



MIGUEL RODRIGO
COELHO
CONCEIÇÃO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE
ELETROLISADORES ACOPLADOS
A MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA – IMPACTO NOS
EQUIPAMENTOS USADOS NA
RECICLAGEM EM ESCOMBREIRAS
DE PEDREIRAS**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia Biológica e Química

ORIENTADOR

Professora Doutora Maria de Fátima Serralha

Fevereiro 2022

MIGUEL RODRIGO
COELHO
CONCEIÇÃO

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE
ELETROLISADORES ACOPLADOS
A MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA – IMPACTO NOS
EQUIPAMENTOS USADOS NA
RECICLAGEM EM ESCOMBREIRAS
DE PEDREIRAS**

JÚRI

Presidente: Professora Doutora Maria de Lurdes de Figueiredo Gameiro, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro / Instituto Politécnico de Setúbal

Orientador: Professora Doutora Maria de Fátima Nunes Serralha, Escola Superior de Tecnologia do Barreiro / Instituto Politécnico de Setúbal

Vogal: Doutora Ana Marta Marques Duarte da Paz, Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária

Fevereiro 2022

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus avós, pelo apoio, esforço e dedicação que constantemente têm para comigo, e por sempre estarem ao meu lado.

Obrigado, avós!

De seguida, agradeço à minha namorada Beatriz pela força, incentivo e dedicação que me dá em qualquer momento, e por me apoiar e acreditar que sou capaz, seja do que for.

Obrigado, amor!

Agradeço todo o acompanhamento e incentivo, da minha Professora Fátima Serralha, que aceitou e permitiu que me aventurasse num novo tema pouco explorado e aprofundado, num setor tão pouco solucionado nos dias de hoje, tendo conseguido obter mais conhecimento sobre esta área.

Obrigado, Professora Fátima!

Agradeço à empresa Urbereciclar Lda, por me ter permitido e ajudado a realizar este estudo para a Tese de Mestrado na ESTB/IPS. Um especial agradecimento ao Eng.º Leal Santos, pelo seu apoio, disponibilidade e incentivo que sempre teve para comigo.

Obrigado!

Também quero agradecer ao Professor Rui Borges, por se ter disponibilizado e me ter apoiado em futuras novas oportunidades.

Obrigado, Professor Rui!

Por fim, obrigado a mim próprio, pelo esforço e dedicação que imprimo em tudo o que faço, dando sempre o melhor de mim!

Resumo

As evidências científicas relativas à influência da atividade antropogénica sobre o sistema climático são cada vez mais fortes, e o aquecimento global do sistema climático é inequívoco. Assim, torna-se necessário melhorar a estratégia energética do planeta, utilizando outras formas de energia, que não sejam poluidoras ou que sejam menos poluidoras. Sendo uma das mais promissoras o hidrogénio produzido a partir de energias renováveis.

Numa situação de transição energética, no setor dos transportes e de maquinarias com motores de combustão interna, a utilização de eletrolisadores acoplados a esses motores, podem fazer parte de uma solução a médio prazo, até que novas tecnologias mais eficientes tomem o seu lugar.

Neste trabalho realizaram-se estudos de otimização da aquisição previsional do número de eletrolisadores da ULTIMATE CELL com um determinado financiamento da empresa URBERECICLAR, para três tipos de máquinas que operam na unidade extrativa a céu aberto para a produção de inertes a partir da rocha calcária no concelho da Batalha, nomeadamente os compressores da unidade de perfuração, as pás carregadoras e os *dumpers*.

Realizaram-se os estudos de otimização com duas situações diferentes, numa situação utilizou-se o número real de máquinas existentes na pedreira e na outra o triplo das máquinas existentes de cada tipo. Nos estudos realizados utilizaram-se os preços do gasóleo com os valores de fevereiro e de novembro de 2021. Para a situação real e para a situação triplicada, obteve-se um investimento, com todas as máquinas equipadas com eletrolisadores, de 18.720,00 € e 56.160,00 €, respetivamente.

A média dos períodos de retorno do investimento da aquisição de eletrolisadores para a situação real considerando o preço do gasóleo no mês de fevereiro e no mês de novembro de 2021 é de 4,66 e 3,71 meses, respetivamente. Para a situação triplicada considerando o preço do gasóleo no mês de fevereiro e no mês de novembro de 2021 é 4,51 e 3,59 meses, respetivamente.

Calculou-se também a quantidade de combustível economizando durante dois anos, com a utilização do maior número de eletrolisadores, que consistiu em 75.629 L no caso da situação real e 226.887 L no caso da situação triplicada. A redução das emissões de CO₂ obtida durante os dois analisados foi de 200.416 e de 601.249 Kg para a situação real e triplicada, respetivamente.

Com os valores obtidos através das simulações efetuadas ao longo deste trabalho constata-se que a acoplagem dos eletrolisadores aos motores de combustão interna é um processo exequível e que pode ser incorporado na estratégia do combate às alterações climáticas, além de permitir uma aquisição economicamente viável para empresas que contenham motores de combustão interna, permitindo reduzir custos através da poupança no combustível e consecutivamente contribuir para a redução de CO₂.

Palavras-chaves: transição energética, descarbonização, hidrogénio, eletrolisadores, eletrólise, motor de combustão interna.

Abstract

Scientific evidence regarding the influence of anthropogenic activity on the climate system is increasingly strong, and the global warming of the climate system is unequivocal. Thus, it becomes necessary to improve the energy strategy of the planet, using other forms of energy, which do not pollute or are less polluting. One of the most promising is hydrogen produced from renewable energies.

In a situation of energy transition, in the transport and machinery sector with internal combustion engines, the use of electrolyzers coupled to these engines may be part of a medium-term solution, until new more efficient technologies take their place.

In this work, studies were carried out to optimize the provisional acquisition of the number of electrolyzers from ULTIMATE CELL with a certain financing from the company URBERECICLAR, for three types of machines that operate in the open-air extractive unit for the production of aggregates from limestone rock in the Batalha, namely the drilling unit compressors, loaders and dumpers.

The optimization studies were carried out with two different situations, in one situation the actual number of machines existing in the quarry was used and in the other the triple of the existing machines of each type was used. In the studies carried out, diesel prices were used with the values of February and November 2021. For the real situation and for the triplicate situation, an investment was obtained, with all machines equipped with electrolyzers, of € 18,720.00 and €56,160.00, respectively.

The average payback periods for the acquisition of electrolyzers for the real situation considering the price of diesel in February and November 2021 is 4.66 and 3.71 months, respectively. For the triplicate situation considering the price of diesel in the month of February and in the month of November 2021, it is 4.51 and 3.59 months, respectively.

The amount of fuel saved in the two years analysed in this study was also calculated, which consisted of 75,629 L in the case of the real situation and 226,887 L in the case of the triplicate situation. The reduction in CO₂ emissions obtained during the two analysed periods was 200,416 and 601,249 Kg for the real situation and tripled, respectively.

With the values obtained through the simulations carried out throughout this work, it appears that the coupling of electrolyzers to internal combustion engines is a feasible process that can be incorporated into the strategy to combat climate change, in addition to allowing an economically viable acquisition for companies that contain internal combustion engines, allowing to reduce costs through fuel savings and consecutively contributing to the reduction of CO₂.

Keywords: energy transition, decarbonization, hydrogen, electrolyzers, electrolysis, internal combustion engine.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract	viii
Índice de Figuras	xiv
Índice de Tabelas.....	xvi
Siglas e Abreviaturas	xix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 DEPENDÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	3
2.2 NECESSIDADE DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES POLUENTES	5
2.3 HIDROGÉNIO COMO VETOR ENERGÉTICO	9
2.4 ELETROLÍSE	13
2.5 ELETROLISADOR	14
2.6 TIPOS DE ELETROLISADORES	16
2.6.1 ELETROLISADOR ALCALINO	16
2.6.2 ELETROLISADOR COM MEMBRANA DE TROCA DE PROTÕES	17
2.6.3 ELETROLISADOR DE ÓXIDO SÓLIDO	19
2.7 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	20
2.7.1 MOTOR A GASOLINA	21
2.7.2 MOTOR A GASÓLEO	23
2.8 ACOPLAÇÃO DO ELETROLISADOR AO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA	25
3. CARATERIZAÇÃO DAS EMPRESAS	28
3.1 CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA URBERECICLAR E DAS MÁQUINAS EM ESTUDO	28

3.2 CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA ULTIMATE CELL	32
4. MÉTODOS.....	34
4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	34
4.2 O SISTEMA DE MODELAÇÃO ALGÉBRICA (GAMS).....	37
4.3 SIMULAÇÃO COM O NÚMERO REAL DE MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL EM FEVEREIRO DE 2021	39
4.4 SIMULAÇÃO COM O NÚMERO REAL DE MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE NOVEMBRO DE 2021	41
4.5 SIMULAÇÃO COM O TRIPLO DAS MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE FEVEREIRO DE 2021	42
4.6 SIMULAÇÃO COM O TRIPLO DAS MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE NOVEMBRO DE 2021.....	43
4.7 CÁLCULO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E DA QUANTIDADE DE EMISSÕES DE CO₂.....	45
4.8 CÁLCULO DO PERÍODO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	46
4.9 CÁLCULO DA MÉDIA E DO DESVIO-PADRÃO DO PERÍODO DE RETORNO.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 ANÁLISE DOS ELETROLISADORES DISPONÍVEIS EM PORTUGAL	48
5.2 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO E TIPOLOGIA DE MÁQUINAS COM ELETROLISADORES NO CENÁRIO REAL.....	50
5.3 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO E TIPOLOGIA DE MÁQUINAS COM ELETROLISADORES NO CENÁRIO DO TRIPLO DAS MÁQUINAS	53
5.4 REDUÇÃO DAS QUANTIDADES DAS EMISSÕES DE CO₂	58
6. CONCLUSÃO.....	60
7. Bibliografia.....	63
Apêndices.....	68
Apêndice 1.....	69
Anexos	73

Anexo I.....	74
Anexo II.....	75
Anexo III.....	81

Índice de Figuras

Figura 1: Consumo mundial de energia. Traduzido (EIA, 2019).	3
Figura 2: Consumo global de energia primária por fonte de energia. Traduzido (EIA, 2019)..	4
Figura 3: Emissões globais de gases de efeito de estufa por setor económico. Traduzido e adaptado (IPCC, 2014).	6
Figura 4: Emissões de dióxido de carbono (CO ₂) nos RCPs (linhas) e as categorias de cenário associadas usadas no Working Group III (as áreas coloridas mostram uma faixa de 5 a 95%. Traduzido (Pachauri et al., 2015).	8
Figura 5: Hidrogénio como vetor energético: origem, opções de produção, opções de armazenamento e diferentes utilizações. Traduzido e adaptado (Abdin et al., 2020).	11
Figura 6: Issues Map da estratégia global do hidrogénio (WEC, 2021).	12
Figura 7: Configuração do módulo de eletrólise: módulo unipolar e módulo bipolar. Traduzido (Ursúa et al., 2012).	15
Figura 8: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrolisador alcalina. Traduzido (Ursúa et al., 2012).	16
Figura 9: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula PEM. Traduzido (Ursúa et al., 2012).	18
Figura 10: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula SOE. Traduzido (Ursúa et al., 2012).	19
Figura 11: Motor a gasolina a quatro tempos. Traduzido (Stevens, 2021).	22
Figura 12: Motor a gasóleo a quatro tempos. (Oliveira Peça, 2012).	24
Figura 13: Consumo de gasóleo para os vários modos de operação sem eletrolisadores (1ºensaio) e com eletrolisadores (2º ensaio) (DTEA, 2013).	27
Figura 14: Unidade extrativa a céu aberto para a produção de inertes a partir da rocha calcária no concelho da Batalha.	30
Figura 15: Máquinas usadas na pedreira em estudo A- compressor da unidade de compressão, B- pá carregadora, C- dumper (Consultado nas fichas técnicas).	30
Figura 16: Diferentes dispositivos da Ultimate Cell para motores de combustão interna (Ultimate Cell, 2019).	32
Figura 17: Screenshot da simulação no programa GAMS com a indicação das variáveis usadas.	38

Figura 18: Screenshot da simulação no programa GAMS referente à definição do modelo e do solver usados.....	39
Figura 19: KIT DC4000 T da HHO Plus (HHO Plus, n.d.)	48
Figura 20: Ultimate Cell Truck Engine da Ultimate Cell (Ultimate Cell, 2019).....	49
Figura 21: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação real e referente ao preço do combustível ao preço de fevereiro 2021.	50
Figura 22: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação real e referente ao preço do combustível ao valor de novembro. .	52
Figura 23: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação triplicada referente ao preço do combustível ao preço de fevereiro.	54
Figura 24: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação triplicada e referente ao valor de novembro do preço do combustível.	56

Índice de Tabelas

Tabela 1- Projeção da mudança da temperatura média global da superfície terrestre para meados e finais do século 21 (Pachauri et al., 2014)	9
Tabela 2- Vantagens e desvantagens da eletrólise nos diferentes tipos de eletrolisadores. Traduzido e adaptado (Carmo et al., 2013).....	20
Tabela 3- Modo de operação das máquinas e o seu consumo mensal (informação verbal Urbereciclar) ¹	36
Tabela 4- Custo de combustível em fevereiro e novembro de 2021.....	36
Tabela 5- Custo mensal do gásóleo para cada tipo de máquina assumindo o preço de fevereiro e de novembro de 2021	36
Tabela 6- Unidades e custos de UCTE propostas pela empresa Ultimate Cell para cada tipo de máquina e respectivas recargas (informação verbal Urbereciclar) ¹	37
Tabela 7- Parcelas da função objetivo da situação real referente ao preço do combustível de fevereiro de 2021	40
Tabela 8- Parcelas da função objetivo da situação real referente ao preço do combustível de novembro de 2021	41
Tabela 9- Parcelas da função objetivo da situação triplicada referente ao preço do combustível de fevereiro de 2021	42
Tabela 10- Parcelas da função objetivo da situação triplicada referente ao preço do combustível de novembro de 2021.	44
Tabela 11- Parcelas e seus significados no cálculo da quantidade de combustível sem a utilização de eletrolisadores.....	45
Tabela 12- Parcelas do cálculo da quantidade de combustível com a utilização de eletrolisadores acoplados	46
Tabela 13- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno referente à situação real com preço do gásóleo de fevereiro de 2021. ..	51
Tabela 14- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e período de retorno referente à situação real e com preço do gásóleo de novembro de 2021.	52
Tabela 15- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno obtido da situação triplicada com preço do gásóleo em vigor em fevereiro de 2021.....	54

Tabela 16- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno obtido da situação triplicada com preço do gasóleo em novembro de 2021.	56
---	----

Tabela 17- Resultados do cálculo do combustível de cada situação e das respetivas emissões de CO ₂ em dois anos.	58
--	----

Siglas e Abreviaturas

CMIP5	Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado - Fase 5
EPDM	Borracha de Etileno-Propileno-Dieno
GAMS	Sistema Geral de Modelação Algébrica
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
GPS	Sistema de Posicionamento Global
HadCRUT4	Conjunto 4 de Dados da Temperatura de Superfície do Centro de Pesquisa Climática de Hadley
NEDC	Novo Ciclo de Condução Europeu
NOAA	Administração Oceânica e Atmosférica Nacional
OBD	Diagnóstico de Bordo
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OMS	Organização Mundial de Saúde
PEM	Membrana de Troca de Protões
PNEC2030	Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030
RCP	Caminhos Representativos de Concentração
RCN2050	Roteiro para a Neutralidade de Carbono 2050
SOEC	Eletrolisador de Óxido Sólido
UCBE	Ultimate Cell Boat Engine
UCCE	Ultimate Cell Car Engine
UCTE	Ultimate Cell Truck Engine
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas
VSP	Potência Específica do Veículo
WGIII	Grupo de trabalho III

1. INTRODUÇÃO

Atualmente atravessamos uma fase transitória em vários níveis, nomeadamente, a nível energético. Para que a transição seja feita de forma gradual e que seja aceite e acolhida pela comunidade, devem-se desenvolver soluções que possam ser opções reais, que promovam uma mudança no sentido da preservação do planeta Terra, para que desta forma seja possível promover a sua sustentabilidade.

Por outro lado, o aumento da população mundial e da atividade económica faz com que as atuais formas de consumo de energia aumentem, tendo como resultado o incremento das emissões globais de CO₂, anuais, pelo que existe a necessidade de se reduzir o consumo de formas de energia responsáveis pela emissão de gases com efeito de estufa.

Neste contexto, as alterações climáticas e os seus impactos negativos ao serem reconhecidos pela comunidade internacional, desencadearam um processo para a implementação de medidas para solucionar a situação, tendo sido feitos acordos e estabelecidas metas a atingir. O Acordo de Paris em 2015 estabeleceu a necessidade de redução das emissões dos gases de estufa, a fim de conter o aumento da temperatura média da Terra. A partir deste Acordo estipulou-se metas para cada país envolvido, para o período entre 2030 e 2050, apelando também ao consumo maioritário de energias renováveis, à neutralidade de carbono, entre outros objetivos.

Torna-se assim imperativo o desenvolvimento de políticas que criem condições para o desenvolvimento da descarbonização da economia, da sociedade e para a transição energética. Outro fator extremamente importante nesta fase transitória energética, é o cidadão comum. Os cidadãos informados representam um vetor muito importante para a adoção de escolhas mais eficientes e sustentáveis, reforçando assim os esforços para alcançar a neutralidade de carbono.

Assim, surge o interesse pelo hidrogénio, um dos elementos mais abundantes no universo, e de enorme potencial energético, que tem sido usado e explorado nos mercados de energia estacionária, do transporte, e em diversas indústrias. O hidrogénio é um vetor energético viável desde a sua utilização em pequena a larga escala.

O setor mineiro, devido à exploração de recursos minerais em especial a céu aberto e do elevado consumo de combustível pelas máquinas usadas para a mineração, entre outros fatores tem sido bastante denegrido do ponto de vista ambiental. Para melhorar a visão e reputação que possui, este setor deve evoluir tecnologicamente, contribuindo para a transição energética, proporcionando maior sustentabilidade e tornando este setor mais verde.

Deste modo, surgiu o interesse em mudar a opinião acerca deste setor e minimizar os seus efeitos poluidores, optando por soluções rentáveis, menos poluentes e mais sustentáveis em termos ambientais. Em conjunto com a empresa URBERECICLAR Lda, houve interesse em se estudar esses fatores, de modo a melhorar a opinião pública acerca das pedreiras e minas,

bem como a sustentabilidade das mesmas e em simultâneo avaliar a aplicabilidade da implementação dos eletrolisadores acoplados nos motores de combustão.

A empresa URBERECICLAR apresentou a situação de aquisição de eletrolisadores da ULTIMATE POWER para aplicação na maquinaria usada que pretendia otimizar. A empresa e a Escola Superior de Tecnologia do Barreiro proporcionaram o estudo de um caso real que permitiu o desenvolvimento desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEPENDÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

Os sistemas de energia da maioria dos países, desenvolvidos ou em desenvolvimento, têm como base a combustão de combustíveis fósseis (Sugiawan & Managi, 2019). Com a facilidade do uso dos combustíveis fósseis devido ao extenso conhecimento dos mesmos, o seu uso apresenta diversos problemas que foram analisados e abordados em diversos estudos. Nestes problemas estão incluídos, os impactos ambientais, a sua escassez, o risco de abastecimento e instabilidade de preços e ainda dos mercados. Em grande parte por causa destes problemas, os combustíveis fósseis são o alvo principal da mudança para economias de baixo carbono (Pillot et al., 2019).

De acordo com o *International Energy Outlook 2019* o consumo mundial de energia irá sofrer um aumento de quase 50% entre os anos de 2018 a 2050 como indicado na figura 1, estando projetado que em 2050, cerca de 70% da energia será proveniente de combustíveis fósseis (EIA, 2019).

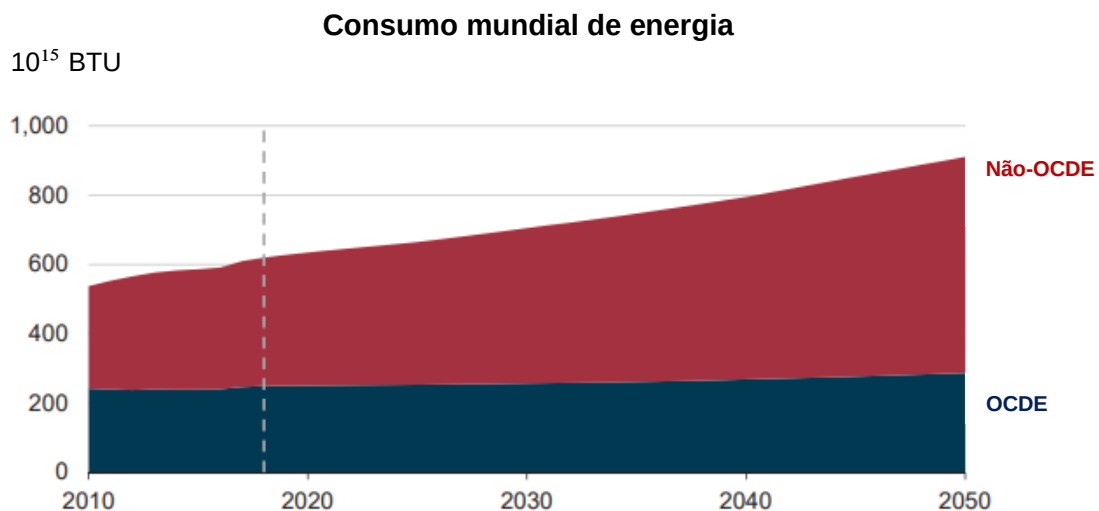


Figura 1: Consumo mundial de energia. Traduzido (EIA, 2019).

Como se pode verificar pela figura 1, a maior percentagem do aumento no consumo de energia vem de países não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE), onde o largo crescimento económico, o maior acesso à energia comercializada e rápido crescimento populacional destas regiões, levam inevitavelmente a um aumento no consumo de energia (EIA, 2019).

Em relação aos países da OCDE, a previsão do crescimento do consumo de energia é menos acentuada, devido a uma estabilidade na densidade populacional e de um crescimento

económico constante, melhorias na eficiência energética e de um menor crescimento nas indústrias com um uso intensivo de energia (EIA, 2019).

O consumo de energia em países não pertencentes à OCDE representa então um aumento de quase 70% entre 2018 e 2050, em contraste com o aumento de 15% nos países pertencentes à OCDE (EIA, 2019).

Energia renovável torna-se a principal fonte de consumo de energia primária em 2050

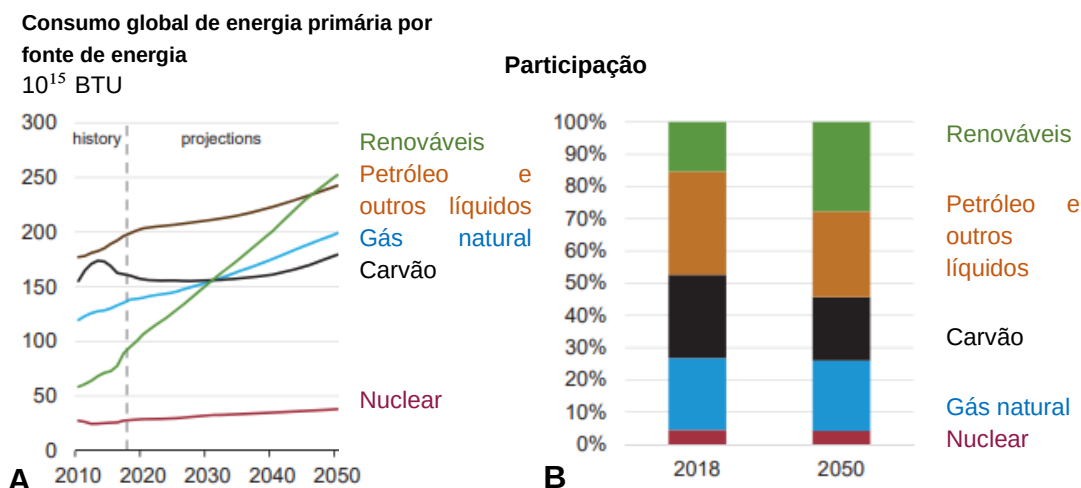


Figura 2: Consumo global de energia primária por fonte de energia. Traduzido (EIA, 2019).

