharia que poderá proporcionar poupanças significativas.

## 7.2 - Principais dificuldades

O presente trabalho revelou-se inspirador quando focado o facto de que permitiu ao autor uma noção geral do que implica o desenvolvimento de um produto, mais especificamente, um módulo para produção de energia eléctrica, recorrendo às leis da física e da termodinâmica.

Por este mesmo facto de abranger uma vasta área da engenharia (mecânica, electrotécnica e química) o autor deparou-se com algumas dificuldades que seguem enumeradas:

- Participando num projecto empresarial e sendo que o segredo é em parte a alma do negócio, como é compreensível, o autor viu-se restringido no que toca à disseminação da total informação útil ao dimensionamento do módulo, peça a peça.
- No que toca à selecção do coração do equipamento que é a turbina, a escassez de informação específica para este tipo de aplicações e para este tipo de fluido, restringiu um pouco as opções de escolha, acabando por se optar por uma turbina radial, menos susceptível a perdas de rendimento.
- Devido às dúvidas perante o comportamento da turbina, a escolha do gerador surge um pouco debilitada, sendo que um factor de segurança considerável teve de ser dado, possivelmente prejudicando a eficiência.
- No tópico hidrogénio, também aqui se sentiram algumas dificuldades em encontrar informação recente. Na sua grande maioria, a bibliografia é já de anos passados, inclusive estudos realizados recentemente assentam em teses e estudos experimentais, alguns, que datam mais de 20 anos.

### 7.3 - Objectivos atingidos

No seguimento de algumas conclusões, objectivos foram alcançados. Tendo como objectivo o estudo da viabilidade das tecnologias abordadas, bem como a compreensão do meio em que estas serão aplicadas, foram atingidos os seguintes objectivos:

- Compreensão do balanço de energia que acontece num navio, compreendendo os valores de consumo e rendimentos inerentes aos sistemas presentes a bordo, bem como a gestão que é feita dos mesmos;
- Foi entendida a melhor forma de aplicação de um Ciclo Orgânico de Rankine, e a sua construção;
- Compreendeu-se a evolução termodinâmica do fluido de trabalho;

- Percebeu-se a forma como o rendimento do ciclo é afectado com as temperaturas inerentes ao funcionamento, a fonte quente e a fonte fria;
- Sobre a utilização do hidrogénio a bordo, foi estudada e percebida toda a dinâmica de produção, armazenamento e consumo deste gás;
- Ainda sobre a aplicabilidade do hidrogénio, compreendeu-se a real vantagem no mercado naval.

No final, pode dizer-se que a todos os objectivos propostos inicialmente foram alcançados, com excepção da aplicação experimental que não obteve desenvolvimentos em tempo útil de acordo com a data limite de entrega deste trabalho, sugerindo-se que seja um dos objectivos de um trabalho futuro.

## 7.4 - Futuros trabalhos

Como já foi referido, o presente trabalho, permitiu ao autor uma abordagem geral sob o ponto de vista energético de um navio, com o objectivo de sugerir a recuperação de energia dissipada e aumentar a eficiência do navio por intermédio de um módulo COR e da combustão de hidrogénio nas máquinas térmicas, hidrogénio produzido a bordo. No seguimento deste objectivo atingiram-se resultados teóricos assumindo determinados pressupostos, sendo no seguimento destes resultados que sugerem para futuros trabalhos o seguinte:

- Modulação matemática do sistema num todo recorrendo a software apropriado;
- Montagem de uma bateria de testes que provasse as suposições termodinâmicas levantadas neste trabalho, no que diz respeito ao Ciclo Orgânico de Rankine, com toda a capacidade para se fazer variar os parâmetros sob investigação.
- Montagem de uma bateria de testes que provasse as suposições termodinâmicas levantadas neste trabalho, no que diz respeito à produção, armazenamento e consumo de hidrogénio, com toda a capacidade para se fazer variar os parâmetros sob investigação.

# Capitulo 8

## 8 - Referências

### 8.1 - Lista de Comunicados

[1] James. M. Calm, “The nex generation of refrigerants – Historic review, considerations and outlook, 2008.

[2] J.M. Calm, G.C. Hourahan, “Physical, Safety, and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants, 2011.

[3] Huijuan Chen, D. Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos, “A review of termodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat”, 2010.

[4] Lars J. Brasz, William M. Bilbow, “Ranking of Working Fluids for Organic Rankine Cycle Applications”,2004.

[5] Bahaa Saleh<sup>1</sup>, Gerald Koglbauer, Martin Wendland, Johann Fischer, Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles, 2005.

[6] Sylvain Quoil, MartijnVanDenBroek, Sebastien Declaye, PierreDewallef a, VincentLemort, “Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems”, 2013.

[7] Gary J. Zyhowski, Andrew P. Brown, Abdennacer Achaichia, HFC-245fa Working Fluid in Organic Rankine Cycle - A Safe and Economic Way to Generate Electricity from Waste Heat, 2010.

[8] Yiping Dai, Jiangfeng Wang \*, Lin Gao, Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery.

[9] Jamal Nouman, Master of Science Thesis, “Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles – ORC”, 2012.

[10] Bragi Árnason, Fjóla Jónsdóttir and Hjálmtýr Hafsteinsson, Light Metal Alloys for Hydrogen Storage.

[11] Hydrogen Production and Storage – R&D Priorities and Gaps, International Energy Agency.

[12] M. M. Rahman (*Member, IAENG*), Mohammed K. Mohammed and Rosli A. Bakar, Effect of Air Fuel Ratio on Engine Performance of Single Cylinder Port Injection Hydrogen Fueled Engine: A Numerical Study, 2009.

[13] K. S. VARDE and G. A. FRAME, Hydrogen aspiration in a direct injection type diesel engine--its effects on smoke and other engine performance parameters, 1983.

[14] Mohammed Kamil<sup>1</sup>, M. M. Rahman<sup>2</sup> and Rosli A. Bakar, Performance evaluation of external mixture formation strategy in hydrogen fueled engine, 2011.

## 8.2 - Outras obras

[15] Santos Fernando, Santos Fernandom O Combustivel Hidrogénio.

[16] Honeywell R245fa applications development guide.

[17] Hany Moustapha, Mark F. Zelesky, Nicholas C. Baines, David Japikse, “Axial and Radial Turbines”, 2003.

[18] Ennio Cruz da Costa, “Refrigeração”, 1986.

[19] M.S. Casper, “Hydrogen Manufacture by Electrolysis, Thermal Decomposition and Unusual Techniques”, 2007.

[20] Gabriele Zini, Paolo Tartarini, “Solar Hydrogen Energy Systems”

[21] Francis Labrique, João J. E. Santana, “Electrónica de Potência”, 1991.

[22] Antunes Jorge, “The use of hydrogen as a fuel for compression ignition engines.” 2010