Com a consequência do aumento da procura de eletricidade com pressões económicas e políticas, o consumo mundial de energia renovável aumentará 3% ao ano entre 2018 e 2050, já o consumo de energia nuclear tem um acréscimo de 1% ao ano indicado no gráfico A da figura 2 (EIA, 2019).

De acordo com o gráfico B da figura 2, apesar da energia renovável (solar, eólica, hídrica, geotérmica, etc) ser a forma de energia com o maior crescimento previsto, os combustíveis fósseis continuam a fornecerem grande parte da energia a nível mundial.

A parcela correspondente ao consumo de energia primária, proveniente de petróleo e afins, têm um decréscimo de 32% em 2018 para 27% em 2050, este ligeiro decréscimo pode ser verificado no gráfico B da figura 2. Em termos absolutos, o consumo de petróleo e os seus derivados aumenta nos setores industrial, comercial e de transporte e diminui nos setores residenciais e elétricos (EIA, 2019).

O gás natural é o combustível fóssil em que é esperado o crescimento mais rápido, sendo este de 1,1% ao ano, em comparação com o crescimento de 0,6% ao ano do petróleo e dos seus derivados e 0,4% do carvão ao crescimento do ano (EIA, 2019).

Por causa dos custos e de fatores políticos, é esperado que em certas regiões substituam o carvão por gás natural e renováveis para a produção de eletricidade, sendo assim é antecipado uma diminuição do uso de carvão até 2030. Mas na década de 2040, é conjecturado

um aumento no uso de carvão, resultante do aumento do uso industrial e do aumento do uso na geração de energia elétrica na Ásia não pertencente à OCDE, exceto na China (EIA, 2019).

Atualmente, a humanidade está muito dependente ainda dos combustíveis fósseis, e se esta tendência permanecer, as suas reservas vão-se esgotar eventualmente, a poluição atmosférica atingirá níveis críticos e as alterações ambientais irão intensificarem-se. De modo a estimular uma economia de baixo carbono é preciso ter como objetivo a descarbonização do planeta, para isso é fundamental travar e começar a diminuir a dependência dos combustíveis fósseis. Para compensar, existem diversas opções como as energias renováveis e o hidrogénio, oferecendo praticamente matéria-prima ilimitada com efeitos negativos mínimos e boas taxas de rendimento.

2.2 NECESSIDADE DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES POLUENTES

O Índice Anual de Gases de Efeito Estufa dos Estados Unidos, que é usado pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) para determinar a influência do aquecimento global provocado pelos gases de efeito estufa de longa duração, entre os anos 1990 e 2016 teve um aumento de 40% das emissões (NOAA, 2017).

As emissões globais de CO₂ provenientes da combustão de combustíveis atingiram um máximo histórico de 33,5 Gt de CO₂ em 2018 impulsionados por um grande crescimento da população mundial e da atividade económica. Em 2019 relatou-se um declínio nas emissões inferior a 1%, em grande parte devido ao setor de produção de energia em países desenvolvidos, e às condições meteorológicas mais amenas em todos os continentes o que leva a uma menor necessidade de produção de aquecimento (IEA, 2021).

De forma a avaliar-se a influência dos sectores económicos analisou-se a produção das emissões em 2010 e a maioria destas foram gerados a partir da combustão de combustível fóssil (carvão, gasóleo, gasolina, petróleo e gás natural) para a produção de eletricidade para os diferentes setores económicos, como se encontra representado na figura 3 (EPA, 2021).



Figura 3: Emissões globais de gases de efeito de estufa por setor económico. Traduzido e adaptado (IPCC, 2014).

De acordo com os dados provenientes da Contribuição do Grupo de Trabalho III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, indicados na figura 3, 25% das emissões globais de gases com efeito estufa em 2010 foram provenientes da produção de eletricidade e aquecimento através da queima de carvão, gás natural e do petróleo (IPCC, 2014)

A indústria representou cerca de 21% das emissões globais de gases com efeito estufa em 2010. A emissão de gases com efeito estufa da indústria envolvem principalmente combustíveis fósseis queimados no local, em instalações de produção de energia para a sua atividade. Este setor também possui grandes taxas de emissões derivados dos processos de transformação química, metalúrgica e mineral não associados ao consumo de energia e emissões de atividades de gestão de resíduos (IPCC, 2014).

Já a agricultura, silvicultura, desflorestação e outros usos da terra tiveram um peso de 24% das emissões globais de gases com efeito de estufa de 2010 (IPCC, 2014). O cálculo deste valor não incluiu o CO₂ que os ecossistemas utilizam da atmosfera, sequestrando carbono na biomassa, matéria orgânica morta e solos, e que podem compensar aproximadamente até 20% das emissões desse setor (Fao, 2014).

A emissão de gases de efeito estufa do setor dos transportes envolvem principalmente combustíveis fósseis que se traduziram em 14% das emissões globais de gases de efeito estufa referente aos dados de 2010. Este setor dos transportes engloba o transporte rodoviário, ferroviário, aéreo e marítimo. Praticamente toda a energia de transporte do mundo, (95%), vem de combustíveis derivados do petróleo, principalmente gasolina e gasóleo, por isso é um setor com uma elevada taxa de emissões (IPCC, 2014)

Os edifícios representaram cerca de 6% das emissões globais de gases de efeito estufa em 2010. As emissões deste setor provêm da geração de energia no local e da queima de combustíveis para aquecimento em edifícios ou para as atividades domésticas. A eletricidade usada em edifícios é abrangida pelo setor da produção de eletricidade e aquecimento (IPCC, 2014).

Os outros 10% das emissões globais de gases de efeito estufa de 2010 foram referentes ao setor de energia que não estão diretamente associadas à produção de eletricidade ou aquecimento, tal como a extração de combustível, refinação, processamento e transporte (IPCC, 2014).

A queima de combustível fóssil nos países desenvolvidos para produção de eletricidade e aquecimento, e também a queima de biomassa em países em desenvolvimento foram responsáveis pela maior parte da poluição atmosférica global, originando 85% das partículas e quase todos os óxidos de enxofre e óxidos de azoto à escala mundial no ano de 2015 (IEA, 2016).

A poluição atmosférica, manifesta-se praticamente em todo o mundo, afetando assim todas as populações. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) apenas uma pessoa em cada dez mora numa cidade que cumpre as diretrizes de qualidade do ar da OMS. Segundo também a OMS, existiam cerca de 2 mil milhões de crianças a viverem em áreas que ultrapassam a diretriz anual da OMS para partículas finas, que é de $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Esta diretriz indica a concentração de partículas finas que a partir da qual constitui um perigo de inalação de longo prazo (WHO, 2006).

Outro grande problema derivado das emissões dos gases de efeito estufa são as alterações climáticas, que compreendem a mudança dos padrões climáticos, que ameaçam a produção de alimentos, que são responsáveis da subida do nível das águas do mar e que por isso aumentam o risco de inundações. Sem ações drásticas e urgentes que permitam minimizar as alterações climáticas, tornar-se-á cada vez mais difícil para o ser humano adaptar-se aos efeitos devastadores do aquecimento global a que se avizinha (ONU, 2019).

Já foi demonstrado cientificamente que (ONU, 2019):

- A concentração de gases de efeito estufa na atmosfera está diretamente ligada ao aumento da temperatura média global da Terra;
- A concentração destes gases tem aumentado constantemente, tal como as temperaturas globais, desde a época da Revolução Industrial;
- O mais abundante responsável por cerca de dois terços dos gases de efeito estufa, é o CO_2 , e resulta em grande parte da queima de combustíveis fósseis.

Com a continuação de emissões de gases de efeito estufa, as alterações climáticas irão ficar mais intensas, podendo chegar mesmo à irreversibilidade de certos fenómenos ambientais. Várias projeções destas emissões foram desenvolvidas dependendo do desenvolvimento socioeconómico e da política climática (Pachauri et al., 2014)

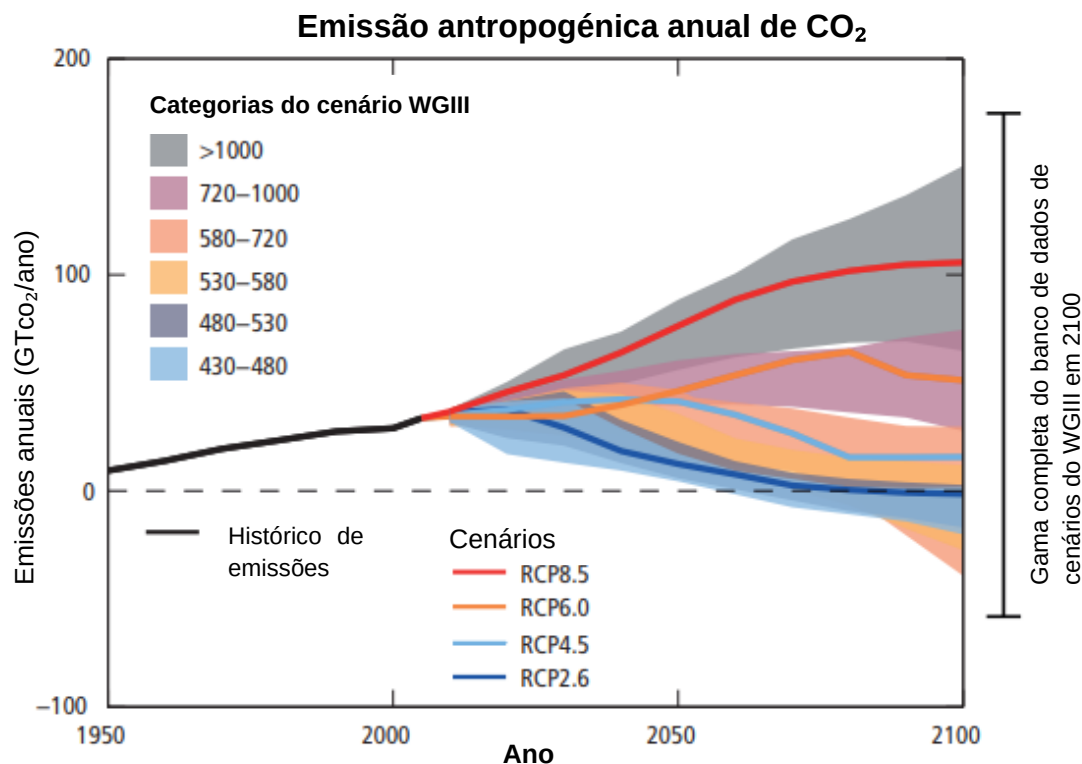


Figura 4: Emissões de dióxido de carbono (CO₂) nos RCPs (linhas) e as categorias de cenário associadas usadas no Working Group III (as áreas coloridas mostram uma faixa de 5 a 95%). Traduzido (Pachauri et al., 2015).

Tendo como grande impulsionador o aumento populacional, as emissões antropogénicas aumentam consequentemente, colocando o planeta em extrema pressão. De modo, a ter uma melhor perspetiva sobre o futuro do clima, foram desenvolvidos Caminhos Representativos de Concentração (RCPs), representados na figura 4 e desenvolvidos pelo Working Group III (WGIII) que têm como objetivo projetar quatro cenários diferentes no presente século. Destes quatro, o RCP2.6 indica um cenário de mitigação rigorosa, o RCP4.5 e o RCP6.0 representam cenários intermédios, já o RCP8.5 demonstra um caminho com emissões de gases de efeito estufa muito altas, sem quaisquer reforços para restringir as emissões. O RCP2.6 traduz um cenário que visa manter o aquecimento global inferior a 2°C acima das temperaturas pré-industriais (Pachauri et al., 2014).

O futuro do clima terrestre depende do aquecimento global provocado pelas emissões das atividades humanas além da variabilidade climática natural. A alteração global da temperatura prevista para o período 2016-2035 é idêntica para os quatro diferentes RCPs em relação ao período de 1986-2005 e estará compreendida na faixa de 0,3 a 0,7°C, supondo que não haverá nenhum evento natural extremo em termos de emissões de gases de efeito estufa. A partir da metade do século atual, as mudanças climáticas estarão diretamente dependentes do RCP escolhido, que estão indicados na tabela 1 (Pachauri et al., 2014).

Tabela 1- Projeção da mudança da temperatura média global da superfície terrestre para meados e finais do século 21 (Pachauri *et al.*, 2014)

		2046-2065		2081-2100		
		Cenário	Média	Intervalo provável ^b	Média	Intervalo provável ^b
Mudança da temperatura média da superfície global (°C) ^a	RCP2.6	1,0	0,4 to 1,6	1,0	0,3 to 1,7	
	RCP4.5	1,4	0,9 to 2,0	1,8	1,1 to 2,6	
	RCP6.0	1,3	0,8 to 1,8	2,2	1,4 to 3,1	
	RCP8.5	2,0	1,4 to 2,6	3,7	2,6 to 4,8	

^a Baseado no Projeto de Intercomparação de Modelo Acoplado - Fase 5 (CMIP5), mudanças calculadas em relação ao período 1986-2005, usando Conjunto 4 de Dados da Temperatura de Superfície do Centro de Pesquisa Climática de Hadley (HadCRUT4) e a sua estimativa de incerteza (intervalo de confiança de 5 a 95%), o aquecimento global que se observou de 1850-1900 até ao período de referência de 1986-2005 é de 0,61 [0,55 a 0,67] °C (Pachauri *et al.*, 2014).

^b Calculado a partir das projeções em intervalos do modelo de 5 a 95%. Esses intervalos são avaliados como intervalos prováveis após a contabilização de incertezas adicionais ou diferentes níveis de confiança nos modelos. Para projeções da mudança da temperatura média global no período de 2046–2065, a confiança é média, porque a importância relativa da variabilidade interna natural e a incerteza no forçamento e resposta de gases de efeito estufa são maiores do que em comparação para o período de 2081–2100. Os intervalos prováveis para 2046–2065 não têm em consideração a possível influência de fatores que levam ao intervalo avaliado para mudança de curto prazo (2016–2035) na temperatura média global da superfície, pois a influência desses fatores nas projeções de longo prazo não foi quantificada devido ao insuficiente conhecimento científico (Pachauri *et al.*, 2014).

O aumento da temperatura média global da superfície global, pré-determinado, para o final do século XXI, mais concretamente, no período 2081–2100 em relação a 1986–2005, com base nos quatro RCPs é cerca de 0,3 a 1,7 °C partindo do RCP2.6, de 1,1 a 2,6 °C através do RCP4.5, de 1,4 a 3,1 °C sob o RCP6.0 e de 2,6 a 4,8 °C com o RCP8.5 (Pachauri *et al.*, 2014).

Num futuro incerto há uma grande probabilidade de ocorrerem temperaturas extremas quentes e menos frias mais frequentes, na maioria das áreas terrestres, conforme a temperatura média global da superfície vá aumentando. Será também previsível que as ondas de calor ocorram com uma maior frequência e uma maior duração, porém, os eventos extremos ocasionais do frio de inverno também continuarão a decorrer (Pachauri *et al.*, 2014).

2.3 HIDROGÉNIO COMO VETOR ENERGÉTICO

O planeta Terra tem enfrentado situações adversas recentes, provocadas pela atividade antropogénica, com tendência a agravar. De modo a minimizar estas situações, foi estabelecido em 2015 o Acordo de Paris, que determinou objetivos para a contenção do aumento máximo de 2 °C da temperatura média global, tendo a comunidade internacional assumido como compromisso reunir todos os esforços para que não se ultrapasse os 1,5 °C. As metas nacionais estabelecidas no âmbito da política energética até 2030, compostas no

Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC2030), têm como base a redução em 45 a 55 % dos gases efeitos de estufa emitidos, a produção de energia de 47 % energias renováveis, adesão de 20 % de energias renováveis no setor dos transportes, e o aumento de 35 % de eficiência energética. Estes objetivos foram estabelecidos comparativamente com os níveis de 2005 (PNEC2030, 2019).

Em 2016, durante a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (UNFCCC), Portugal propôs a adoção de atingir a neutralidade carbónica até 2050, elaborando assim o Roteiro para a Neutralidade de Carbono 2050 (RCN2050). O RCN 2050, publicado através da Resolução do Conselho de Ministros nº 107/209 de 1 de julho de 2019 integrou a redução das emissões de gases com efeito de estufa em mais de 85 %, em referência ao valor de 2005 (RNC2050, 2019).

Na análise estratégica do setor energético da economia mundial existe uma questão muito importante a ter em conta, que é o facto do esgotamento dos combustíveis convencionais não renováveis estar previsto num futuro relativamente próximo, nomeadamente carvão em 2130, gás natural em 2068 e petróleo em 2067. Prevê-se então, que os preços destes irão aumentar de uma forma contínua até ao seu esgotamento (bp, 2016). Para além da questão da diminuição da energia disponível acresce o facto destas fontes serem extremamente poluidoras, principalmente durante o seu processo de combustão. Com o consumo global de energia aumentando em média 1 a 2 % ao ano, entre 1800 a 2019, tem provocado inevitavelmente um crescimento nos níveis de emissão de CO₂, que por sua vez promove as alterações climáticas (Ritchie & Roser, 2020). De facto, o efeito da poluição que se verifica na história recente do Homem provou dar origem a fenómenos catastróficos a nível ambiental, como o aumento contínuo da temperatura média na superfície terrestre, onde tem um efeito cada vez mais intenso na flora e fauna terrestre, culminando em drásticas alterações climáticas (Cârdú & Baica, 2011).

Assim é necessário que os países adotem novas políticas de modo a reduzir principalmente a poluição atmosférica e a utilizar energias limpas. No entanto, as principais energias renováveis, como a solar, a eólica, a geotérmica, apresentam pouca densidade energética em comparação com o aumento do consumo energético da humanidade. De modo a fazer frente à necessidade energética emergente mundial torna-se fundamental produzir a energia necessária, e para isso é necessário um portador de energia intermediário e não poluente de fontes de energia não convencionais, sendo um dos mais promissores o hidrogénio (Cârdú & Baica, 2011).

O hidrogénio é o elemento mais leve de todos os elementos conhecidos. É também o gás mais abundante do universo, representando cerca de 90 % do universo visível. É encontrado em muitas formas na Terra, sendo a sua forma molecular, H₂, de difícil captação na sua forma pura na atmosfera, o que leva o Homem a necessitar de extraí-lo a partir de combustíveis de hidrocarbonetos ou através do processo de eletrólise. O hidrogénio é amplamente produzido e utilizado nas indústrias de produção de fertilizantes, refinação de petróleo, produção de alimentos e metalúrgica. Mais recentemente o H₂ tem sido explorado e usado como um transportador de energia para os mercados de energia estacionária e de transporte (Meyers *et al.*, 2019). A utilização do hidrogénio como vetor energético não é uma prática recente e já foi comprovado que o hidrogénio pode ser um vetor energético tecnicamente viável como fonte de energia desde a sua utilização em pequena escala até exportações de energia química em larga escala (Abdin *et al.*, 2020). O hidrogénio concentra a maior densidade energética específica em massa entre os combustíveis químicos, nomeadamente de 120 a

142 MJ/Kg, que é o triplo do gasóleo (42,9 MJ/Kg) e também da gasolina (36,4 a 49,6 MJ/Kg) (Office Department of Energy, 2000).

Apesar da vasta abundância do hidrogénio molecular, a sua obtenção na forma elementar é geralmente um processo complexo. Como apresentado na figura 5, estes processos surgem a partir da separação da água, da conversão termoquímica de combustíveis fósseis e processos biológicos (Abdin *et al.*, 2020). Na figura 5 apresentam-se, para além das vias de produção do hidrogénio, as formas de armazenamento e as várias possibilidades de utilização do hidrogénio.



Figura 5: Hidrogénio como vetor energético: origem, opções de produção, opções de armazenamento e diferentes utilizações. Traduzido e adaptado (Abdin *et al.*, 2020).

O hidrogénio pode ser produzido de modo a contribuir para as necessidades e dar resposta às pressões tanto políticas, como sociais, como ambientais. Apresenta ainda a vantagem de poder ser utilizado como um meio de armazenamento da eletricidade renovável. Com a aplicação das diversas tecnologias do hidrogénio, é possível criar novas ligações centralizadas ou pontos descentralizados de oferta e procura, aumentando assim a flexibilidade do sistema energético (Abdin *et al.*, 2020).

Na figura 6 está representado um *Issues Map*, que representa o estado dos países face à estratégia do hidrogénio. Os pontos laranjas no canto superior direito do mapa, indicam os níveis mais altos de impacto e incerteza no problema, sendo definidos como *critical uncertainties*. Os pontos azuis, no canto inferior direito, indicam um alto impacto, mas baixa incerteza, e são definidos como *action priorities*. Na parte central do mapa está representado o nível médio relativo ao impacto e incerteza (WEC, 2021).

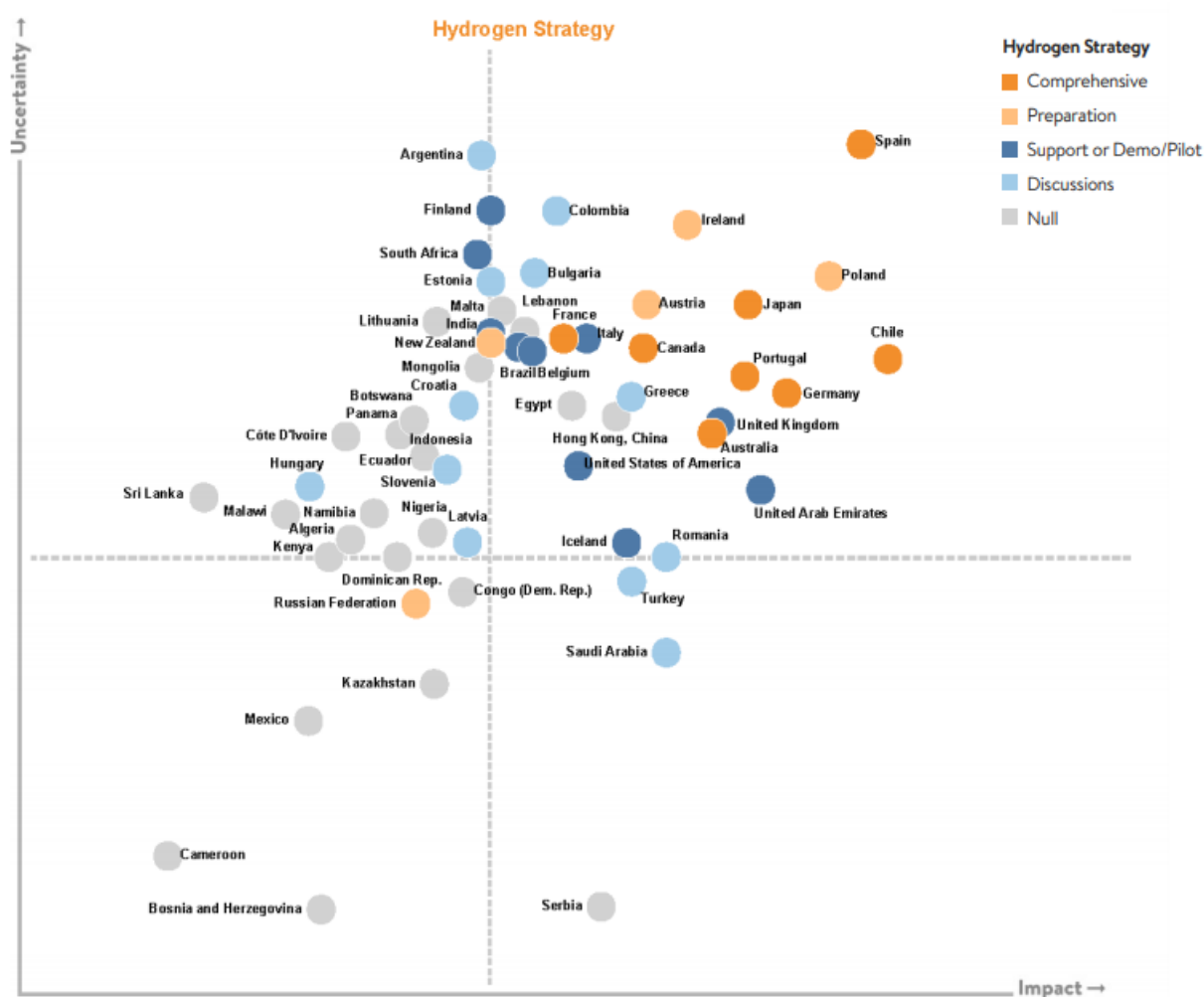


Figura 6: *Issues Map* da estratégia global do hidrogénio (WEC, 2021).

Como é possível observar no *Issue Map*, as perspetivas sobre a questão do uso do hidrogénio entre os diferentes países diferem bastante. Alguns países onde os hidrocarbonetos são abundantes, consideram o hidrogénio como uma oportunidade de continuar a utilizar os seus recursos fósseis em conjunto com tecnologias de redução de carbono, promovendo assim estes países uma economia circular de carbono (WEC, 2021). Analisando a Arábia Saudita,

destaca-se o facto de ser o segundo maior produtor de petróleo do mundo, como tal apresenta um peso significativo no impacto que pode ter no mundo sobre o uso de hidrogénio nos hidrocarbonetos. Apresenta uma baixa incerteza em relação a esta estratégia, apesar de estar ainda em discussão sobre o uso do hidrogénio, e está definida como uma *action priority*, sendo assim este um dos países-chaves para o sucesso da implementação da estratégia do hidrogénio para o combate às alterações climáticas (bp, 2021).

Nos países em desenvolvimento, com base em diálogos regionais, destaca-se o seu interesse nesta tecnologia emergente como opção para ser integrada nos seus sistemas energéticos. Relativamente a Portugal, importa salientar que é um país que compreende a urgência que há atualmente em reduzir as emissões antrópicas, e que tem uma posição favorável à estratégia do hidrogénio como vetor energético (WEC, 2021).

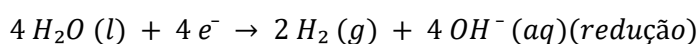
2.4 ELETRÓLISE

A eletrólise da água consiste em difundir uma corrente contínua através da água para separar as suas moléculas, em hidrogénio e oxigénio, onde os eletrões são libertados pelos iões na superfície dos elétrodos, originando um sistema multifásico gás-líquido-sólido. Mais concretamente é o processo que ocorre num sistema químico que por meio de uma força eletromotriz proveniente de uma fonte externa de energia, produz hidrogénio. O fornecimento de tensão e corrente é realizado através dos elétrodos, onde entre os quais existe um meio condutor iónico (Godula-Jopek, 2015).

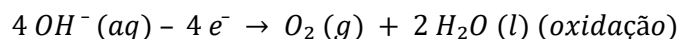
A corrente flui entre os dois elétrodos separados e imersos em um eletrólito, este serve para elevar a condutividade iónica. Os elétrodos têm que ser resistentes à corrosão, ter uma boa condutividade elétrica, além de possuírem boas propriedades catalíticas e demonstrar uma integridade estrutural adequada ao processo. O eletrólito deve ser estável o suficiente, de modo a garantir que não ocorra qualquer mudança durante o processo, evitando assim reações que possam ocorrer com os elétrodos. É necessário ainda a implementação de um diafragma para evitar a reação ocorrer no sentido inverso e permitir a recombinação do hidrogénio com o oxigénio produzido. A resistência elétrica do diafragma tem o papel de impedir o curto-circuito dos elétrodos, mas, no entanto, deve existir uma alta condutividade iónica (Ursúa *et al.*, 2012).

Quando é usada uma solução aquosa eletrolítica e, se aplica uma força eletromotriz superior a um determinado potencial mínimo, que varia conforme a solução e características do eletrolisador, há a passagem de corrente elétrica, ionizando assim a molécula de água, obtendo-se H^+ e OH^- , que por sua vez irá dar início a reações eletroquímicas (Coelho, 2013; Godula-Jopek, 2015). A primeira reação a ocorrer é a da redução, que decorre no cátodo. Os eletrões (provenientes do circuito externo) e os H^+ (existentes na solução aquosa) dirigem-se para esse eletrodo. Quando houver dois átomos de H^+ e dois eletrões, os eletrões vão reduzir os H^+ originando assim uma molécula de hidrogénio. A reação de oxidação decorre no ânodo, onde o OH^- oxida, ou seja, perde um eletrão para o ânodo, este eletrão dirige-se para o circuito externo para realizar a próxima redução. Os átomos de oxigénio que estão no ânodo, devem juntar-se e originar uma molécula de oxigénio. Estas reações estão representadas abaixo (Kleperis & Vladimir Linkov, 2012):

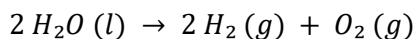
No cátodo:



No ânodo:



Global:



Para que estas reações ocorram num processo ideal, a energia mínima requerida é fornecida pela variação de entalpia do sistema (ΔH°). Esta variação é traduzida pela soma da energia livre de Gibb's (ΔG°) e da energia térmica (Q), necessitada pelo processo. A energia térmica, por sua vez, é o produto da temperatura (T) em que a reação ocorre e a variação da entropia da reação (ΔS). A fórmula para calcular então a entalpia do sistema é a seguinte (Ursúa *et al.*, 2012):

$$\Delta H^{\circ} = \Delta G^{\circ} + Q = \Delta G^{\circ} + T \Delta S \quad (1)$$

Em condições normais de pressão, 1 atm, e temperatura, 298,15 K, a ΔH° assume um valor de 285,84 kJ/mol, a ΔG° adquire um valor de 237,12 kJ/mol e a ΔS toma o valor de 0,1631kJ/(mol.K). O processo de eletrólise é uma reação endotérmica ($\Delta H > 0$) e não espontânea ($\Delta G > 0$) (Ursúa *et al.*, 2009).

Como a produção de hidrogénio através de eletrólise é um processo endotérmico, então vai obrigar a um grande consumo de eletricidade por parte dos eletrolisadores, que tem como consequência direta provoca um aumento do custo de produção de hidrogénio, tornando-se uma grande desvantagem desta tecnologia, dificultando assim a sua competitividade com outros combustíveis. No entanto, há cada vez mais a orientação de utilização de fontes de energia renováveis, especialmente nos momentos em que estas são produzidas em excesso face ao consumo, como meio de fornecer energia aos eletrolisadores, assim o processo torna-se rentável e sustentável, funcionando o hidrogénio como meio de armazenamento de energia (Pinto & Martins Da Silva, 2017).

2.5 ELETROLISADOR

O eletrolisador é um dispositivo com a capacidade de produzir hidrogénio através do processo: eletrólise e utilizam a eletricidade como fonte de energia, para separarem os átomos do hidrogénio e do oxigénio que compõem a molécula da água (Iberdrola, 2021). Os módulos de eletrólise são configurados principalmente em duas maneiras, sendo estas a configuração em série ou bipolar, e a configuração em paralelo ou unipolar, sendo esta última a mais comum (Coelho, 2013). Na figura 7 estão representadas estas configurações, onde V_{cell} e I_{cell} são a tensão e corrente elétrica de cada célula, e V_M e I_M , são a tensão e corrente elétrica do módulo (Ursúa *et al.*, 2012).

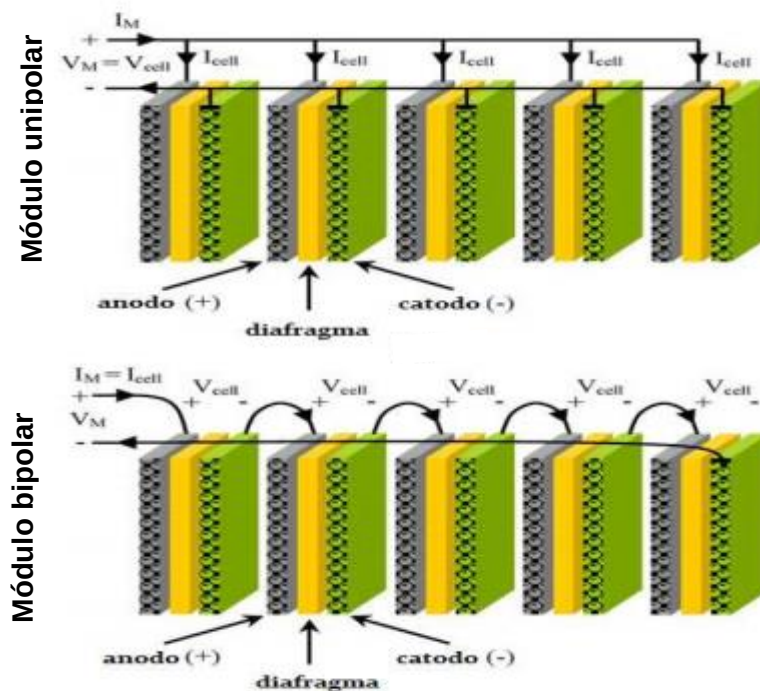


Figura 7: Configuração do módulo de eletrólise: módulo unipolar e módulo bipolar. Traduzido (Ursúa et al., 2012).

Quando são utilizados os eletrolisadores do tipo unipolar, cada eletrodo é composto por uma polaridade, esta por sua vez, é conectada diretamente à fonte de energia elétrica. Nos eletrolisadores bipolares, os eletrodos são conectados em série e fisicamente unidos através de um coletor de corrente, apresentado assim duas polaridades, definidas pelo ânodo (+) e pelo cátodo (-), exceto o primeiro e o último eletrodo, que só têm uma polaridade (Godula-Jopek, 2015; Ursúa et al., 2012).

Os eletrolisadores unipolares são mais simples e robustos, embora necessitam de mais espaço do que os bipolares. Por sua vez, os eletrolisadores bipolares têm uma configuração mais compacta devido à união e vedação das células em série, permitindo assim reduzir o espaço necessário. A configuração unipolar requer várias conexões externas que resultam em perdas adicionais. Já os eletrolisadores bipolares obtêm maiores densidades de corrente por célula em relação aos unipolares, pois têm vários canais, em geral quatro por célula, onde o eletrólito pode ser fornecido, oferecendo assim vários caminhos que facilitam o fluxo de correntes internas (Ursúa et al., 2012).

O funcionamento de um eletrolisador consiste no fornecimento de uma fonte de energia, que é conectada aos eletrodos gerando assim a corrente elétrica na água, e quando a tensão é superior ao potencial reversível termodinâmico a molécula de água separa-se. O sistema deste equipamento é ainda constituído por bombas, eletrônica de potência, separador de gases e outros componentes auxiliares (Falcão & Pinto, 2020; Iberdrola, 2021).

Os eletrolisadores são dispositivos confiáveis que não requerem uma manutenção contínua, pois dificilmente incluem componentes móveis. Além disso, têm um funcionamento silencioso e têm um elevado grau de modularidade, o que os torna adequados para aplicações descentralizadas (Ursúa et al., 2012).

2.6 TIPOS DE ELETROLISADORES

2.6.1 ELETROLISADOR ALCALINO

A eletrólise alcalina desde que foi descoberta, em 1800, tornou-se rapidamente uma tecnologia bastante estudada e usada para a produção de hidrogénio, constituindo assim a tecnologia eletrolítica mais usada comercialmente em todo o mundo (Ursúa *et al.*, 2012).

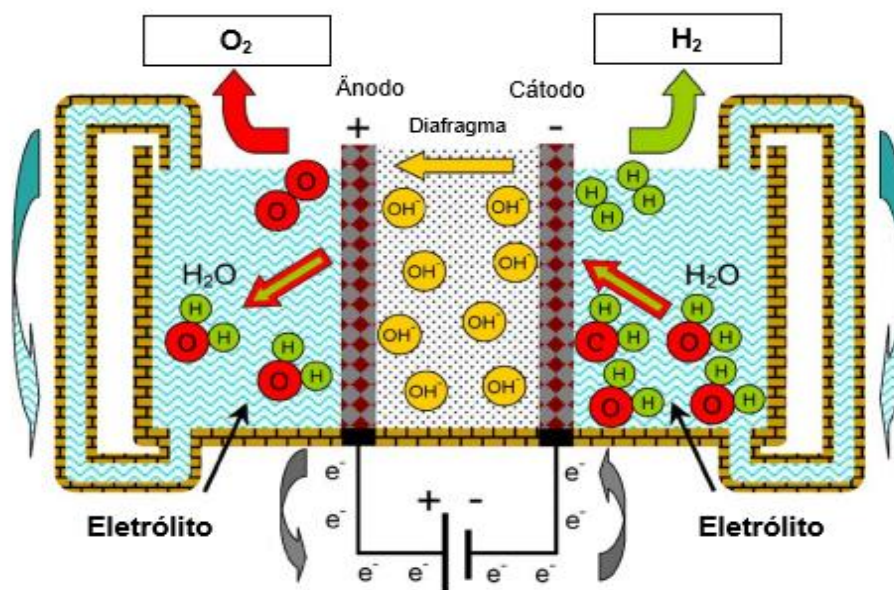


Figura 8: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula de eletrolisador alcalino. Traduzido (Ursúa *et al.*, 2012).

O princípio de operação de um eletrolisador alcalino é demonstrado na figura 8. Este dispositivo consiste em dois eletrodos, separados por um diafragma. Os eletrodos e o diafragma são imersos num eletrólito líquido, que geralmente é uma solução aquosa altamente concentrada de KOH, na ordem dos 25 a 30 %, de modo a operar com o máximo da condutividade térmica da solução, e também por causa da resistência à corrosão do aço inoxidável nesta faixa de concentração, dado que este eletrólito é o que apresenta o menor efeito corrosivo possível. (Gilliam *et al.*, 2007; Tolmasquim, 2003)

O princípio de funcionamento do eletrolisador alcalino inicia-se no cátodo, onde a água é submetida à reação de redução, produzindo aniões de hidróxido. Estes circulam através do diafragma para o ânodo, dentro do campo elétrico estabelecido pela fonte de alimentação externa. Posteriormente os aniões de hidróxido ascendem até à superfície do ânodo, dando início à reação da oxidação, produzindo oxigénio e libertando eletrões (Ursúa *et al.*, 2012).

Os níveis de pureza obtidos de hidrogénio e oxigénio podem atingir os 99,9 e 99,7% de volume, respetivamente, sem equipamento auxiliar de purificação (Ivy, 2004; Uilleberg, 2003).

Quando adquire a conformação de unipolar, o eletrodo, o ânodo e o cátodo estão suspensos com uma conexão elétrica paralela das células individuais. Já quando se trata da conformação bipolar, as células individuais estão conectadas em série elétrica (Tijani *et al.*, 2014).

Quando se utiliza a conformação unipolar há o benefício de ter menos peças e de serem simples na sua produção e manutenção, mas o seu funcionamento restringe-se a temperatura e densidade de correntes baixas. Já a conformação bipolar oferece uma maior compactação, o que permite o fornecimento de caminhos menores de correntes nos fios elétricos e eletrodos, reduzindo assim as perdas provocadas pela resistência ôhmica interna do eletrólito, aumentando a eficiência do eletrolisador. No entanto, em caso de reparação terá que atender o equipamento completo (Tijani *et al.*, 2014).

Vários problemas estão associados a este tipo de eletrolisadores, sendo um deles a faixa de carga parcial baixa, ou seja, o diafragma não impede completamente a difusão cruzada dos gases resultantes e a difusão do oxigênio presente na câmara catódica leva a uma redução da eficiência do eletrolisador. Outra grande desvantagem é a baixa densidade de corrente máximo atingível, isto devido ao facto às elevadas perdas ôhmicas, através tanto do eletrólito como do diafragma. É também de grande importância referir a impossibilidade do eletrólito líquido operar em valores altos de pressão (Carmo *et al.*, 2013).

2.6.2 ELETROLISADOR COM MEMBRANA DE TROCA DE PROTÕES

Com o objetivo de superar as desvantagens que os eletrolisadores alcalinos apresentam, a General Electric nos anos 60, criou o primeiro eletrolisador onde utilizou um polímero sólido como eletrólito (Russell *et al.*, 1973). Mais concretamente uma membrana sólida de poliestireno sulfonado. Ficando conhecido como membrana de troca de protões, ou então, membrana de eletrólito de polímero, ambos com a denominação de Membrana de Troca de Protões (PEM) (Grubb, 1959). Esta membrana assume a função de fornecer alta condutividade de protões, menores taxas de cruzamento de gás, um design de sistema compacto e uma operação de alta pressão (Carmo *et al.*, 2013).

O eletrolisador PEM adota na maioria dos casos, uma configuração bipolar, e é constituído por dois compartimentos, uma membrana fina, condutora de prótons e isolante de elétrons no centro da célula. De cada lado de fora da membrana existe uma camada de catalisador porosa onde ocorrem as reações, a membrana e a dupla camada de catalisador formam o Conjunto de Eléctrodo da Membrana (Falcão & Pinto, 2020; Grigoriev *et al.*, 2006).

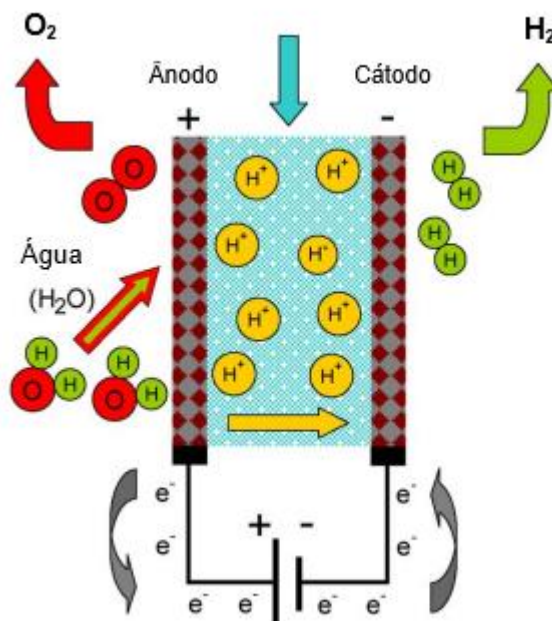


Figura 9: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula PEM. Traduzido (Ursúa *et al.*, 2012).

O funcionamento deste eletrolisador, esquematizado na figura 9, consiste na utilização da eletricidade para oxidar a água, produzindo assim oxigênio, elétrons e prótons. Estes últimos circulam através da membrana para o cátodo onde são posteriormente reduzidos, enquanto o oxigênio à medida que é produzido migra para fora do equipamento. Os elétrons circulam pelo circuito externo até ao cátodo. No lado do cátodo, os prótons de hidrogénio são reduzidos pelos elétrons, produzindo assim o hidrogénio (Falcão & Pinto, 2020; Grigoriev *et al.*, 2006).

A pureza do hidrogénio produzido a partir deste tipo de eletrolisadores é maior do que em eletrolisadores alcalinos, atingindo normalmente valores acima de 99,99% de volume, sem necessidade de equipamento auxiliar. Além disso, a baixa permeabilidade gasosa da membrana reduz o risco de formação de misturas inflamáveis (Barbir, 2005).

2.6.3 ELETROLISADOR DE ÓXIDO SÓLIDO

Os eletrolisadores de óxido sólido (SOE), são os mais recentes e ainda se encontram em estudo, apresentando já resultados muito promissores em termos de produção de hidrogénio, utilizando o vapor de água em altas temperaturas (600 a 900 °C), o que resulta em uma maior eficiência em comparação com eletrolisadores alcalinos ou PEM (Zahid *et al.*, 2010). Este tipo de eletrolisadores tem vindo assim a suscitar grande interesse para resposta às procura urgentes da transição dos combustíveis fósseis. Havendo um grande foco na pesquisa de materiais novos, melhorados e de baixo custo, mas também altamente duráveis para a construção dos eletrolisadores (Carmo *et al.*, 2013).

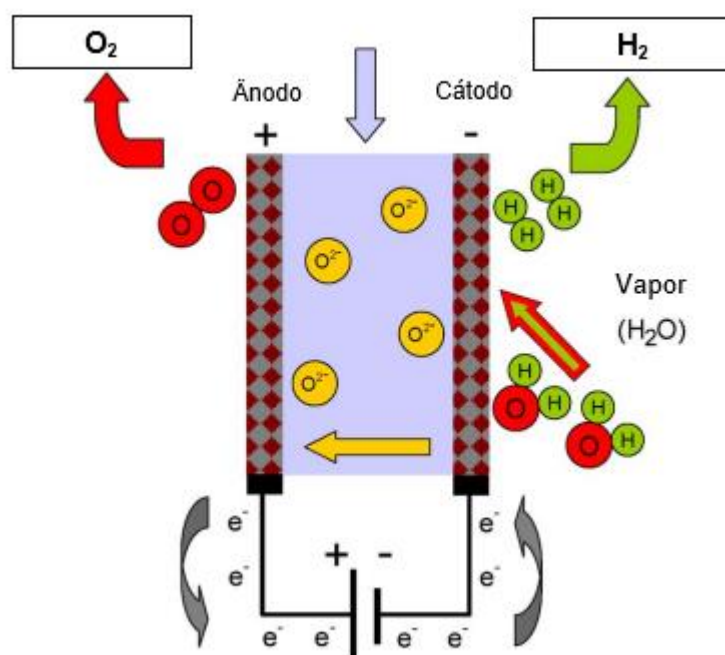


Figura 10: Esquema do princípio de funcionamento de uma célula SOE.
Traduzido (Ursúa *et al.*, 2012).

O funcionamento deste tipo de eletrolisador está representado na figura 10 e consiste na alimentação do vapor de água a um cátodo poroso. Quando aplicado o potencial elétrico para promover a eletrólise, as moléculas de água difundem-se para os locais de reação, onde dissociam-se dando origem ao gás hidrogénio e íões de oxigénio na interface do cátodo-eletrólito. O hidrogénio resultante difunde-se para a superfície do cátodo e é recolhido, enquanto os íões de oxigénio são transportados pelo eletrólito até ao ânodo. No ânodo este oxigénio é oxidado a oxigénio gasoso, sendo transportado através dos poros do ânodo para a sua superfície (Ni *et al.*, 2008).

A eletrólise a vapor surgiu com o objetivo de reduzir a intensidade energética necessária ao processo e, consequentemente, os custos operacionais da eletrólise de água líquida convencional (Salzano *et al.*, 1985).

Na tabela 2 pode-se observar as diferentes vantagens e desvantagens destes três tipos de eletrolisadores:

Tabela 2- Vantagens e desvantagens da eletrólise nos diferentes tipos de eletrolisadores. Traduzido e adaptado (Carmo *et al.*, 2013)

	Vantagens	Desvantagens
Eletrólise alcalina	Tecnologia bem definida	Baixas densidades de corrente
	Catalisadores não nobres	Cruzamento de gases
	Estabilidade a longo prazo	Baixa dinâmica
	Baixo custo	Pressões operacionais baixas
		Eletrólito líquido corrosivo
Eletrólise PEM	Altas densidades de corrente	Custo elevado dos componentes
	Eficiência em corrente de alta voltagem	Ácido corrosivo
		Baixa durabilidade
	Variação de voltagem aplicada	Pilhas inferiores à gama MW
	Sistema rápido de resposta	
	Design compacto	
	Alta pureza de gás	
Eletrólise SOE	Operação dinâmica	
Eletrólise SOE	Eficiência de 100%	Design volumoso
	Catalisadores não nobres	Pouca durabilidade
	Operação de alta pressão	Caro

2.7 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Quando a máquina é um motor de combustão interna a energia química é convertida em energia mecânica, através da combustão de uma mistura inflamável de ar e combustível (Basshuysen & Schäfer, 2004). Os motores de combustão interna são motores de pistão, que podem ser com pistão alternativo (movimento oscilante), ou podem ser pistão rotativo,

(movimento rotativo). Estas características dos motores de pistão estão dependentes da geometria da zona de exaustão, da câmara de trabalho e ainda do movimento do pistão (Bensinger, 1973). Nestes casos, o fluido de trabalho também fornece o comburentes, que é o oxigénio, necessário para a combustão. Esta combustão vai produzir um gás residual, que tem que ser substituído, num ciclo de permuta de gás, antes de cada ciclo de trabalho. A combustão toma assim, um comportamento cíclico, diferenciando pequenos pormenores no processo de combustão, dependendo do combustível usado. Os diferentes tipos de combustível mais usados, são nomeadamente, o gasóleo e a gasolina, existindo ainda os motores híbridos (Basshuysen & Schäfer, 2004).

Dependendo do tipo de combustão que vai ocorrer no motor, devido ao combustível usado, a combustão pode desempenhar o ciclo Otto ou o ciclo gasóleo, já no caso dos motores híbridos desempenham um ciclo onde apresenta características tanto do ciclo Otto como do ciclo gasóleo (Basshuysen & Schäfer, 2004).

2.7.1 MOTOR A GASOLINA

O processo de combustão de um motor a gasolina, inicia-se com a compressão do combustível e da mistura de ar, e uma ignição externa sincronizada. No motor a gasóleo, o processo de combustão tem início com a injeção do combustível líquido na câmara de combustão onde inflama com o ar, após este ter sido aquecido através da compressão até a uma temperatura suficientemente alta que permita a iniciação da ignição (Basshuysen & Schäfer, 2004).

Os combustíveis usados pelos motores de combustão interna podem ser gasosos, como o metano, o hidrogénio e o biogás; líquidos, como a gasolina e o gasóleo; sólidos como o carvão pulverizado (Basshuysen & Schäfer, 2004).

O funcionamento de um motor a gasolina encontra-se esquematizado na figura 11.

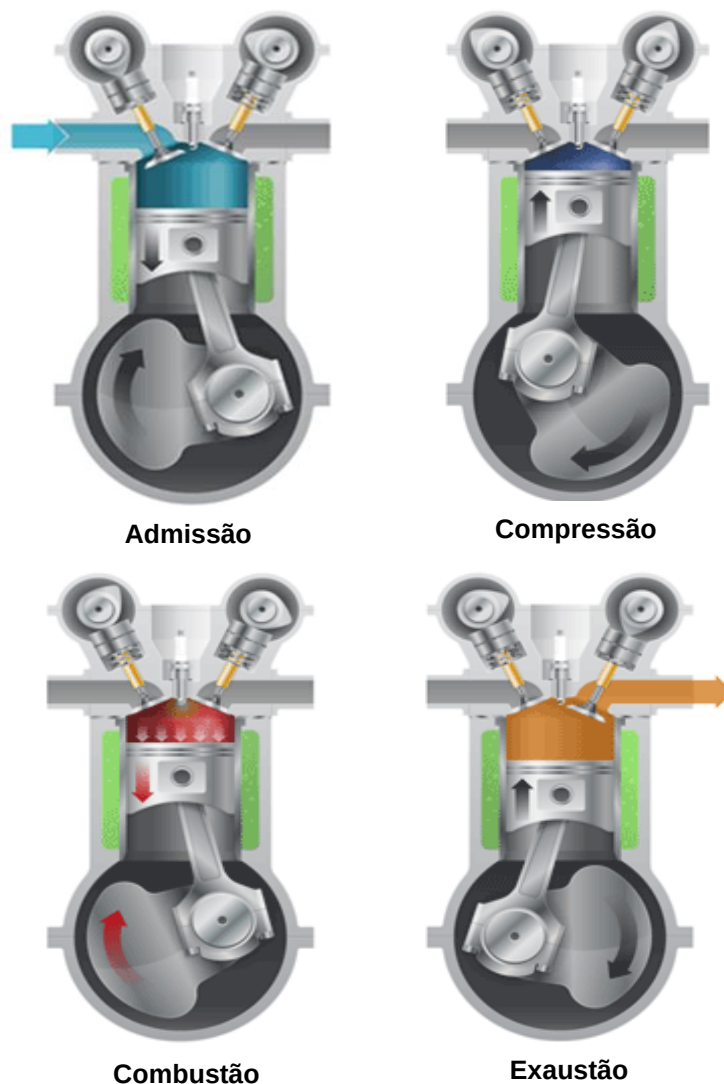


Figura 11: Motor a gasolina a quatro tempos. Traduzido (Stevens, 2021).

O ciclo Otto inicia-se com abertura da válvula de admissão e movimento descendente do pistão, tal como indica a figura 11. De seguida ocorre a admissão da mistura de gasolina e ar, provenientes do carburador ou dos injetores, para câmara de combustão. Neste processo a válvula de admissão está aberta e a válvula de exaustão está fechada (Heywood, 2018).

Numa segunda etapa, a compressão, que se inicia quando o pistão atinge o seu ponto mais baixo do seu percurso, denominado de ponto morto inferior, a válvula de admissão fecha-se e ocorre a compressão da mistura com o pistão a efetuar o movimento ascendente, de modo que a etapa seguinte seja mais poderosa. Ambas as válvulas estão fechadas (Heywood, 2018).

Depois do pistão, atingir o topo da câmara de combustão, dá-se o tempo da combustão, que consiste em comprimir a mistura ao máximo, há o desencadeamento de uma faísca através da vela de ignição. A gasolina entra assim em combustão, provocando uma miniexplosão. Ambas as válvulas estão fechadas (Heywood, 2018).

Depois de ocorrer a explosão, o pistão é forçado a ir para baixo, e por sua vez a válvula de exaustão é aberta. Como se pode observar na figura 11 todo o gás resultante da combustão é forçado a sair por essa válvula, e posteriormente, pelo tubo de escape. A válvula de admissão fecha-se. O motor a gasolina completa assim um ciclo de combustão (Heywood, 2018) .

2.7.2 MOTOR A GASÓLEO

Um motor a gasóleo, como o nome indica, utiliza o gasóleo como combustível. Uma das maiores diferenças entre estes dois tipos de motor, é o facto, do gasóleo ser introduzido pulverizado no interior da câmara de combustão, onde o ar foi previamente aquecido devido à compressão efetuada pela o pistão (Oliveira Peça, 2012).

O motor a gasóleo é também um motor a quatro tempos, que são o tempo de admissão, o tempo de compressão, o tempo de expansão e o tempo de escape (Oliveira Peça, 2012), estando o seu funcionamento esquematizado na figura 12.

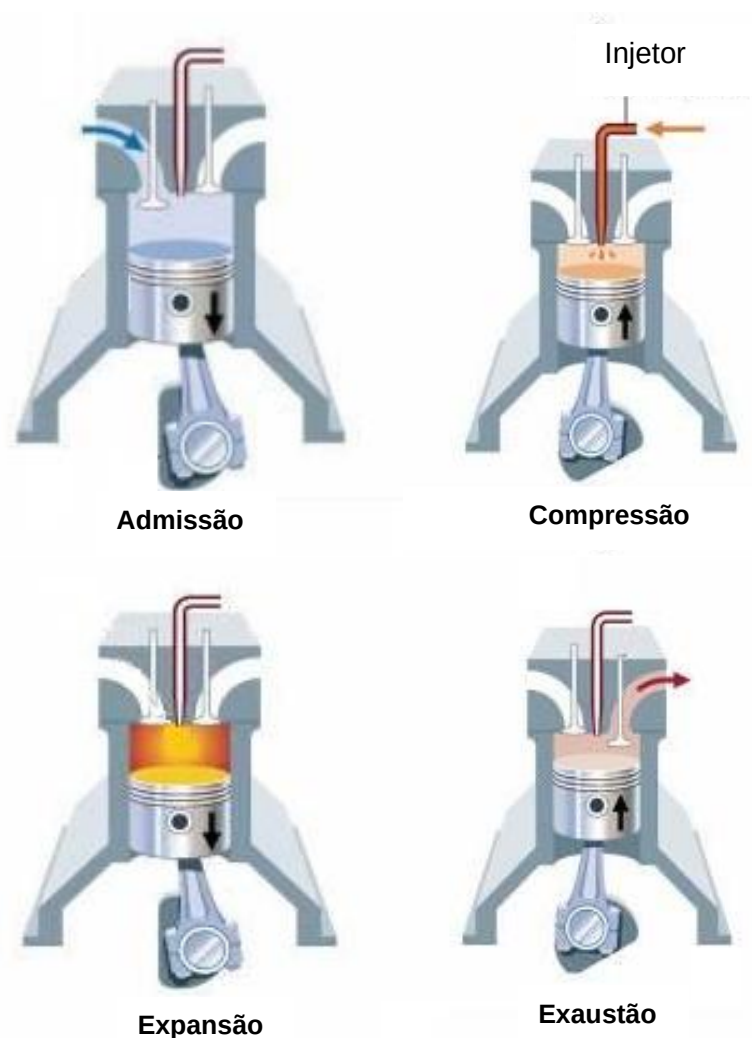


Figura 12: Motor a gasóleo a quatro tempos. (Oliveira Peça, 2012)

O funcionamento deste motor tem início no tempo de admissão, onde o pistão efetua um movimento ascendente, como indicado na figura 12 e aspira o ar para o interior do motor. Para tal é necessário que a válvula de admissão esteja aberta (Oliveira Peça, 2012).

Após o pistão passar o ponto morto inferior do seu percurso e o fechamento da válvula de admissão, dá-se início ao tempo de compressão, onde o pistão começa a adquirir um movimento ascendente, de modo a comprimir o ar. Antes do pistão atingir seu ponto morto superior, o combustível é adicionado já com o ar quente. Com as condições de pressão e temperatura a aumentarem, e com o movimento de turbilhão gerado pelo pistão, o gasóleo que é finamente pulverizado para o interior da câmara de combustão, inflama-se. Resultando assim, uma maior temperatura e pressão onde ambas as válvulas estão fechadas (Oliveira Peça, 2012).

A pressão exercida no topo do pistão vai ser cada vez maior, obrigando-o a efetuar um movimento descendente, à medida que os gases se vão expandir. Este tempo é denominado de tempo de expansão, e ambas as válvulas estão fechadas (Oliveira Peça, 2012).

No último tempo, o tempo de escape, a válvula de escape abre-se antes do pistão atingir o ponto morto inferior. E com o movimento ascendente do pistão, os gases da combustão são expulsos para o exterior do motor através da válvula de escape. Ainda na fase de escape, pouco antes do ponto morto superior ser atingido, a válvula de admissão é aberta, e ocorre mais um ciclo de 4 tempos (Oliveira Peça, 2012).

A potência produzida tanto no motor a gasolina como no motor a gasóleo, está dependente do caudal de combustível que é injetado em cada ciclo. De acordo com as necessidades impostas pelo operador para cumprir determinada função, a potência no motor tem que ser ajustada de modo a realizar essa função, através de incrementos do caudal de combustível ou redução do mesmo. Para isso o operador tem no seu controlo um acelerador (Oliveira Peça, 2012).

2.8 ACOPLAÇÃO DO ELETROLISADOR AO MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Quando é adicionado um combustível suplementar que tem um comportamento catalítico, como a mistura hidrogénio e oxigénio, no processo de combustão num motor de combustão interna, permite o aumento da eficiência do motor bem como uma redução considerável nos gases poluentes emitidos. Isto deve-se ao facto da velocidade da combustão ser mais rápida e completa, pois diminui os hidrocarbonetos semi-queimados que ficavam na câmara e os que saíam pela válvula de exaustão, deixando o motor mais limpo, consequentemente a energia da reação aumenta, traduzindo-se num aumento de eficácia e potência mecânica. Ao ter assim uma combustão mais completa, irá ser necessário menos combustível principal para realizar o mesmo trabalho (Ross, 2002).

Numa situação onde o motor opera unicamente com o combustível primário que está armazenado na sua forma líquida no depósito, o motor ao entrar em funcionamento e o combustível líquido passa por um processo de mistura, que é a mistura ar-combustível. Esta mistura é então submetida a uma ignição por centelha elétrica no caso dos motores a gasolina ou a uma ignição por compressão no caso dos motores a gasóleo, onde parte da energia térmica da combustão é então transformada em energia mecânica que irá atuar no eixo do motor e o resto da energia é dissipada nos gases de exaustão e outras perdas do sistema (Martins, 2013).

Para que seja possível utilizar a mistura hidrogénio e oxigénio na combustão é necessário acoplar um eletrolisador, sendo necessário ter em atenção também a energia requerida pelo mesmo. Portanto a energia que o motor também vai disponibilizar, tem que ser superior à energia necessária para a eletrólise (Coelho, 2013).

Quando se junta a mistura de hidrogénio e oxigénio à combustão, além da obtenção de um maior rendimento e da redução de emissões poluentes, tem-se uma diminuição de temperatura na abertura da válvula de escape. Como a velocidade da combustão é mais rápida, é concluída mais cedo e mais perto do início do ciclo de combustão, ou seja, quando o pistão está no topo. Assim, com a combustão terminada, a câmara de combustão começa a arrefecer à medida que o pistão desce, pois, a probabilidade que ainda haja combustões a ocorrer é muito limitada, tornando o arrefecimento mais eficaz (Ross, 2002).

A adição da mistura de hidrogénio, possibilita o funcionamento do motor em regimes diferentes, pois aumenta o binário do motor, ou seja, para o motor operar a uma determinada rotação requer menos combustível, devido à presença do hidrogénio que otimiza a combustão.

Com uma taxa constante de inserção da mistura e de ar para o interior do motor, e uma diminuição do combustível primário, irá resultar numa elevada razão de excesso de ar (Coelho, 2013).

Com o aumento da eficiência do motor e a diminuição, quer dos gases emitidos, quer do consumo de combustível, o consumo energético será aproximadamente cerca de 13 volts por 15 amperes da bateria do veículo. O eletrolisador produz quantidades da mistura gasosa e faz a sua distribuição a uma taxa constante para o motor. Este fluxo de gás é contínuo e ininterrupto, independentemente das condições da viagem e das condições climáticas. O eletrolisador também está protegido contra o risco de explosão, pois contém vários recursos protetores, nomeadamente os de ventilação e é construído de acordo com os padrões de segurança (Ross, 2002).

O dispositivo tem a facilidade de ser de simples instalação, manutenção e reparação. As fontes de alimentação usadas para fornecer energia para o eletrolisador também funcionam para derreter o gelo que se pode formar em climas frios, e o sistema faz uso da pressão interna do gás para circular o gás e a água sem a necessidade de componentes adicionais, como bomba (Ross, 2002).

A mistura resultante da eletrólise é adicionada à combustão através do sistema de admissão de ar do motor, entrando no motor juntamente com o ar atmosférico que foi filtrado, através da válvula de admissão. O eletrolisador deve ser instalado num local ventilado e o mais longe possível de qualquer superfície que ultrapasse os 90^a C, e num local que não perturbe o fluxo de ar do radiador. A mangueira que transporta a mistura produzida até ao local de inserção no tubo de admissão de ar tem que estar protegida das regiões muito quentes e evitar dobras muito acentuadas, de modo a evitar qualquer obstrução que possa resultar num impedimento da quantidade correta de hidrogénio e oxigénio fornecido (Coelho, 2013).

Foram efetuados testes aos eletrolisadores *Ultimate Cell*, para avaliar a performance desta tecnologia, nomeadamente ao *Ultimate Cell Car Engine* (UCCE). No estudo, um Mercedes B180 2.0 CDI a gasóleo foi testado com e sem a tecnologia *Ultimate Cell*, com 3 pessoas a bordo e com um equipamento de medição, que incluiu um *scanner* de diagnóstico de bordo (OBD) que serviu como um autodiagnóstico para o veículo, um sistema de posicionamento global (GPS) com altímetro barométrico e um analisador de gases (CO₂, O₂, CO, NO_x, hidrocarbonetos não queimados). O consumo de combustível foi calculado baseado na entrada de ar e na composição do gás de exaustão. Os resultados desta experiência foram apresentados segundo a metodologia potência específica do veículo (VSP), que calcula a energia com base na velocidade, aceleração e no declive (DTEA, 2013). Foram considerados os seguintes modos de funcionamento:

- Modos 1 e 2: energia negativa (travagem, desaceleração);
- Modo 3: ralenti;
- Modos 4 a 14: aumento de energia positiva.

A metodologia VSP permite que os resultados no mesmo veículo sejam comparáveis e extrapolados, mesmo que os ciclos de condução não sejam os mesmos. Os resultados do consumo de combustível foram validados através da simulação do veículo em ciclo de testes de Novo Ciclo de Condução Europeu (NEDC), que serviu para avaliar os níveis de emissão dos gases do motor e a economia de combustível (DTEA, 2013).

Na figura 13 encontram-se os resultados do consumo do gásóleo para os modos de funcionamento do estudo descrito.

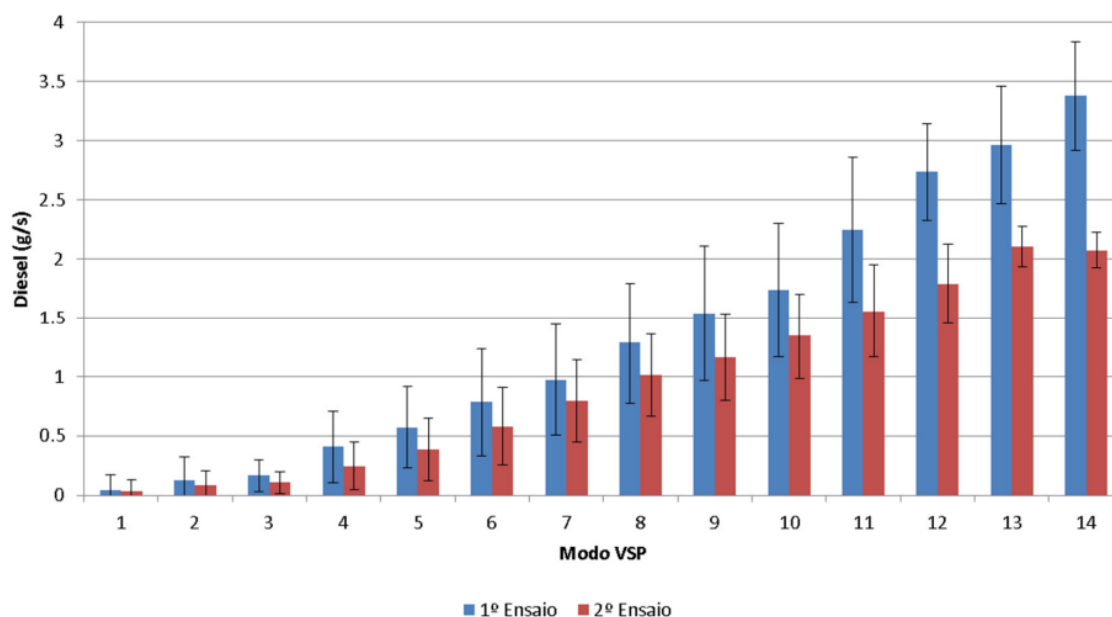


Figura 13: Consumo de gásóleo para os vários modos de operação sem eletrolisadores (1ºensaio) e com eletrolisadores (2º ensaio) (DTEA, 2013).

Na figura 13, o primeiro ensaio do teste refere-se ao funcionamento sem eletrolisadores e o segundo ensaio com eletrolisadores e para os vários modos de funcionamento do motor. Verifica-se que quando mais se acelera, maior é a poupança de combustível, devido a uma melhor combustão. O UCCE também foi testado à redução de emissões de NOx, e de acordo com os modos de operação o estudo indicou uma redução compreendida entre 25 a 50% (DTEA, 2013).

3. CARATERIZAÇÃO DAS EMPRESAS

3.1 CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA URBERECICLAR E DAS MÁQUINAS EM ESTUDO

A empresa URBERECICLAR foi fundada pelo sócio maioritário Engº Leal dos Santos em 1999, atuando no tratamento de entulhos “*in situ*” (URBERECICLAR, 2021).

A ideia da criação da empresa surgiu após vários contactos estabelecidos com empresas de construção civil e obras públicas, responsáveis dos departamentos do ambiente de diversas autarquias e entidades estatais, que mostraram a preocupação comum com a inexistência de soluções práticas e eficazes para o tratamento dos entulhos gerados pela execução de obras, demolições de edifícios, limpezas industriais e outras atividades (URBERECICLAR, 2021).

Esta problemática assume contornos extremos para as autarquias, uma vez que são confrontadas com descargas indiscriminadas dos entulhos em locais impróprios, causando grande impacto ambiental, e dispêndio de verbas para a sua remoção e transporte para locais mais apropriados. Por outro lado, há a vertente dos empresários do sector de construção civil e obras públicas, que ao executarem as obras, vão gerar entulhos que terão de ser removidos das mesmas, por vezes com a única alternativa de os transportarem a vazadouros, cada vez mais escassos e a várias dezenas de quilómetros, com gastos económicos avultados em frotas de veículos e máquinas que têm de disponibilizar para o efeito (URBERECICLAR, 2021).

Perante este desafio, a empresa desenvolve a atividade na área do Tratamento de Entulhos, através do recurso a um equipamento eficaz e de fácil mobilidade que permite a reciclagem dos entulhos “*in situ*” (URBERECICLAR, 2021).

Do ponto de vista funcional, a utilização deste equipamento para tratamento dos entulhos provenientes de obras, abrange dois campos distintos; por um lado, promove a reciclagem de materiais, que de outra forma teriam como destino final, um vazadouro ou berma de estrada, sendo completamente desaproveitados; por outro, gera o aparecimento de uma nova gama de produtos que vão desde os inertes, ferro, terras e madeiras, com um elevado leque de aplicações em diversas atividades (URBERECICLAR, 2021).

A atividade da empresa diretamente relacionada com a reciclagem de entulhos “*in situ*”, abrange (URBERECICLAR, 2021):

- O aluguer do equipamento em obra;
- A comercialização dos subprodutos gerados;
- A supervisão de todos os trabalhos inerentes ao normal desenvolvimento de todo o processo;
- Em caso de opção do cliente, a contratação de equipamento adequado à alimentação da unidade, e transporte dos subprodutos gerados aos locais por ele designados;
- No caso de ser expressa essa vontade pelo cliente, a execução completa das próprias demolições, ficando responsável por todas as atividades implementadas no decurso dos trabalhos.

Os subprodutos a comercializar, provenientes do funcionamento da instalação, dividem-se em (URBERECICLAR, 2021):

- Terras selecionadas, com aproveitamento para jardins, recobrimento de solos, e fins agrícolas;
- Elementos de ferro, com escoamento para produtos siderúrgicos;
- *Tout-Venant* aplicável em estradas, saneamento básico, pavimentos, etc;
- Britas recicladas, sendo aplicadas em todo o espectro de utilizações na construção civil e obras públicas.

Os serviços a prestar englobam ainda, a execução das demolições, de subcontratação parcial de serviços, ou simplesmente no aluguer da unidade de reciclagem, dependendo das opções tomadas pelos clientes (URBERECICLAR, 2021).

Os principais clientes perfilam-se num universo extremamente vasto, abrangendo (URBERECICLAR, 2021):

- Autarquias Locais;
- Empresas de Construção Civil;
- Empresas de Obras Públicas;
- Particulares.

Paralelamente, a empresa atua nas unidades extrativas a céu aberto seguindo as orientações das intervenções definidas nos Planos Ambientais de Recuperação Paisagística, efetuando o tratamento adequado dos materiais sobrados da atividade mineira, podendo recorrer a equipamento próprio, alugado ou usar o já existente.

O presente estudo incide sobre as máquinas que operam numa unidade extrativa a céu aberto para a produção de inertes a partir da rocha calcária no concelho da Batalha, que está representada na figura 14.



Figura 14: Unidade extrativa a céu aberto para a produção de inertes a partir da rocha calcária no concelho da Batalha.

As máquinas que fazem parte deste estudo e que operam nesta unidade extrativa encontram-se representadas na figura 15.



Figura 15: Máquinas usadas na pedreira em estudo A- compressor da unidade de compressão, B- pá carregadora, C- dumper (Consultado nas fichas técnicas).

As especificações técnicas das máquinas envolvidas neste estudo encontram-se nos Anexos I, II e III. A primeira máquina é uma unidade de perfuração com um compressor com motor de combustão interna, indicada pela letra A na figura 15. A unidade de perfuração serve para a perfuração de maciços rochosos, realizando furos na rocha, onde são aplicados produtos explosivos, que promovem a sua fragmentação, e utiliza os seguintes equipamentos:

- Brocas de perfuração para os diferentes tipos de rocha;
- Tubos e barrenas acoplados entre si, para formar a extensão adequada, à profundidade desejada;
- Cada unidade de perfuração, tem acoplado um compressor movido por um motor de combustão interna, que comprime o ar, para obter o ar comprimido necessário para a adequada limpeza dos detritos do interior dos furos, deixando sempre a frente de rocha que está em contacto com a broca, devidamente limpa, proporcionando avanços de perfuração eficazes.

O compressor usado é o Atlas Copco XAMS 615 Md com 5,7 t, com uma capacidade de trabalho de 34,2 m³/min, a uma pressão máxima de 8,6 bar. O motor de combustão interna é fabricado pela Mercedes-Benz e tem uma potência de 286 kW (Anexo I).

Outra máquina que opera na pedreira é a pá carregadora Volvo BM L180, indicada pela letra B na figura 15, com um motor de 289 hp. A pá carregadora é uma unidade móvel usada para o carregamento de rocha fragmentada, das frentes de trabalho, e de material processado (britas) nas unidades de britagem, e é definida por:

- Estar equipada com pneumáticos;
- Ter um balde frontal com capacidade variável (m³).

Esta pá carregadora tem um peso operacional compreendido entre 23,4 a 28,5 t e as restantes especificações encontram-se no Anexo II.

O *dumper* é outra máquina essencial no funcionamento de uma pedreira, neste caso é usado o Volvo BM 25, indicada pela letra C na figura 15. É uma unidade de carga e transporte de material rochoso, em que interessa salientar que:

- É articulada, com liberdade controlada de movimento, entre a caixa de carga e a cabine de tração, fator essencial para a sua capacidade de mobilidade;
- É usada no carregamento e transporte de material rochoso fragmentado, das frentes de desmonte nas unidades extrativas (pedreiras), para a britagem, onde se realiza a cominuição (redução de calibre) da rocha, obtendo-se os diferentes calibres de brita.
- É usada no carregamento de rocha processada na linha de britagem, para as pilhas de armazenamento dos diferentes calibres de brita.

É um veículo que pesa 39,7 t e possui um motor a gasóleo de 244 hp e as restantes especificações encontram-se no Anexo III.

3.2 CARATERIZAÇÃO DA EMPRESA ULTIMATE CELL

A Ultimate Power foi fundada em outubro de 2012 e é basicamente o conjunto de duas empresas. Este conjunto engloba a ULTIMATE CELL também criada em 2012, que é a detentora das patentes dos dispositivos Ultimate Cell e a UTIS, que foi criada em 2018, numa *joint venture* com a empresa Secil. A ULTIMATE CELL desenvolveu os dispositivos Ultimate Cell, que se aplicam em carros, barcos, camiões, geradores e em máquinas e transportes industriais, com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e emissão de gases poluentes (Ultimate Power, 2019).



Figura 16: Diferentes dispositivos da Ultimate Cell para motores de combustão interna (Ultimate Cell, 2019).

Estes equipamentos criados pela Ultimate Cell, representados na figura 16, possuem uma tecnologia patenteada a nível mundial e certificada por várias entidades de referência, tendo como propósito a otimização de forma eficaz a combustão interna de motores a gasolina, a gasóleo, a biodiesel, a etanol e a Gás Petróleo Liquefeito (GPL). A Ultimate Cell pretende que estes dispositivos possam contribuir de forma decisiva para a implementação efetiva da Estratégia Europa 2020, através do crescimento económico baseado no uso de recursos energéticos alternativos e sustentáveis (Ultimate Power, 2019).

Para o efeito, o referido programa defende: aumentar o uso de energias renováveis, modernizar os transportes, diminuir as importações de produtos petrolíferos e reduzir as emissões de gases nocivos, assegurando a transição para uma economia hipocarbónica (Ultimate Power, 2019).

Atualmente, a política empresarial da Ultimate Cell passa sobretudo por apostar em *know-how* diferenciado e em investigação permanente, cujos resultados potenciem a eficiência energética, a defesa do ambiente e a redução dos gastos financeiros com a mobilidade (Ultimate Power, 2019).

A comercialização do produto e o apoio direto aos clientes, em Portugal e nos cinco continentes, é feita por uma rede de colaboradores, a qual integra: distribuidores, revendedores e instaladores credenciados pela marca (Ultimate Power, 2019).

A missão da Ultimate Cell é disponibilizar equipamentos e serviços que potenciem os seguintes critérios (Ultimate Power, 2019):

- Eficiência energética;
- Poupança no consumo de combustíveis fósseis;
- Redução das importações;
- Aumento das exportações.

A Ultimate Cell acredita que para atingir os seus ambiciosos objetivos é necessário ter os seguintes valores em mente (Ultimate Power, 2019):

- Satisfação Total do Cliente;
- Responsabilidade Social e Ambiental;
- Inovação e Competitividade Espírito de Equipa;
- Qualificação Profissional;
- Orientação para Resultados.

É com base nestes objetivos que a empresa considera que é possível contribuir de forma eficaz para o sustentável e efetivo desenvolvimento económico, financeiro, social, cultural, tecnológico e ambiental dos países (Ultimate Power, 2019).

4. MÉTODOS

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A ideia subjacente ao possível investimento da Empresa Urbereciclar, Lda. para aquisição dos eletrolisadores fabricados pela Ultimate Cell, advém dos seguintes fatores que foram previamente priorizados pela Empresa:

- Redução do consumo de combustível usado nos motores de combustão interna das máquinas disponíveis;
- Redução de emissões de gases poluentes produzidos pelos motores de combustão interna das máquinas.

A Empresa Urbereciclar, Lda., ao equacionar o investimento, na aquisição e montagem dos eletrolisadores nos motores de combustão interna usados nas máquinas existentes, contactou inicialmente a Ultimate Cell, colocando-lhe as seguintes questões:

- Preço de aquisição, montagem e manutenção de cada unidade;
- Número de unidades a montar por cada motor de combustão interna;
- Redução efetiva de combustível pela montagem efetuada em cada motor.

Com base na disponibilização da informação prestada pela Ultimate Cell, relativamente às questões acima colocadas, a Urbereciclar, Lda. efetuou um Estudo Estratégico Financeiro de Investimento Contabilístico, por forma a abranger:

- O Enquadramento permitido pela Legislação em vigor, emitida pela Autoridade Tributária Nacional, para o regime de investimento pretendido, na Atividade Económica desenvolvida;
- Face ao enquadramento legal existente, supervisionado pela Técnica Oficial de Contas Certificada, foi estabelecido um Plano de Investimento
- O Plano de Investimento, consagrou a aquisição, montagem e manutenção dos eletrolisadores, de forma temporal e progressiva, na frota de máquinas existente;
- O valor usado como proposta inicial de investimento foi de 5.000,00 €;
- Ficou planificado analisar uma proposta que atingisse o valor máximo de investimento orçamentado, de forma a consagrar a aquisição, montagem e manutenção dos eletrolisadores, em todos os motores de combustão interna que equipam as máquinas existentes;
- No estudo financeiro considerou-se a análise do custo do combustível durante 24 meses.

O Estudo Estratégico Financeiro elaborado, equacionou também na Planificação a dois anos, as seguintes vertentes:

- A possibilidade de ampliação produtiva, para dar resposta às solicitações previsionais geradas, em virtude da implementação do Plano de Recuperação e Resiliência em Portugal;
- Face ao aumento de produção previsto, consagrar um *scale-up*, considerando o triplo da frota de máquinas, de forma a garantir os valores estimados.

Após o contacto com a empresa Ultimate Cell, por parte da empresa Urbereciclar, obteve-se a informação que para uma redução média de 8% da quantidade de combustível, é necessário um número específico de eletrolisadores indicado pela Ultimate Cell, a acoplar a cada tipo de máquina. Este número difere de máquina para máquina, porque depende das suas características.

Em relação ao compressor da unidade de perfuração, a empresa Ultimate Cell informou a empresa Urbereciclar que é necessário acoplar 6 UCTE a cada compressor, com um custo total de aquisição e montagem de 2.540,00 €. Estes 6 eletrolisadores irão precisar de duas recargas de eletrólito, sendo que a primeira recarga está incluída no preço de custo total de aquisição e montagem. No 21º mês de trabalho é necessário a outra recarga, que toma um valor 300,00 € para os 6 UCTE. Para obter o custo do combustível usado, sem os UCTE instalados, é necessário ter em conta informações sobre os modos de operação. No caso do compressor, este tem um consumo de 40 L de gásóleo/h, opera 4 horas por dia e 20 dias por mês (informação verbal Urbereciclar)¹. Considerando o mês de fevereiro de 2021, em que o gásóleo tinha o preço de 1,25 €/L, obtém-se um custo de 4.000,00 € por mês de gásóleo para o funcionamento do compressor. Considerando o preço do mês de novembro de 2021, que era de 1,57 €/L, significa que o funcionamento do compressor irá ter um custo mensal de 5.024,00 €.

Relativamente à pá carregadora, a empresa Ultimate Cell propôs acoplar 8 UCTE a cada máquina deste tipo, com um custo total de aquisição e montagem de 3.470,00 €. Estes eletrolisadores irão precisar de três recargas de eletrólito, pois a pá carregadora opera durante mais horas que o compressor, sendo que a primeira recarga está incluída no preço de custo total de aquisição e montagem. No 11º e no 22º mês de trabalho será necessário efetuar as restantes recargas, que tomam um valor cumulativo de 800,00 € para os 8 UCTE. De modo a obter o valor do custo do combustível usado, sem os eletrolisadores, é necessário ter em conta informações sobre os modos de operação. A pá carregadora tem um consumo de 50 L de gásóleo/h e opera 7 horas por dia, 22 dias por mês (informação verbal Urbereciclar)¹. Considerando que o preço do gásóleo em fevereiro de 2021 foi de 1,25 €/L isto traduz-se num custo de 9.625,00 € por mês de consumo de gásóleo para o funcionamento de uma pá carregadora. Considerando o preço de novembro de 2021 que era de 1,57 €/L, o custo mensal será de 12.089,00 €.

No caso do *dumper*, a empresa Ultimate Cell recomendou acoplar 7 UCTE a cada um, com um custo total de aquisição e montagem de 3.080,00 €. Estes eletrolisadores irão precisar também de três recargas de eletrólito, sendo que a primeira recarga está incluída no preço de custo total de aquisição e montagem. As duas restantes recargas são efetuadas nos mesmos meses que as pás carregadoras, e tomam um valor cumulativo de 700,00 € para os 7 UCTE. De modo a obter o valor do custo do combustível usado, sem os UCTE, é necessário ter em conta informações sobre os modos de operação. O *dumper* opera 7 horas por dia, 22 dias por mês, com um consumo de 45 L de gásóleo/h (informação verbal Urbereciclar)¹. Considerando que em fevereiro de 2021 o gásóleo tinha o preço de 1,25 €/L, traduz-se num custo de combustível num *dumper* de 8.662,50 € por mês. Com o preço do gásóleo do mês de novembro de 2021 de 1,57 €/L, o custo por mês será de 10.880,10 €.

1- Informação fornecida pelo sócio-gerente da empresa Urbereciclar, José Leal dos Santos, em maio de 2021

Na tabela 3 apresenta-se a informação sistematizada sobre o funcionamento das máquinas em termos de horas de trabalho e consumo de combustível.

Tabela 3- Modo de operação das máquinas e o seu consumo mensal (informação verbal Urbereciclar)¹

Máquinas	Consumo gasóleo (L/h)	Tempo de operação (h/dia)	Dias de operação (dias/mês)	Consumo mensal de gasóleo (L/mês)
Compressor	40	4	20	3200
Pá carregadora	50	7	22	7700
Dumper	45	7	22	6930

Na tabela 4 estão presentes os preços do combustível praticados em fevereiro e novembro de 2021, utilizados no estudo. Em cada estudo foi considerado o preço do gasóleo constante ao longo dos 24 meses contemplados, tendo-se, no entanto, realizado estudos independentes a dois preços distintos, atendendo à grande variação que os preços dos combustíveis verificaram ao longo do ano de 2021.

Tabela 4- Custo de combustível em fevereiro e novembro de 2021

Preço do combustível (€/L)	
Fevereiro de 2021	1,25
Novembro de 2021	1,57

Na tabela 5 está indicado o custo mensal do gasóleo consumido calculado para cada uma das três máquinas diferentes considerando os custos de gasóleo de fevereiro e novembro de 2021.

Tabela 5- Custo mensal do gasóleo para cada tipo de máquina assumindo o preço de fevereiro e de novembro de 2021

Custo mensal do gasóleo (€/mês)		
Máquinas	Preço de fevereiro de 2021	Preço de novembro de 2021
Compressor	4.000,00	5.024,00
Pá carregadora	9.625,00	12.089,00
Dumper	8.662,50	10.880,10

Na tabela 6 encontra-se a informação sistematizada sobre os UCTE e das suas recargas, dependendo para cada tipo de máquina.

1- Informação fornecida pelo sócio-gerente da empresa Urbereciclar, José Leal dos Santos, em maio de 2021

Tabela 6- Unidades e custos de UCTE propostas pela empresa Ultimate Cell para cada tipo de máquina e respectivas recargas (informação verbal Urbereciclar)¹

Máquinas	UCTE propostos (unidades)	Custo eletrolisadores (€)	Número de recargas eletrólito	Custo de recargas eletrólito (€)
Compressor	6	2.540,00	2	300,00
Pá carregadora	8	3.470,00	3	400,00
Dumper	7	3.080,00	3	350,00

4.2 O SISTEMA DE MODELAÇÃO ALGÉBRICA (GAMS)

Para otimizar a situação proposta pela empresa URBERECICLAR realizaram-se estudos de otimização através de estratégias de programação e recorreu-se ao programa Sistema Geral de Modelação Algébrica (GAMS) para a resolução do modelo proposto. O GAMS é um sistema de programação matemática aplicada à otimização que consiste num compilador de linguagem e diversos solucionadores associados, que é usado para modelar e analisar diferentes problemas de otimização (Ferris & Munson, 2000).

O software GAMS é utilizado para resolver problemas complexos de otimização de sistemas de potência e energia, e também de sistemas de potência com afirmações algébricas concisas. Estes problemas de otimização incluem situações reais tais como, problemas de qualidade de energia, como por exemplo o fluxo de energia ideal e o fluxo de carga ideal, otimização do fornecimento de combustível, otimização do custo de produção, planeamento de sistemas de transmissão integrados e modelação de sistemas de energia distribuída de forma otimizada. Os modelos gerais do GAMS, que traduzem os problemas de otimização em linguagem de programação, são compostos por seguintes componentes (Soroudi, 2017):

- **Sets** – são usados para definir os índices nas representações algébricas dos modelos;
- **Dados** – os dados iniciais de cada modelo GAMS, são expressos na forma de tabelas ou em parâmetros;
- **Variáveis de decisão** – são *sets* de decisão e são desconhecidas antes de resolver o modelo;
- **Equações** – descrevem as relações entre os dados e as variáveis de decisão;
- **Modelo** – é definido como um conjunto de equações que contém uma função objetivo. A instrução “*solve*” serve para indicar para resolver o modelo;
- **Output** – consiste nos resultados obtidos, e nas diferentes formas de visualizá-los, como por exemplo os ficheiros XLS.

Existem vários modelos de programação disponíveis para serem aplicados a diversos problemas de otimização usando o programa GAMS, estes são (Soroudi, 2017):

- **LP** – programação linear;
- **QCP** – programação quadrática;
- **NLP** – problema não linear com restrições contínuas;

1- Informação fornecida pelo sócio-gerente da empresa Urbereciclar, José Leal dos Santos, em maio de 2021

- DNLP – problema não linear com restrições descontínuas;
- MIP – programação linear inteira mista;
- MIQCP – programação de restrição quadrática de número inteiro misto;
- MINLP – programação não linear inteira mista;
- RMIP – problema de número inteiro misto onde as variáveis de número inteiro são relaxadas.

Os estudos de otimização foram realizados de forma a dar resposta à problemática apresentada pela empresa URBERECICLAR que identificasse a melhor proposta de aquisição de eletrolisadores da ULTIMATE CELL, para os vários financiamentos propostos.

Como já foi referido a empresa URBERECICLAR tem à sua disposição três tipos de máquinas que operam na unidade extrativa produção de inertes a partir da rocha calcária no concelho da Batalha, nomeadamente compressores da unidade de perfuração, pás carregadoras e *dumper*.

Realizaram-se estudos de otimização com duas situações diferentes, numa situação utilizou-se o número real de máquinas existentes na pedreira e na outra o triplo das máquinas existentes de cada tipo, de forma a verificar que resultados se obteriam se houvesse um aumento de escala das máquinas disponíveis. Nos estudos utilizaram-se o preço do gasóleo com os valores de fevereiro e de novembro de 2021, de forma a avaliar a influência do preço do combustível nos resultados obtidos. Assim, criaram-se quatro modelos diferentes com perspetiva de dois anos, dois deles correspondentes ao número real de máquinas disponíveis na pedreira e outros dois considerando o aumento de escala para o triplo das máquinas. Em cada situação consideraram-se os preços dos combustíveis em fevereiro e em novembro 2021.

Para a implementação do modelo matemático a usar é necessário definir a função objetivo, as variáveis de decisão, as restrições e os limites. Na figura 17 estão indicadas e caracterizadas as variáveis definidas.

```
Variables
  UP número de Unidades de Perfuração acopladas com 6 UCTE
  PC número de Pás Carregadoras acopladas com 8 UCTE
  D número de Dumpers acoplados com 7 UCTE
  z função objetivo ;

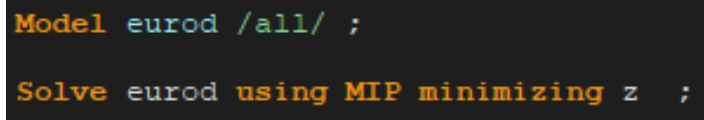
Integer Variables
  UP
  PC
  D ;
```

Figura 17: Screenshot da simulação no programa GAMS com a indicação das variáveis usadas.

Foram definidas quatro variáveis, três variáveis independentes que são comuns a todos as simulações, que são as variáveis UP, PC e D, referentes às unidades de perfuração, pás carregadores e *dumpers*, respetivamente, com UCTE acoplados. Esta nomenclatura foi usada nas imagens e tabelas apresentadas ao longo deste trabalho. Estas variáveis apenas devem assumir valores inteiros, pelo que foi necessário introduzir o comando “Integer Variables”. A variável dependente, z, refere-se à função objetivo definida como total de custos (investimento e custo de combustível) que se pretende minimizar.

O que difere das quatro simulações são as equações utilizadas, deste modo, os seguintes subcapítulos do capítulo 4, irão explicar no que consiste cada equação utilizada.

Depois de definir as equações para cada situação é necessário decidir o modelo do programa a usar.



```
Model eurod /all/ ;  
  
Solve eurod using MIP minimizing z ;
```

Figura 18: Screenshot da simulação no programa GAMS referente à definição do modelo e do solver usados.

Como representado na figura 18 para reunir todas as equações é necessário usar o comando “/all/” e como é um problema de programação linear inteira mista, porque apesar das variáveis UP, PC e D serem valores inteiros a variável z, pode tomar valores decimais, recorreu-se ao modelo que se adequa a esta situação, que neste caso é o modelo de programação linear inteira mista. Com o objetivo de obter a maior poupança possível, ou seja, minimizar o custo, torna-se assim também necessário colocar o comando “minimizing z” para ir de encontro ao objetivo estabelecido.

4.3 SIMULAÇÃO COM O NÚMERO REAL DE MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL EM FEVEREIRO DE 2021

A primeira simulação que se efetuou usando o programa GAMS foi com o número real de máquinas existentes na pedreira e com o preço do gásóleo referente a fevereiro de 2021.

Tendo as variáveis definidas, procedeu-se à elaboração das equações. Foram criadas quatro restrições e uma função objetivo. Sabendo que há uma unidade de perfuração, duas pás carregadoras e três *dumpers* (fonte verbal Urbereciclar)¹. Assim, definiram-se três restrições em relação ao número máximo de máquinas com eletrolisadores:

$$UP \leq 1 \quad (2)$$

$$PC \leq 2 \quad (3)$$

$$D \leq 3 \quad (4)$$

Com o custo de cada sistema de eletrolisadores a acoplar para cada tipo de máquina, fornecidos pela empresa ULTIMATE CELL e com o orçamento a variar entre 5.000,00 € e 19.000,00 €, com incrementos de 1.000,00 € em cada proposta, elaborou-se a última restrição, que será diferente para cada proposta. Esta restrição traduz o investimento necessário para acoplar os eletrolisadores necessários a um determinado número de máquinas consoante o orçamento disponível, onde “x”, assume o valor do orçamento a considerar em cada proposta:

$$UP \times 2\,540 + PC \times 3\,470 + D \times 3\,080 \leq x \quad (5)$$

1- Informação fornecida pelo sócio-gerente da empresa Urbereciclar, José Leal dos Santos, em maio de 2021

O desenvolvimento da função objetivo, z , permite obter o custo total dos eletrolisadores e o custo de combustível nas máquinas com e sem eletrolisadores durante 24 meses da seguinte maneira:

Tabela 7- Parcelas da função objetivo da situação real referente ao preço do combustível de fevereiro de 2021

Parcela	Significado
UP x 2 540	custo da acoplação de 6 eletrolisadores para cada unidade de perfuração
(1-UP) x 24 x 4 000	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração sem eletrolisadores (no máximo será uma UP)
UP x 24 x 4 000 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
300	preço da recarga de eletrólito para os 6 eletrolisadores em euros
PC x 3 470	custo da acoplação de 8 eletrolisadores para cada pá carregadora
(2-PC) x 24 x 9 625	Custo do combustível usado pelas pás carregadoras sem eletrolisadores (no máximo serão duas PC)
PC x 24 x 9 625 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas pás de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
800	preço da recarga de eletrólito para os 8 eletrolisadores em euros
D x 3 080	custo da acoplação com 7 eletrolisadores para cada <i>dumper</i>
(3-D) x 24 x 8 662,5	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> sem eletrolisadores (no máximo serão três D)
D x 24 x 8 662,5 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
700	preço da recarga de eletrólito para os 7 eletrolisadores em euros

Somando todas as parcelas que compõem a função objetivo tem-se como resultado a seguinte equação:

$$z = (UP \times 2\,540 + (1 - UP) \times 24 \times 4\,000 + UP \times 24 \times 4\,000 \times (1 - 0,08) + 300) + (PC \times 3\,470 + (2 - PC) \times 24 \times 9\,625 + PC \times 24 \times 9\,625 \times (1 - 0,08) + 800) + (D \times 3\,080 + (3 - D) \times 24 \times 8\,662,5 + D \times 24 \times 8\,662,5 \times (1 - 0,08) + 700)$$

(6)

Pretende-se, portanto, propor para cada nível de investimento a proposta de aquisição de eletrolisadores mais benéfica em termos de custo mínimo de combustível.

4.4 SIMULAÇÃO COM O NÚMERO REAL DE MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE NOVEMBRO DE 2021

A simulação seguinte corresponde à proposta de aquisição de eletrolisadores ótima para a situação real de máquinas existentes na pedreira, mas com o preço do gásóleo referente a novembro de 2021.

Tendo as variáveis definidas, procedeu-se à elaboração das equações. Foram criadas quatro restrições e uma função objetivo, sendo as restrições iguais às da simulação indicada no subcapítulo 4.3 e indicadas nas equações 2 -5.

Com a criação da função objetivo, z , obteve-se o custo total dos eletrolisadores e o custo do combustível em máquinas com e sem eletrolisadores no espaço de 24 meses e é composta da seguinte maneira:

Tabela 8- Parcelas da função objetivo da situação real referente ao preço do combustível de novembro de 2021

Parcela	Significado
$UP \times 2\,540$	custo da acoplação de 6 eletrolisadores para cada unidade de perfuração
$(1-UP) \times 24 \times 5\,024$	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração sem eletrolisadores (no máximo será uma UP)
$UP \times 24 \times 5\,024 \times (1-0,08)$	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
300	preço da recarga de eletrólito para os 6 eletrolisadores em euros
$PC \times 3\,470$	custo da acoplação de 8 eletrolisadores para cada pá carregadora
$(2-PC) \times 24 \times 12\,089$	custo do combustível usado pelas pás carregadoras sem eletrolisadores (no máximo serão duas PC)
$PC \times 24 \times 12\,089 \times (1-0,08)$	custo do combustível usado pelas pás de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
800	preço da recarga de eletrólito para os 8 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento
$D \times 3\,080$	custo da acoplação de 7 eletrolisadores para cada <i>dumper</i>
$(3-D) \times 24 \times 10\,880,1$	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> sem eletrolisadores (no máximo serão três D)
$D \times 24 \times 10\,880,1 \times (1-0,08)$	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)

700

preço da recarga de eletrólito para os 7 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento

Somando todas as parcelas que compõem a função objetivo tem-se como resultado a seguinte equação:

$$z = (UP \times 2\,540 + (1 - UP) \times 24 \times 5\,024 + UP \times 24 \times 5\,024 \times (1 - 0,08) + 300) + (PC \times 3\,470 + (2 - PC) \times 24 \times 12\,089 + PC \times 24 \times 12\,089 \times (1 - 0,08) + 800) + (D \times 3\,080 + (3 - D) \times 24 \times 10\,880,1 + D \times 24 \times 10\,880,1 \times (1 - 0,08) + 700) \quad (7)$$

4.5 SIMULAÇÃO COM O TRIPLO DAS MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE FEVEREIRO DE 2021

De modo a perceber como se comportaria o desempenho dos eletrolisadores acoplados aos motores de combustão interna das máquinas e ao compressor, em termos de poupança de combustível e que significado isso teria numa situação de aumento de escala com uma frota de pesados, simulou-se a mesma pedreira, mas com o triplo das máquinas.

Tendo as variáveis definidas, procedeu-se à elaboração das equações. Foram criadas quatro restrições e uma função objetivo. Supondo que há três unidades de perfuração, seis pás carregadoras e nove *dumpers*, as três restrições são:

$$UP \leq 3 \quad (8)$$

$$PC \leq 6 \quad (9)$$

$$D \leq 9 \quad (10)$$

Com o orçamento a variar entre os 15.000,00 € e os 57.000,00 € e com incrementos de 1.000,00 €, elaborou-se a última restrição, esta traduz o investimento necessário para acoplar os eletrolisadores necessários a um determinado número de máquinas consoante o orçamento disponível, onde “ x ”, assume o valor do orçamento a simular:

$$UP \times 2\,540 + PC \times 3\,470 + D \times 3\,080 \leq x \quad (5)$$

A elaboração da função objetivo, z , pretende determinar o custo total no espaço de 24 meses e é composta da seguinte maneira:

Tabela 9- Parcelas da função objetivo da situação triplicada referente ao preço do combustível de fevereiro de 2021

Parcela	Significado
UP x 2 540	custo da acoplação de 6 eletrolisadores para cada unidade de perfuração

Parcela	Significado
(3-UP) x 24 x 4 000	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração sem eletrolisadores (no máximo serão três UP)
UP x 24 x 4 000 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
300	preço da recarga de eletrólito para os 6 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento
PC x 3 470	custo da acoplação de 8 eletrolisadores para cada pá carregadora
(6-PC) x 24 x 9 625	custo do combustível usado pelas pás carregadoras sem eletrolisadores (no máximo serão seis PC)
PC x 24 x 9 625 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas pás de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
800	preço da recarga de eletrólito para os 8 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento
D x 3 080	custo da acoplação de 7 eletrolisadores para cada <i>dumper</i>
(9-D) x 24 x 8 662,5	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> sem eletrolisadores (no máximo serão nove D)
D x 24 x 8 662,5 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelos <i>dumpers</i> com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
700	preço da recarga de eletrólito para os 7 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento

Somando todas as parcelas que compõem a função objetivo tem-se como resultado a seguinte equação:

$$z = (UP \times 2\,540 + (3 - UP) \times 24 \times 4\,000 + UP \times 24 \times 4\,000 \times (1 - 0,08) + 300) + (PC \times 3\,470 + (6 - PC) \times 24 \times 9\,625 + PC \times 24 \times 9\,625 \times (1 - 0,08) + 800) + (D \times 3\,080 + (9 - D) \times 24 \times 8\,662,5 + D \times 24 \times 8\,662,5 \times (1 - 0,08) + 700) \quad (11)$$

4.6 SIMULAÇÃO COM O TRIPLO DAS MÁQUINAS CONSIDERANDO O PREÇO DO COMBUSTÍVEL DE NOVEMBRO DE 2021

Nesta simulação utilizou-se o programa GAMS para simular outra situação com o triplo das máquinas existentes, mas com o preço do gásóleo referente a novembro de 2021.

Tendo as variáveis já definidas, procedeu-se à elaboração das equações, que são as mesmas que na simulação efetuada no subcapítulo 4.5., nomeadamente as equações 8 -10 e 5.

A função objetivo, z, permitiu obter o custo total no espaço de 24 meses e é composta da seguinte maneira:

Tabela 10- Parcelas da função objetivo da situação triplicada referente ao preço do combustível de novembro de 2021.

Parcela	Significado
UP x 2 540	custo da acoplação de 6 eletrolisadores para cada unidade de perfuração
(3-UP) x 24 x 5 024	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração sem eletrolisadores (no máximo serão três UP)
UP x 24 x 5 024 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas unidades de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
300	preço da recarga de eletrólito para os 6 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento
PC x 3 470	custo da acoplação de 8 eletrolisadores para cada pá carregadora
(6-PC) x 24 x 12 089	custo do combustível usado pelas pás carregadoras sem eletrolisadores (no máximo serão seis PC)
PC x 24 x 12 089 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelas pás de perfuração com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
800	preço da recarga de eletrólito para os 8 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento
D x 3080	custo da acoplação de 7 eletrolisadores para cada <i>dumper</i>
(9-D) x 24 x 10 880,1	Custo do combustível usado pelos <i>dumppers</i> sem eletrolisadores (no máximo serão nove D)
D x 24 x 10 880,1 x (1-0,08)	custo do combustível usado pelos <i>dumppers</i> com eletrolisadores (considerando a redução de 8% no combustível)
700	preço da recarga de eletrólito para os 7 eletrolisadores em euros para dois anos de funcionamento

Somando todas as parcelas que compõem a função objetivo tem-se como resultado a seguinte equação:

$$z = (UP \times 2\,540 + (3 - UP) \times 24 \times 5\,024 + UP \times 24 \times 5\,024 \times (1 - 0,08) + 300) + (PC \times 3\,470 + (6 - PC) \times 24 \times 12\,089 + PC \times 24 \times 12\,089 \times (1 - 0,08) + 800) + (D \times 3\,080 + (9 - D) \times 24 \times 10\,880,1 + D \times 24 \times 10\,880,1 \times (1 - 0,08) + 700) \quad (12)$$

4.7 CÁLCULO DA REDUÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E DA QUANTIDADE DE EMISSÕES DE CO₂

De modo a determinar a quantidade máxima de emissões de CO₂ das máquinas sem eletrolisadores foi necessário calcular a quantidade de combustível consumido através da equação 13 em que cujas parcelas estão descritas na tabela 11.

Tabela 11- Parcelas e seus significados no cálculo da quantidade de combustível sem a utilização de eletrolisadores

Parcela	Significado
UP x 24 x 3 200	Consumo de combustível em litros das unidades de perfuração sem eletrolisadores
PC x 24 x 7 700	Consumo de combustível em litros das pás carregadoras sem eletrolisadores
D x 24 x 6 930	Consumo de combustível em litros dos <i>dumpers</i> sem eletrolisadores

Somando assim estas parcelas obtém-se a seguinte equação:

$$Consumo = (UP \times 24 \times 3\,200) + (PC \times 24 \times 7\,700) + (D \times 24 \times 6\,930) \quad (13)$$

Para calcular a quantidade de emissões emitidas de CO₂, primeiro é necessário calcular a quantidade libertada de CO₂ por litro de gasóleo consumido. O gasóleo pode ser comparado ao hexadecano puro, tendo assim a fórmula molecular C₁₆H₃₄, e uma massa molar de 226 g/mol. A massa molar do CO₂ é 44 g/mol e como o hexadecano tem 16 carbonos, a massa de CO₂ libertada por mol de hexadecano consumido é então: 44 x 16 = 704 g. Portanto, a relação mássica entre o consumo de gasóleo e as emissões de CO₂ é $\frac{704}{226} = 3,12$.

Sabendo que um litro de gasóleo pesa 0,85 Kg então, 0,85 x 3,12 = 2,65 Kg, são emitidos 2,65 Kg de CO₂ por cada litro consumido de gasóleo (Sher, 1998).

Assim, conhecendo o consumo de gasóleo e relação mássica entre esse valor e a quantidade de CO₂ libertado, é possível obter o valor das emissões de CO₂ com a seguinte fórmula:

$$Emissões = Consumo \times 2,65 \quad (14)$$

Para se calcular o consumo de combustível minimizado para a situação das máquinas poderem ter eletrolisadores, em ambos os cenários (número real e número triplicado das máquinas) foi necessário elaborar uma equação que traduza esse consumo.

Tabela 12- Parcelas do cálculo da quantidade de combustível com a utilização de eletrolisadores acoplados

Parcela	Significado
UP x 24 x 3 200 x (1-0,08)	Consumo de combustível em litros das unidades de perfuração com eletrolisadores
PC x 24 x 7 700 x (1-0,08)	Consumo de combustível em litros das pás carregadoras com eletrolisadores
D x 24 x 6 930 x (1-0,08)	Consumo de combustível em litros dos <i>dumpers</i> com eletrolisadores

Somando assim estas parcelas obtém-se a seguinte equação:

$$\text{Consumo Mínimo} = ((UP \times 24 \times 3200 \times (1 - 0,08)) + (PC \times 24 \times 7700 \times (1 - 0,08)) + D \times 24 \times 6930 \times (1 - 0,08)) \quad (15)$$

Com base no consumo mínimo é possível calcular a quantidade de emissões de CO₂, segundo a equação:

$$\text{Emissões Mínimas} = \text{Consumo Mínimo} \times 2,65 \quad (16)$$

Para determinar as percentagens da redução de combustível e de emissões de CO₂, recorreu-se às seguintes equações:

$$\% \text{ de Redução do Consumo de combustível} = \frac{\text{Consumo} - \text{Consumo mínimo}}{\text{Consumo}} \times 100 \quad (17)$$

$$\% \text{ Redução das Emissões} = \frac{\text{Emissões} - \text{Emissões mínimas}}{\text{Emissões}} \times 100 \quad (18)$$

4.8 CÁLCULO DO PERÍODO DE RETORNO DO INVESTIMENTO

De modo a perceber como seria o efeito que a poupança obtida gerava no âmbito da recuperação das diferentes propostas de investimentos analisados, procedeu-se ao cálculo do período de retorno para cada investimento, em todos as situações estudadas.

Houve a necessidade de efetuar cálculos prévios, de modo a obter o valor de poupança por mês de cada máquina com os UCTE acoplados. Estes valores são resultantes do produto do custo mensal de combustível (com o preço do gasóleo a 1,25 €/L referente a fevereiro de 2021 e a 1,57 €/L referente a novembro de 2021) com a poupança de combustível obtida através do UCTE (8%). Considerando o preço do mês de fevereiro obtiveram-se os valores de 320 €/mês, 770 €/mês e 693 €/mês, para a poupança mensal para o compressor, pá carregadora e *dumper*, respetivamente. Com o preço do mês de novembro obtiveram-se os valores de 401,92 €/mês, 967,12 €/mês e 870,41 €/mês, para o compressor, pá carregadora e *dumper*, respetivamente.

Para calcular o período de retorno com o preço do gasóleo em fevereiro utilizou-se a fórmula 19, e com preço de novembro utilizou-se a fórmula 20. Estas fórmulas servem tanto para a situação real como para a situação do triplo das máquinas.

$$\text{Período de retorno} = \frac{\text{Investimento}}{UP \times 320 + PC \times 770 + D \times 693} \quad (19)$$

$$\text{Período de retorno} = \frac{\text{Investimento}}{UP \times 401,92 + PC \times 967,12 + D \times 870,41} \quad (20)$$

4.9 CÁLCULO DA MÉDIA E DO DESVIO-PADRÃO DO PERÍODO DE RETORNO

De forma a obter o valor que demonstra a concentração dos dados do período de retorno calculou-se a sua média.

Tendo obtido a média é possível calcular uma medida do grau de dispersão dos valores em relação à média, denominado de desvio-padrão. Este cálculo foi efetuado através da seguinte fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (21)$$

Foram calculadas quatro médias e quatro desvios-padrão, referentes às diversas situações estudadas, nomeadamente as situações reais e triplicadas com os preços do combustível de fevereiro e de novembro 2021.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DOS ELETROLISADORES DISPONÍVEIS EM PORTUGAL

Atualmente existem duas marcas a comercializar eletrolisadores para acoplar aos motores de combustão interna, a ULTIMATE CELL e a HHO Plus. Ambas as empresas têm vários dispositivos à disposição consoante o tipo de motor que o cliente possui. Neste trabalho pretende-se simular o efeito dos eletrolisadores na redução dos custos através da diminuição do consumo de gasóleo, em três máquinas diferentes usadas numa pedreira. Para tal, e por solicitação da empresa Urbereciclar analisaram-se as especificações de cada máquina e determinaram-se quais os eletrolisadores que poderiam ser aptos ao uso pretendido.

No caso da empresa HHO Plus, o dispositivo a ser analisado que corresponde aos critérios das máquinas é o *KIT DC4000 T*, representado na figura 19, pois é o indicado para motores com cilindrada inferior a 10.000 cm³, este possui todo o material necessário para a instalação (HHO Plus, n.d.).



Figura 19: *KIT DC4000 T* da HHO Plus (HHO Plus, n.d.)

O *KIT DC4000 T* é um tipo de célula eletrolítica na qual as placas de aço inox não ficam totalmente submersas na solução aquosa, e sim separadas uma das outras por anéis que permitem o fluxo da água apenas no interior das placas. O hidrogénio é produzido a partir da eletrólise alcalina usando o hidróxido de potássio, KOH, como eletrólito (HHO Plus, n.d.).

Este dispositivo é relativamente pequeno, com as seguintes medidas 200x200x180 mm. Permite uma aplicação simples e pode ser instalado vertical ou horizontalmente. Possui uma voltagem de 12/24V, uma amperagem de carga de 30A 12V ou de 15A 24V e a amperagem máxima é de 35A 12V ou de 17,5A 24V. A potência deste equipamento é de 415W, com uma área total de produção de hidrogénio de 5050 cm², capaz de produzir 2,2 L/min de hidrogénio a 15A 24V (HHO Plus, n.d.). As juntas e as vedações do dispositivo são fabricadas a partir de

um elastómero adequado ao uso, que é a borracha etileno-propileno-dieno (EPDM) (HHO Plus, n.d.).

A Ultimate Cell possui 3 dispositivos bastante idênticos, que possuem a mesma tecnologia, com base na eletrólise alcalina e que estão indicados na figura 16. A produção de hidrogénio a partir destes dispositivos é de 0,15 a 1,44 L/h, consoante a necessidade do motor em causa. A instalação do dispositivo adequado e o ajuste da taxa de produção do hidrogénio é efetuado pelo instalador certificado da empresa. O dispositivo *Ultimate Cell Car Engine* com a sigla UCCE, é adequado para os veículos ligeiros, o *Ultimate Cell Truck Engine* (UCTE) difere do UCCE, na medida em que os seus componentes internos são diferentes para se adequarem a um trabalho mais exigente, pois é usado em camiões, máquinas e geradores, e o *Ultimate Cell Boat Engine* (UCBE) é usado em barcos e o que difere este dispositivo é o facto de ser construído com materiais resistentes à corrosão. Todos estes dispositivos usam a mesma tecnologia, denominada pela empresa como Ultimate Cell (Ultimate Power, 2019).



Figura 20: *Ultimate Cell Truck Engine* da Ultimate Cell (Ultimate Cell, 2019).

O dispositivo da ULTIMATE CELL que se adequa às máquinas a acoplar é o UCTE, representado na figura 20 e foi este o selecionado para o desenvolvimento das simulações efetuadas neste trabalho. O UCTE garante reduções de consumo de combustível de 5 a 30 % no caso dos camiões e máquinas, e nos geradores garante uma redução de combustível de 15%. Estes dispositivos podem ser responsáveis por uma redução das emissões de gases poluentes compreendida entre 50 a 80% (Ultimate Cell, 2019).

O UCTE é apto para acoplar a geradores e camiões, com um consumo de gasóleo até 84 L/h, é um equipamento que garante percursos até 50 mil km ou 1 500 h de uso no caso dos geradores. Por questões de segurança, o eletrolisador é unicamente vendido, instalado e recarregado por profissionais devidamente certificados pela marca (Ultimate Cell, 2019).

5.2 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO E TIPOLOGIA DE MÁQUINAS COM ELETROLISADORES NO CENÁRIO REAL

Aquando do fornecimento dos dados da empresa Ultimate Cell à empresa Urbereciclar o preço do combustível utilizado pelas máquinas em vigor era de 1,25 €/L (preços de fevereiro de 2021). A frota de maquinaria que a pedreira dispõe é de uma unidade de perfuração, duas pás carregadoras e três *dumpers*.

A otimização do modelo matemático descrito em 4.3 referente à variação do número de máquinas com eletrolisadores, para cada valor de investimento e com o combustível ao preço de fevereiro de 2021 de forma a obter um custo mínimo, encontra-se resumida no gráfico da figura 21.



Figura 21: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação real e referente ao preço do combustível ao preço de fevereiro 2021.

De acordo com os resultados a máquina preferível para acoplar os eletrolisadores são as pás carregadoras (PC), pois foi a máquina selecionada para o orçamento inicial de 5.000,00 €. Também foi a máquina que mais vezes foi selecionada para acoplar os eletrolisadores a todas as suas unidades disponíveis. Este resultado faz sentido, já que são as máquinas que consomem mais combustível. Cada uma consome cerca de 7.700 litros por mês, ou seja, 184.800 litros nos dois anos e por isso a redução do consumo do combustível traduzir-se-á numa acentuada minimização dos custos.

O compressor da unidade de perfuração (UP) é a máquina que consome menos combustível e que trabalha menos horas, sendo por isso a menos prioritária em termos de redução de custos com o combustível. O investimento de 5.620,00 €, apenas permitiu acoplar os UCTE a uma unidade de perfuração (UP) e um *dumper* (D) ou então uma pá carregadora (PC). Como a poupança conjunta da unidade de perfuração (UP) e do *dumper* (D) eram maiores levando

a uma situação de menores custos foram essas as variáveis que foram otimizadas. Uma situação semelhante aconteceu com os investimentos de 8.700,00 € e 11.780,00 €.

Na tabela 13 encontram-se os valores das variáveis otimizadas (UP, PC e D) para cada um dos investimentos, bem como o custo total minimizado de cada uma das simulações, a % de poupança que cada investimento proporciona face ao valor inicial dos custos e também o período de retorno do investimento de cada proposta.

Tabela 13- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno referente à situação real com preço do gasóleo de fevereiro de 2021.

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
0	0	0	0	1183500	0,00	0
3470		1		1168490	1,27	4,51
5620	1		1	1164808	1,58	5,55
6940		2		1153480	2,54	4,51
6940		2		1153480	2,54	4,51
8700	1		2	1151256	2,72	5,10
9630		1	2	1141386	3,56	4,47
10020		2	1	1139928	3,68	4,49
11780	1		3	1137704	3,87	4,91
12710		1	3	1127834	4,70	4,46
13100		2	2	1126376	4,83	4,48
13100		2	2	1126376	4,83	4,48
15640	1	2	2	1121236	5,26	4,82
16180		2	3	1112824	5,97	4,47
16180		2	3	1112824	5,97	4,47
18720	1	2	3	1107684	6,41	4,75
Média						4,66
Desvio-padrão						0,30

Com um investimento de 18.720,00 € todas as máquinas disponíveis encontram-se com eletrolisadores acoplados, ou seja, uma unidade de perfuração (UP), duas pás carregadoras (PC) e três *dumpers* (D) que são as máquinas disponíveis na pedreira e, portanto, o valor até que cada uma das variáveis poderia assumir. Com estes valores de variáveis, que representam o número de máquinas com eletrolisadores a adquirir, o custo total durante os dois anos é de 1.107.684,00 €, o que se traduz numa poupança de 75.816,00 €, ou seja, 6,41 % do valor inicial.

Como se pode constatar pela evolução patente na tabela 13, com o investimento de 18.720,00 € temos a maior redução do consumo de combustível durante os dois anos analisados.

De forma a tentar perceber a influência do aumento dos preços do combustível e dado que de fevereiro a novembro do presente ano assistiu-se a um grande aumento do preço do combustível (um incremento de 32 cêntimos por litro) efetuou-se também o estudo com o preço do combustível em vigor no mês de novembro, ou seja 1,57 €/L.

A simulação do modelo matemático descrito em 4.4 referente ao número de máquinas otimizado a acoplar com eletrolisadores para cada valor de investimento e com o combustível ao preço de novembro de 2021 encontra-se resumida no gráfico da figura 22.

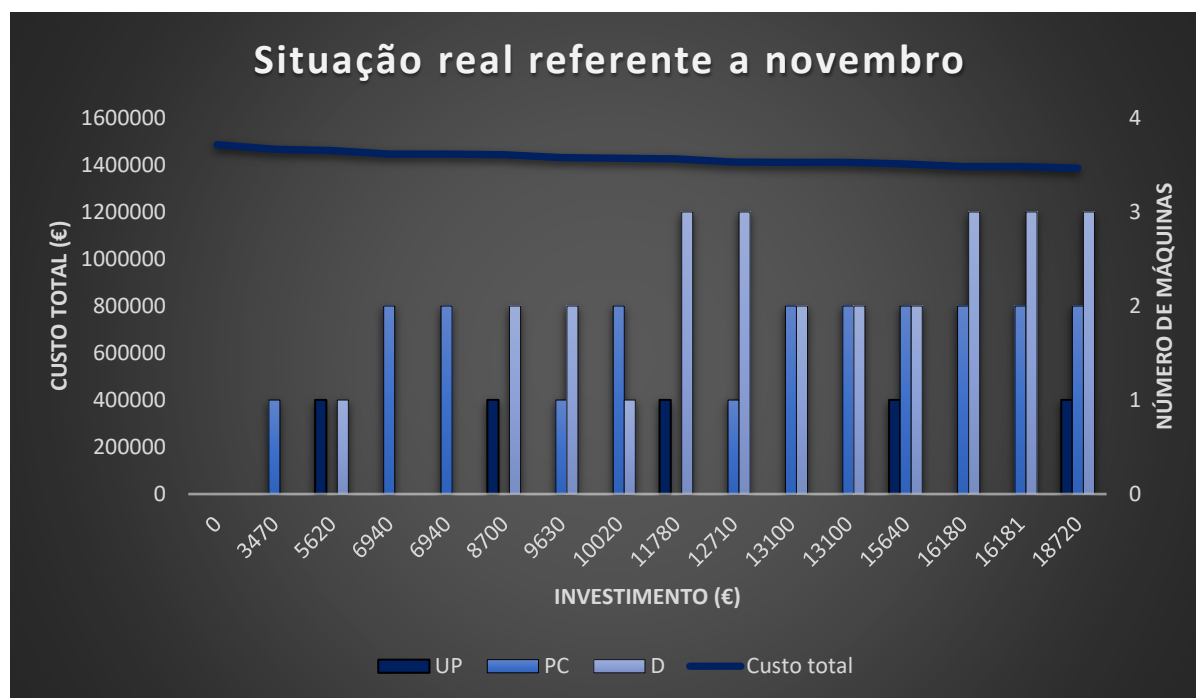


Figura 22: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação real e referente ao preço do combustível ao valor de novembro.

Na tabela 14 encontram-se os valores das variáveis otimizadas (UP, PC e D) para cada um dos investimentos, bem como o custo total minimizado de cada uma das simulações com preço do gásóleo em vigor em novembro, a % de poupança que cada investimento proporciona face ao valor inicial dos custos e também o período de retorno do investimento de cada proposta.

O aumento do preço do combustível refletiu-se bastante no custo total da operação na pedreira, em que numa situação sem qualquer adição de eletrolisadores o custo aumentou para 1.486.015,20 €. Com o mesmo investimento da simulação anterior, é possível acoplar os UCTE a todas as máquinas, reduzindo o custo total para 1.385.997,98 €, sendo que, como o preço do gásóleo aumentou, a percentagem de poupança também aumentou, como se verifica na tabela 14, sendo agora de 6,73 %, ou seja, que se traduz em 100.017,22 € de poupança.

Tabela 14- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e período de retorno referente à situação real e com preço do gásóleo de novembro de 2021.

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
0	0	0	0	1486015,2	0,00	0
3470		1		1466274,32	1,33	3,59
5620	1		1	1461099,32	1,68	4,42

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
6940		2		1446533,44	2,66	3,59
6940		2		1446533,44	2,66	3,59
8700	1		2	1443289,53	2,88	4,06
9630		1	2	1430654,73	3,73	3,56
10020		2	1	1428723,64	3,86	3,57
11780	1		3	1425479,74	4,07	3,91
12710		1	3	1412844,94	4,92	3,55
13100		2	2	1410913,85	5,05	3,56
13100		2	2	1410913,85	5,05	3,56
15640	1	2	2	1403807,77	5,53	3,84
16180		2	3	1393104,06	6,25	3,56
16181		2	3	1393104,06	6,25	3,56
18720	1	2	3	1385997,98	6,73	3,78
Média						3,71
Desvio-padrão						0,24

Comparando os preços praticados em fevereiro, verifica-se que o custo total sem os eletrolisadores teve um aumento de 302.515,20 € e com o número máximo de eletrolisadores acoplados sofre um aumento de 278.313,98 €.

Ao analisar os diversos períodos de retorno para cada caso das tabelas 13 e 14 e comparando-os, independentemente da quantidade de máquinas que possuem os UCTE, é possível perceber que aquando preço do gasóleo situa-se nos 1,25 €/L, ao fim de quase praticamente cinco meses, já foi possível recuperar o dinheiro investido na aquisição dos UCTE, pois nesta situação a média do período de retorno é de 4,66 meses com uma dispersão de 0,3 meses, o que consiste em resultados uniformes. Considerando o custo do gasóleo ao preço do mês de novembro de 2021, apresenta um valor médio do período de retorno ainda mais sólido, já que se obteve um valor de desvio-padrão inferior à situação anterior, que consiste em 0,24 meses, tendo um valor médio de 3,71 meses, determina-se assim que nesta situação que ao quarto mês já se conseguiu recuperar o investimento. Ao comparar estas duas situações, é possível observar quanto mais alto for o preço do combustível, mais rapidamente se recupera o investimento.

5.3 OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO E TIPOLOGIA DE MÁQUINAS COM ELETROLISADORES NO CENÁRIO DO TRIPLO DAS MÁQUINAS

De modo a perceber como se comportariam os custos e as poupanças, caso se tratasse de uma pedreira de maior escala, e, conseqüentemente uma maior frota, elaborou-se um caso em que o número das máquinas seria o triplo, ou seja, três unidade de perfuração, seis pás carregadoras, nove *dumpers*. Estudou-se este caso também com o preço do gasóleo referente aos meses de fevereiro de novembro de 2021, conforme os modelos matemáticos descritos em 4.5 e 4.6, respetivamente e cujos resultados encontram-se nas figuras 23 e 24.

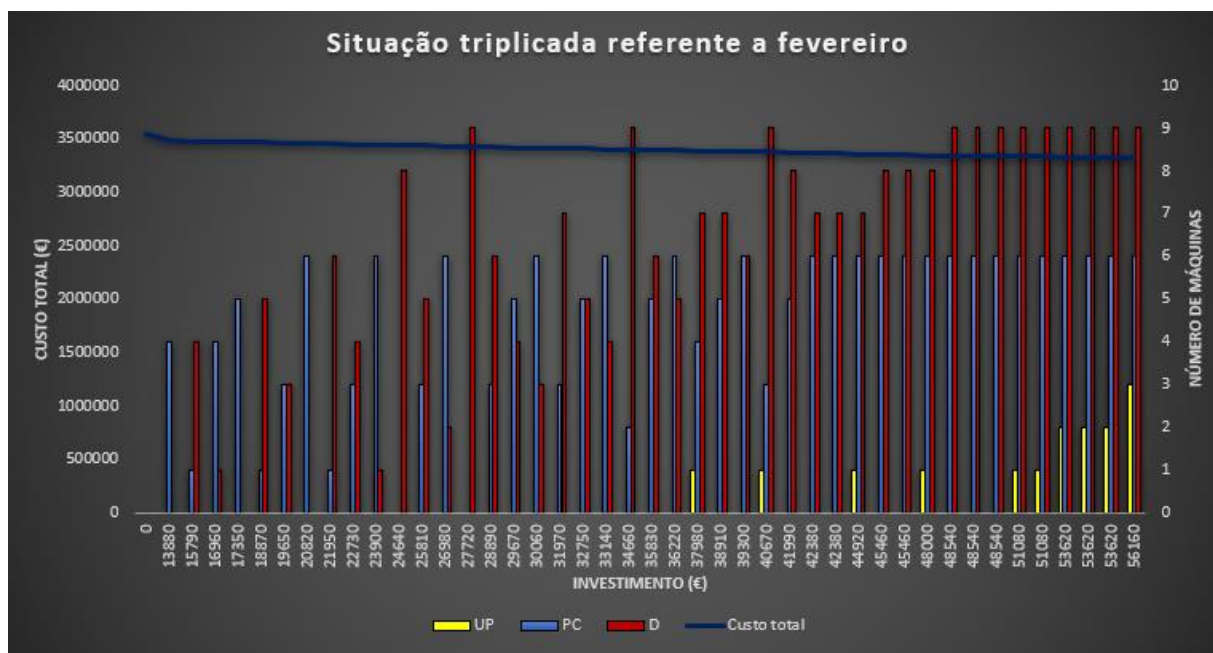


Figura 23: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação triplicada referente ao preço do combustível ao preço de fevereiro.

Como se pode observar pela figura 23, as pás carregadoras (PC) são as primeiras a receberem os UCTE e a acoplá-los a todas as suas unidades existentes.

As pás carregadoras (PC) estão presentes em todas as propostas, exceto, no investimento de 27.720,00 €, pois neste caso, a poupança no combustível é superior se acoplar os UCTE a todos os *dumpers* (D). As unidades de perfuração (UP) como são as que consomem menos combustível, só recebem os eletrolisadores quando não existem mais opções de acoplar a outra máquina.

Na tabela 15 encontram-se os valores das variáveis otimizadas (UP, PC e D) para cada um dos investimentos na situação triplicada, bem como o custo total minimizado de cada uma das simulações com preço do gásóleo em vigor em fevereiro, a % de poupança que cada investimento proporciona face ao valor inicial dos custos e também o período de retorno do investimento de cada proposta.

Tabela 15- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno obtido da situação triplicada com preço do gásóleo em vigor em fevereiro de 2021.

Orçamento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
0	0	0	0	3546900	0,00	0
13880		4		3486860	1,69	4,51
15790		1	4	3477682	1,95	4,46
16960		4	1	3473308	2,07	4,50
17350		5		3471850	2,12	4,51
18870		1	5	3464130	2,33	4,46
19650		3	3	3461214	2,42	4,48

Orçamento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
20820		6		3456840	2,54	4,51
21950		1	6	3450578	2,72	4,45
22730		3	4	3447662	2,80	4,47
23900		6	1	3443288	2,92	4,50
24640			8	3438484	3,06	4,44
25810		3	5	3434110	3,18	4,47
26980		6	2	3429736	3,30	4,49
27720			9	3424932	3,44	4,44
28890		3	6	3420558	3,56	4,47
29670		5	4	3417642	3,64	4,48
30060		6	3	3416184	3,69	4,49
31970		3	7	3407006	3,94	4,46
32750		5	5	3404090	4,03	4,48
33140		6	4	3402632	4,07	4,48
34660		2	9	3394912	4,29	4,46
35830		5	6	3390538	4,41	4,47
36220		6	5	3389080	4,45	4,48
37980	1	4	7	3386856	4,51	4,60
38910		5	7	3376986	4,79	4,47
39300		6	6	3375528	4,83	4,48
40670	1	3	9	3374762	4,85	4,59
41990		5	8	3363434	5,17	4,47
42380		6	7	3361976	5,21	4,47
42380		6	7	3361976	5,21	4,47
44920	1	6	7	3356836	5,36	4,59
45460		6	8	3348424	5,60	4,47
45460		6	8	3348424	5,60	4,47
48000	1	6	8	3343284	5,74	4,58
48540		6	9	3334872	5,98	4,47
48540		6	9	3334872	5,98	4,47
48540		6	9	3334872	5,98	4,47
51080	1	6	9	3329732	6,12	4,57
51080	1	6	9	3329732	6,12	4,57
53620	2	6	9	3324592	6,27	4,66
53620	2	6	9	3324592	6,27	4,66
53620	2	6	9	3324592	6,27	4,66
56160	3	6	9	3319452	6,41	4,75
Média						4,51
Desvio-padrão						0,07

Para poder equipar todas as máquinas nesta situação é necessário um investimento de 56.160,00 €, tal como indica na tabela 15. Com este investimento, o custo total dos dois anos

passa a ser então de 3.319.452,00 €, em vez dos 3.546.900,00 € que seria sem qualquer UCTE. Como se pode verificar, tal representa uma poupança de 6,41 %, ou seja, 227.448,00 €. Estes valores não têm em conta as sucessivas alterações do preço do gasóleo, apenas indicam qual seriam os custos totais da operação da unidade extrativa a céu aberto durante dois anos com o valor do preço do gasóleo constante, aquando foi efetuada esta simulação.

Já com a subida do preço do gasóleo verificada para o valor de novembro, simulou-se como se comportariam os custos totais. No gráfico da figura 24, os dados são os mesmos, exceto, no preço do gasóleo, que subiu 32 cêntimos por litro até meados de novembro, e considerando-se o valor contante de 1,57 €/L.

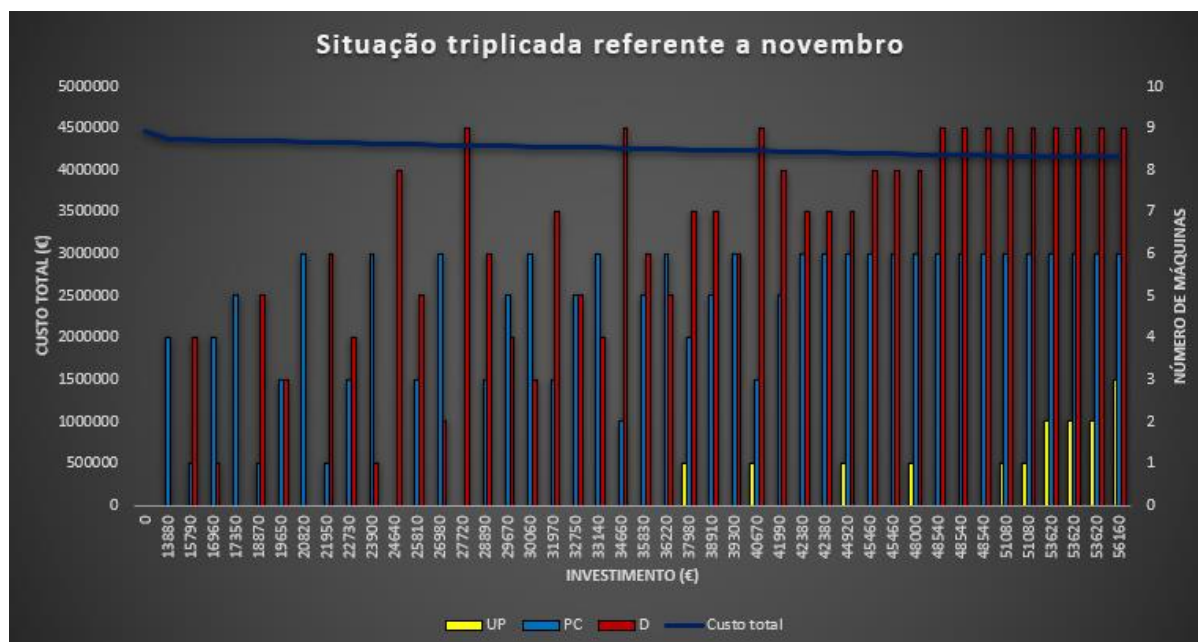


Figura 24: Número de máquinas com eletrolisadores e valores de custos totais para cada investimento na situação triplicada e referente ao valor de novembro do preço do combustível.

Na tabela 16 encontram-se os valores das variáveis otimizadas (UP, PC e D) para cada um dos investimentos na situação triplicada, bem como o custo total minimizado de cada uma das simulações com preço do gasóleo em vigor em novembro, a % de poupança que cada investimento proporciona face ao valor inicial dos custos e também o período de retorno do investimento de cada proposta.

O aumento nos preços dos combustíveis, aumentou ainda mais os custos no funcionamento da pedreira, como se pode verificar pela tabela 16. Assim na situação de fevereiro sem eletrolisadores, havia um custo total de 3.486.900,00 € passando agora para 4.454.445,60 €, sendo que o investimento para otimizar toda a maquinaria mantém-se. Com o uso dos UCTE, o custo total desce para 4.154.393,95 €, o que equivale a uma poupança de 6,74 %.

Tabela 16- Valores de investimento, custo total e respetiva percentagem de poupança e o período de retorno obtido da situação triplicada com preço do gasóleo em novembro de 2021.

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
0	0	0	0	4454445,6	0,00	0
13880		4		4375482,08	1,77	3,59

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
15790		1	4	4363465,55	2,04	3,55
16960		4	1	4357672,28	2,17	3,58
17350		5		4355741,2	2,22	3,59
18870		1	5	4345655,76	2,44	3,55
19650		3	3	4341793,58	2,53	3,56
20820		6		4336000,32	2,66	3,59
21950		1	6	4327845,96	2,84	3,55
22730		3	4	4323983,79	2,93	3,56
23900		6	1	4318190,52	3,06	3,58
24640			8	4311967,26	3,20	3,54
25810		3	5	4306174	3,33	3,56
26980		6	2	4300380,73	3,46	3,58
27720			9	4294157,47	3,60	3,54
28890		3	6	4288364,20	3,73	3,56
29670		5	4	4284502,03	3,82	3,57
30060		6	3	4282570,94	3,86	3,57
31970		3	7	4270554,41	4,13	3,55
32750		5	5	4266692,24	4,21	3,56
33140		6	4	4264761,15	4,26	3,57
34660		2	9	4254675,71	4,48	3,55
35830		5	6	4248882,44	4,61	3,56
36220		6	5	4246951,36	4,66	3,57
37980	1	4	7	4243707,45	4,73	3,66
38910		5	7	4231072,65	5,01	3,56
39300		6	6	4229141,56	5,06	3,56
40670	1	3	9	4227828,75	5,09	3,65
41990		5	8	4213262,86	5,41	3,56
42380		6	7	4211331,77	5,46	3,56
42380		6	7	4211331,77	5,46	3,56
44920	1	6	7	4204225,69	5,62	3,65
45460		6	8	4193521,98	5,86	3,56
45460		6	8	4193521,98	5,86	3,56
48000	1	6	8	4186415,90	6,02	3,65
48540		6	9	4175712,19	6,26	3,56
48540		6	9	4175712,19	6,26	3,56
48540		6	9	4175712,19	6,26	3,56
51080	1	6	9	4168606,11	6,42	3,64
51080	1	6	9	4168606,11	6,42	3,64
53620	2	6	9	4161500,03	6,58	3,71
53620	2	6	9	4161500,03	6,58	3,71
53620	2	6	9	4161500,03	6,58	3,71

Investimento (€)	UP	PC	D	Custo total (€)	% de poupança	Período de retorno (mês)
56160	3	6	9	4154393,95	6,74	3,78
						Média
						3,59
						Desvio-padrão
						0,06

É de notar que o aumento de 32 cêntimos no custo do combustível, teve um impacto muito significativo no custo total dos dois anos de produção, ou seja, um aumento de 907.545,60 €, que se traduz em 26 % do custo total referente ao custo do mês de fevereiro.

Ao analisar os diversos períodos de retorno da situação triplicada das tabelas 15 e 16, verifica-se que com preços de fevereiro, semelhante ao que acontece na situação real, o período de retorno da aquisição dos UCTE situa-se também praticamente ao fim de cinco meses, mas com uma dispersão extremamente baixa, cerca de 0,07 meses. No que diz respeito ao mês de novembro, o valor médio do período de retorno é de 3,59 meses, ou seja, é necessário esperar quatro meses para reaver o investimento. Esta situação é a que possui maior homogeneidade entre os valores obtidos do período de retorno, devido ao baixo desvio-padrão calculado, que é de 0,06 meses. Os valores de desvio-padrão demonstraram maior homogeneidade na situação triplicada devido talvez ao facto, de haver um maior número de resultados semelhantes, no intervalo a analisado. Comparando estas duas situações, é possível observar a mesma conclusão que na situação real, que é quanto mais alto for o preço do combustível, mais rapidamente se recupera o investimento.

5.4 REDUÇÃO DAS QUANTIDADES DAS EMISSÕES DE CO₂

O cálculo do combustível consumido durante os dois anos na situação onde toda a maquinaria está equipada com UCTE e da quantidade de emissões de CO₂ que foram produzidas em função do consumo de combustível foram realizados conforme o descrito em 4.7. Foram analisados os resultados dos quatro cenários e os mesmos são reportados na tabela 17. Os cenários correspondem às situações sem e com número máximo de eletrolisadores e os valores do preço do combustível ao preço de fevereiro e ao preço de novembro.

Tabela 17- Resultados do cálculo do combustível de cada situação e das respetivas emissões de CO₂ em dois anos.

	Situação	Combustível (L/ 2 anos)	Redução de combustível (L/ 2 anos)	Emissões de CO ₂ (Kg/ 2 anos)	Redução de emissões de CO ₂ (Kg/ 2 anos)
Sem eletrolisadores	Real	945 360	-	2 505 204	-
	3x	2 836 080	-	7 515 612	-
Com eletrolisadores	Real	869 731	75 629	2 304 788	200 416 (8%)
	3x	2 609 193	226887	6 914 363	601 249 (8%)

Interpretando a tabela 17, e comparando ambas as situações, verifica-se efetivamente um incremento na poupança do combustível, assim como uma diminuição nas emissões de CO₂. Tendo estas simulações um comportamento de proporcionalidade direta, é de realçar o resultado das emissões obtidas com os eletrolisadores no cenário onde há o triplo das máquinas, onde se reduziu a emissão de CO₂ 601 249 Kg de CO₂, com a redução do consumo de diesel em 226.887 L. A redução que se verificou na situação real, no consumo do combustível, foi de 75.629 L permitindo uma poupança a ser devidamente equacionada por parte da administração da pedreira, tendo associada uma redução na emissão de CO₂ libertado pelos gases de escape dos motores de combustão interna usados nas máquinas, correspondente a 8%, permitindo à referida administração, junto das Entidades Governamentais e dos seus Clientes, fazer uso dessa informação, tornando-a extremamente relevante, para a melhoria da imagem inerente à sua atividade mineira, através da adoção de medidas reais de minimização dos impactes ambientais a ela associados, dando passos concretos para a preservação ambiental tão desejada, reduzindo efetivamente a sua pegada ecológica, frisando que a exploração mineira pode dar passos concretos para a sua integração ambiental. De frisar que ambos os valores mencionados, são referentes à situação real.

Dado não ter sido possível obter os valores das emissões de gases de escape, como a concentração de partículas, o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), oxigénio (O₂) e os óxidos de azoto NO_x, analisa-se a redução dos valores de emissões de acordo com os dados fornecidos pela empresa Ultimate Cell. Assim obtém-se a percentagem de redução das emissões de -59,7%, -62,4%, -66,9%, +3% e -24,3%, para concentração de partículas, o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos, oxigénio e os óxidos de azoto NO_x, respetivamente.

Do ponto vista ambiental estes valores poderiam representar a uma escala global, se fosse feita a extrapolação para todas as máquinas deste tipo, um auxílio importante para a atual fase transitória de energia de redução de combustível fóssil e permitir que houvesse uma redução significativa das emissões antropogénicas.

6. CONCLUSÃO

Com a constante evolução da tecnologia para a fase de transição energética corrente, estudou-se a situação nacional em termos de eletrolisadores certificados para a acoplação a motores de combustão interna.

Atualmente verificou-se a existência em Portugal de duas empresas certificadas que comercializam eletrolisadores para acoplar aos motores de combustão interna analisados neste estudo, nomeadamente a HHO Plus, com o dispositivo *KIT DC4000 T*, e a ULTIMATE CELL, com o dispositivo *Ultimate Cell Truck Engine*. O estudo foi desenvolvido com o dispositivo da Ultimate Cell.

Recorreu-se ao programa GAMS para a resolução das propostas de otimização das várias situações estudadas. A primeira situação foi a real, em que compreendia um compressor pertencente à unidade de perfuração, duas pás carregadoras e três *dumpers*.

Analisaram-se os custos totais aos preços do gasóleo ao valor de fevereiro e com os preços do gasóleo ao valor de novembro de 2021. Em relação a fevereiro de 2021 obteve-se um custo total de 1.183.500,00 € desprovido de qualquer UCTE acoplado, mas aquando da acoplagem dos UCTE em todas as máquinas disponíveis, sendo que para tal é necessário um investimento de 18.720,00 €, o custo total diminui para 1.107.684,00 €.

Em novembro de 2021 o custo total do consumo de gasóleo relativo ao funcionamento das máquinas sem os UCTE foi de 1.486.015,20 €, mas quando se adicionam este custo diminui para 1.385.997,98 €, pelo que a utilização dos dispositivos tem um significado em termos de poupança de cerca de 6,73 %. Com sucessivos aumentos dos preços dos combustíveis que se verificam nos mercados, a adoção dos eletrolisadores torna-se numa grande vantagem para as empresas que estão inseridas neste setor, além de permitir uma atividade menos poluente.

Assumindo que se trata de uma pedreira de maiores dimensões, simulou-se também em relação aos preços do combustível do mês de fevereiro e do mês de novembro de 2021, mas com o triplo das máquinas. No mês de fevereiro o custo total de operação consistiu em 3.546.900,00 € sem qualquer UCTE, mas com a sua acoplação, este custo ficou reduzido a 3.319.452,00 €, consistindo assim numa poupança de 6,41% face ao valor inicial sem os UCTE, mas para isso é necessário investir 56.160,00 €, de forma a equipar todas as máquinas disponíveis. Já em novembro com o aumento verificado do gasóleo o custo total sem os UCTE tomou o valor de 4.454.445,60 €, o que aumenta bastante os custos operativos da pedreira. Ao acoplar os UCTE a todas as máquinas disponíveis nesta simulação, os custos totais reduzem cerca de 6,74 %, tomando assim o valor de 4.154.393,95 €.

Sabendo que cada litro de gasóleo consumido gera cerca 2,65 Kg de CO₂, obteve-se assim que o valor da quantidade de CO₂ produzido foi de 2.304.788 Kg ao invés de 2.505.204 Kg como seria sem o uso de eletrolisadores na situação real. Relativamente à situação triplicada,

houve uma redução 8%, o que é equivalente a 601 249 Kg de CO₂ que não foram emitidas, obtendo-se assim o valor de 6.914.363 Kg de CO₂.

Com o auxílio das médias e dos desvios-padrões calculados, é possível concluir que quanto mais alto for o preço do combustível mais rapidamente o investimento é recuperado. Os diversos casos analisados nas diferentes situações, permitiram obter resultados confiáveis dos diversos períodos de retorno, estes correspondem a um intervalo de quatro e cinco meses, quando as situações envolvem o preço de fevereiro e novembro do ano 2021, respetivamente.

Verifica-se assim que as indústrias que operam com estes motores de combustão interna, ao acoplar os UCTE podem beneficiar de uma redução de custos de operação e ainda participar na atual transição energética. Em especial as pedrelas, que desenvolvem a sua atividade extrativa a céu aberto, pois usam maquinaria pesada, que consome bastante combustível fóssil (gasóleo), emitindo assim quantidades consideráveis de CO₂ para a atmosfera terrestre.

É muito importante, que o setor mineiro esteja envolvido na transição energética, assim como o maior número possível de setores de atividade, de modo que, a descarbonização do planeta Terra, possa efetivamente ocorrer de forma justa, equilibrada e eficaz.

No que se refere ao setor mineiro de extração de rocha a céu aberto (pedrelas), a adoção de medidas de minimização dos seus impactes ambientais, recorrendo à adaptação de geradores de hidrogénio / UCTE aos motores de combustão interna usados nas máquinas, pode traduzir-se numa potencial redução quer no consumo de combustível, quer nas emissões de CO₂ geradas.

Estas potenciais reduções de consumo de gasóleo e de emissão de CO₂ nos gases de escape dos motores de combustão interna usados, devem ser avaliados adequadamente por parte das administrações das pedrelas, não só como vetor económico, mas também como vetor ambiental.

No vetor económico, há a potencialidade de reduzir o consumo de combustíveis, permitindo assim às referidas administrações, uma potencial redução de custos operacionais, favorecendo-lhes uma gestão financeira mais equilibrada e por consequência mais eficaz, consolidando a sua atividade face ao mercado existente.

No vetor ambiental, com a potencial redução das emissões de CO₂ emitidas pelos gases de escape dos motores de combustão interna usados, podem as administrações das pedrelas, quer junto das Entidades Governamentais quer dos seus clientes, fazer uso dessa informação, tornando-a extremamente relevante, para a melhoria da imagem ambiental e portanto comercial, inerente à sua atividade mineira, através da adoção de medidas reais de minimização dos impactes ambientais a ela associados, dando passos concretos para a preservação ambiental tão desejada, reduzindo efetivamente a sua pegada ecológica, frisando que a exploração mineira pode dar passos concretos para a sua integração ambiental, no fundo usar argumentos reais que permitem dizer que essa atividade mineira pode progressivamente, tornar-se passo a passo mais amiga do ambiente.

A Tese de Mestrado desenvolvida e apresentada, revela resultados teóricos potencialmente encorajadores, no âmbito da utilização de eletrolisadores acoplados a motores de combustão interna, usualmente utilizados nos equipamentos pesados que são disponibilizados pelos fabricantes, para diversos sectores de atividade, nomeadamente a extração mineira, a

agricultura, a construção civil e inclusive as pescas. Assim sendo, há um perfeito enquadramento, que este estudo académico permite realizar, num horizonte próximo, que é o de se poder transpor para a sua realização prática, aproveitando toda a metodologia desenvolvida. Com base no aproveitamento, de Fundos Comunitários Disponíveis, para a Investigação e Desenvolvimento, que permitam a ligação da academia com a indústria, nesta área temática tão fundamental e prioritária segundo a Comissão Europeia, como a busca de tecnologias que permitam obter soluções tecnicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, pode tornar-se uma orientação a prosseguir.

Uma vez adotada, permite a obtenção de resultados reais, durante um período de tempo previamente definido, nos equipamentos selecionados, nos regimes de trabalho mais adequados para cada sector de atividade, envolvendo:

- Uso inicial de eletrolisadores disponíveis no mercado, pelos respetivos fabricantes;
- Recolha de dados em contexto de laboração real, inerente a cada equipamento, na sua atividade diária, nos regimes funcionais previstos para a sua utilização;
- Possibilidade de otimização dos eletrolisadores, face aos dados adquiridos em contexto de laboração real, inerente a cada equipamento, na sua atividade diária, nos regimes funcionais previstos para a sua utilização;
- Contribuição efetiva, para adoção de medidas que minimizem os impactes ambientais, resultantes da laboração regular dos diferentes setores de atividade, dando relevância a:
 1. Aumentar a resiliência de cada setor económico, tornando-o menos poluidor, mais sustentável em termos ambientais e por consequência com maior competitividade face ao mercado global;
 2. Apontar soluções técnicas exequíveis, que garantam a manutenção das performances dos equipamentos, a sua segurança operacional, a amortização contabilística das soluções adotadas, assim como a sua efetiva rentabilização previsional.
- Estabelecer as tão proclamadas parcerias da academia face à indústria.

Espero ter contribuído de forma positiva, com a elaboração desta tese de mestrado e com os resultados teóricos obtidos, para que todos os fatores acima mencionados, possam ser futuramente implementados, por forma a garantir uma transição energética mais sustentável, estando disponível para num horizonte próximo, dar continuidade prática ao trabalho iniciado, através do estabelecimento de parcerias academia/indústria e da obtenção de recursos financeiros através de candidaturas a programas da União Europeia.

7. Bibliografia

- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 120, 2-4 Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- Barbir, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. Connecticut Global Fuel Cell Center, University of Connecticut, *Solar Energy*, 78(5), 661–669.
- Basshuysen, R. van, & Schäfer, F. (Eds.). (2004). *Internal Combustion Engine Handbook*. pp. 9-14
- Bensinger, W. D. (1973). *Rotationskolben—Verbrennungsmotoren*. Springer.
- bp. (2016). *BP Statistical Review of World Energy*. 65th Edition, Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University.
- bp. (2021). *Statistical Review of World Energy 2021*. 70th Editions, Centre for Energy Economics Research and Policy, Heriot-Watt University.
- Cârdu, M., & Baica, M. (2011). *Hydrogen-The Ecologically Ideal Energy Vector*, Department of Mathematical and Computer Sciences, The University of Wisconsin www.intechopen.com
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. In *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, Issue 12, 4901–4934. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Coelho, D. (2013). *Gás produto de eletrólise utilizado em motores de combustão interna*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá
- DTEA. (2013). *Testing Mercedes B180 2.0 CDI*. Instituto Superior Técnico, Engenharia Mecânica. *Results*. <http://dtea.ist.utl.pt>
- EIA. (2019). *International Energy Outlook 2019*. U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis-U.S. Department of Energy Washington, DC. www.eia.gov/ieo
- EPA. (2021). *Global Greenhouse Gas Emissions Data | US EPA*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Data de acesso: 25/03/2021

- Falcão, D. S., & Pinto, A. M. F. R. (2020). A review on PEM electrolyzer modelling: Guidelines for beginners. In *Journal of Cleaner Production*, Volume 261, 10 July 2020, 121-184. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121184>
- Fao. (2014). *Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks*. 19, FAO Statistics Division Working.
- Ferris, M. C., & Munson, T. S. (2000). Complementarity problems in GAMS and the PATH solver. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 24, 165–188.
- Gilliam, R., Graydon, J., Kirk, D., & Thorpe, S. (2007). A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3), 359–364.
- Godula-Jopek, A. (2015). *Hydrogen Production by Electrolysis by Agata Godula-Jopek*. 14-15, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim, Germany.
- Grigoriev, S., Porembsky, V., & Fateev, V. (2006). Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(2), 171–175.
- Grubb, W. (1959). Ionic migration in ion-exchange membranes. *Journal of Physical Chemistry*, 63(1), 55–67.
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2th ed.). 21-27, McGraw-Hill Education, Massachusetts.
- HHO Plus. (n.d.). *Kit DC4000 T HHO generators for Earthmoving machinery*. Data de acesso 15/10/2021, from https://www.hhoplus.com/product.php?id_product=58.
- Iberdrola. (2021). *Eletrolisador | Fator-chave na produção de hidrogénio verde*. <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/eletrolisador> Data de acesso 05/04/2021
- IEA. (2016). *Special Report Energy and Air Pollution*. International Energy Agency (IEA), Paris
- IEA. (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview*. International Energy Agency (IEA), Paris. <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ivy, J. (2004). *Summery of electrolytic hydrogen production: Milestone completion report*. U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Midwest Research Institute, 07/14/2014, 19-20, Colorado, USA.
- Kleperis, J., & Vladimir Linkov, V. (Eds.). (2012). *ELECTROLYSIS*. 5-7, InTech, Rijeka, Croatia.

- Martins, J. (2013). *Motores de Combustão Interna - 4ª edição Revista e Aumentada* (4th ed.). 47-51, Publindústria, Porto, Portugal
- Meyers, R. A., Lipman, T. E., & Weber, A. Z. (2019). *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series Editor-in-Chief: Fuel Cells and Hydrogen Production A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Second Edition* (2nd ed.). 783-785, Springer, Berkeley, CA, USA. <https://link.springer.com/bookseries/15436>
- Ni, M., Leung, M. K. H., & Leung, D. Y. C. (2008). Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC). In *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, Issue 9, pp. 2337–2354. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.02.048>
- NOAA. (2017). *NOAA's Greenhouse Gas Index up 40 percent since 1990*. <https://www.noaa.gov/news/noaa-s-greenhouse-gas-index-up-40-percent-since-1990>
Data de acesso 28/03/2021
- Office Department of Energy. (2000). *Proceedings of the 2000 U.S. DOE Hydrogen Program Review*, NREL/CP-570-28990, 11/05/2000, San Ramon, California, 58-60, Golden, Colorado
- Oliveira Peça, J. (2012). *MOTOR DIESEL SUA APLICAÇÃO EM EQUIPAMENTOS AGRÍCOLAS*. Universidade de Évora, Escola de Ciência e Tecnologia - Departamento de Engenharia Rural.
- ONU. (2019). *Alterações climáticas - Nações Unidas - ONU Portugal*. <https://unric.org/pt/mundo-espera-solucao-para-alteracoes-climaticas-diz-ban-ki-moon-7/> Consultado a 15/04/2021
- Pachauri, R., Mayer, L., Intergovernmental Panel on Climate Change. (2015). *Climate change 2014: synthesis report*, 154-156, Geneva, Switzerland.
- Pillot, B., Muselli, M., Poggi, P., & Dias, J. B. (2019). Historical trends in global energy policy and renewable power system issues in Sub-Saharan Africa: The case of solar PV. *Energy Policy*, 127, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.11.049>
- Martins Da Silva, M., (2017). *Produção de H₂ a partir de água, em pequena escala, utilizando elétrodos de Ni foam e com recurso a energia fotovoltaica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa – Faculdade de Ciências
- PNEC2030. (2019). *PLANO NACIONAL ENERGIA E CLIMA 2021-2030 (PNEC 2030)*.
- Ritchie, H., Roser, M. (2020). *Energy Production and Consumption*. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/energy> Data de acesso 06/04/2021
- RNC2050. (2019). *ROTEIRO PARA A NEUTRALIDADE CARBÓNICA 2050 (RNC2050)*.
- Ross, B. (2002). *Electrolysis cell and internal combustion engine kit comprising the same* (International Publication Number Patent WO 02/099260 A1). <https://patents.google.com/patent/WO2002099260A1>

- Russell, J., Nuttall, L., & Fickett, A. (1973). Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis. *American Chemical Society Division of Fuel Chemistry Preprints*, 18(3), 24–40.
- Salzano, F., Skaperdas, G., & Mezzina, A. (1985). Water vapor electrolysis at high temperature: Systems considerations and benefits. *International Journal of Hydrogen Energy*, 10(22), 801–809
- Sher, E., (1998). *Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines - Pollutant Formation and Control*; 1st edition; ACADEMIC PRESS, London
- Soroudi, A. (2017). Power system optimization modeling in GAMS. In *Power System Optimization Modeling in GAMS*. 1-32, Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62350-4>
- Sugiawan, Y., & Managi, S. (2019). New evidence of energy-growth nexus from inclusive wealth. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 103, pp. 40–48, Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.044>
- Tijani, A. S., Yusup, N. A. B., & Rahim, A. H. A. (2014). Mathematical Modelling and Simulation Analysis of Advanced Alkaline Electrolyzer System for Hydrogen Production. *Procedia Technology*, 15, 798–806. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.053>
- Tolmasquim, M. (2003). *Fontes Renováveis de Energia no Brasil*. Intersciencias, Rio de Janeiro.
- Ulleberg, O. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(1), 21–33.
- Ultimate Cell. (2019). *Ultimate Cell Truck Engine (UCTE)*. <https://www.ultimatecell.pt/dispositivos-para-camioes-e-geradores/> Data de acesso 13/10/2021
- Ultimate Power. (2019). *Ultimate Cell - Ultimate Power*. <https://www.ultimatecell.pt/quem-somos/> Data de acesso 15/10/2021
- URBERECICLAR. (2021). *URBERECICLAR*. <https://sites.google.com/view/urbereciclar> Data de acesso 10/10/2021
- Ursúa, A., Gandía, L. M., & Sanchis, P. (2012). Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 100(2), 410–426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2156750>
- Ursúa, A., Marroyo, L., Gubía, E., Gandía, L. M., Diéguez, P. M., & Sanchis, P. (2009). Influence of the power supply on the energy efficiency of an alkaline water electrolyser. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(8), 3221–3233. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.017>
- WEC. (2021). *World Energy Issues Monitor 2021*. World Energy Council.

- WHO. (2006). *Air quality guidelines : global update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. World Health Organization, 37-38, Druckpartner Moser, Germany.
- Zahid, M., Schefold, J., & Brisse, A.. (2010). *High-Temperature Water Electrolysis Using Planar Solid Oxide Fuel Cell Technology: a Review* (D. Stolten & T. Grube, Eds.; 3rd ed), Vol. 78, 227-242, Wiley-VCH Verlag.

Apêndices

Apêndice 1

Tabela 1- Resultados da simulação efetuada sobre a situação real com o preço do gasóleo em fevereiro

Orçamento	UP	PC	D	Investimento	Custo total
0	0	0	0	0	1183500
5000		1		3470	1168490
6000	1		1	5620	1164808
7000		2		6940	1153480
8000		2		6940	1153480
9000	1		2	8700	1151256
10000		1	2	9630	1141386
11000		2	1	10020	1139928
12000	1		3	11780	1137704
13000		1	3	12710	1127834
14000		2	2	13100	1126376
15000		2	2	13100	1126376
16000	1	2	2	15640	1121236
17000		2	3	16180	1112824
18000		2	3	16180	1112824
19000	1	2	3	18720	1107684

Tabela 2-Resultados da simulação efetuada sobre a situação real com o preço do gasóleo em novembro

Orçamento	UP	PC	D	Investimento	Custo total
0	0	0	0	0	1486015,2
5000		1		3470	1466274,32
6000	1		1	5620	1461099,328
7000		2		6940	1446533,44
8000		2		6940	1446533,44
9000	1		2	8700	1443289,536
10000		1	2	9630	1430654,736
11000		2	1	10020	1428723,648
12000	1		3	11780	1425479,744
13000		1	3	12710	1412844,944
14000		2	2	13100	1410913,856
15000		2	2	13100	1410913,856
16000	1	2	2	15640	1403807,776
17000		2	3	16180	1393104,064
18000		2	3	16181	1393104,065
19000	1	2	3	18720	1385997,984

Tabela 3- Resultados da simulação efetuada sobre a situação triplicada com o preço do gasóleo em fevereiro

Orçamento	UP	PC	D	Investimento	Custo total
0	0	0	0	0	3546900
15000		4		13880	3486860
16000		1	4	15790	3477682
17000		4	1	16960	3473308
18000		5		17350	3471850
19000		1	5	18870	3464130
20000		3	3	19650	3461214
21000		6		20820	3456840
22000		1	6	21950	3450578
23000		3	4	22730	3447662
24000		6	1	23900	3443288
25000			8	24640	3438484
26000		3	5	25810	3434110
27000		6	2	26980	3429736
28000			9	27720	3424932
29000		3	6	28890	3420558
30000		5	4	29670	3417642
31000		6	3	30060	3416184
32000		3	7	31970	3407006
33000		5	5	32750	3404090
34000		6	4	33140	3402632
35000		2	9	34660	3394912
36000		5	6	35830	3390538
37000		6	5	36220	3389080
38000	1	4	7	37980	3386856
39000		5	7	38910	3376986
40000		6	6	39300	3375528
41000	1	3	9	40670	3374762
42000		5	8	41990	3363434
43000		6	7	42380	3361976
44000		6	7	42380	3361976
45000	1	6	7	44920	3356836
46000		6	8	45460	3348424
47000		6	8	45460	3348424
48000	1	6	8	48000	3343284
49000		6	9	48540	3334872
50000		6	9	48540	3334872
51000		6	9	48540	3334872

52000	1	6	9	51080	3329732
53000	1	6	9	51080	3329732
54000	2	6	9	53620	3324592
55000	2	6	9	53620	3324592
56000	2	6	9	53620	3324592
57000	3	6	9	56160	3319452

Tabela 4- Resultados da simulação efetuada sobre a situação triplicada com o preço do gásóleo em novembro

Orçamento	UP	PC	D	Investimento	Custo total
0	0	0	0	0	4454445.6
15000		4		13880	4375482.08
16000		1	4	15790	4363465.552
17000		4	1	16960	4357672.288
18000		5		17350	4355741.2
19000		1	5	18870	4345655.76
20000		3	3	19650	4341793.584
21000		6		20820	4336000.32
22000		1	6	21950	4327845.968
23000		3	4	22730	4323983.792
24000		6	1	23900	4318190.528
25000			8	24640	4311967.264
26000		3	5	25810	4306174
27000		6	2	26980	4300380.736
28000			9	27720	4294157.472
29000		3	6	28890	4288364.208
30000		5	4	29670	4284502.032
31000		6	3	30060	4282570.944
32000		3	7	31970	4270554.416
33000		5	5	32750	4266692.24
34000		6	4	33140	4264761.152
35000		2	9	34660	4254675.712
36000		5	6	35830	4248882.448
37000		6	5	36220	4246951.36
38000	1	4	7	37980	4243707.456
39000		5	7	38910	4231072.656
40000		6	6	39300	4229141.568
41000	1	3	9	40670	4227828.752
42000		5	8	41990	4213262.864
43000		6	7	42380	4211331.776
44000		6	7	42380	4211331.776
45000	1	6	7	44920	4204225.696
46000		6	8	45460	4193521.984

47000		6	8	45460	4193521.984
48000	1	6	8	48000	4186415.904
49000		6	9	48540	4175712.192
50000		6	9	48540	4175712.192
51000		6	9	48540	4175712.192
52000	1	6	9	51080	4168606.112
53000	1	6	9	51080	4168606.112
54000	2	6	9	53620	4161500.032
55000	2	6	9	53620	4161500.032
56000	2	6	9	53620	4161500.032
57000	3	6	9	56160	4154393.952

Anexos

Anexo I

Especificações técnicas do gerador XAMS 615 Md Atlas Copco, que pertence à unidade de perfuração.

Specification

Notice: Every data listed is verified by LECTURA Specs team experts. However, incomplete data and mistakes might occur. Contact our team with any change suggestion.

Volume flow	34.2 m³/min	Max. pressure	8,6 bar
Weight	5700 kg	Engine manuf.	Mercedes-Benz
Engine type	OM442 LA	Engine power	286 kW
Additional power set	###	Transport length	###
Transport width	###	Transport height	###
Dimension lxxh	###	Displacement	###
Revolutions at max torque	###	Max. torque	###
No. of cylinders	###	Cylinder bore x stroke	###
Emission level	###		
Basic model			

Special equipment

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| ✕ Automatic lubricator | Combination of micro filter |
| ✕ Compressed air recycler | ✕ ZTV-SIB |

Anexo II

Especificações técnicas da pá carregadora Volvo BM L180



Volvo BM L180



- **Engine output gross:**
SAE J1349 211 kW (289 hp)
- **Operating weight:**
23,4-28,5 t (51 600-62 800 lb)
- **Buckets:**
4,2-14,0 m³ (5,5-18,3 yd³)

The high-capacity loader for the tough jobs

- **Torque Parallel Linkage** –
Powerful lift-arm system with:
 - unique breakout moment
 - excellent parallel lift-arm action
 - high lift height and long reach
- Direct-injected, turbocharged Volvo diesel
- Automatic Power Shift
- Enclosed wet oil-cooled brakes
- **Care Cab** – the cab with great comfort and safety
- Precision steering with good stability and maneuverability
- **Contronic** monitoring system
 - Pilot-operated hydraulic system
 - Hydraulic attachment bracket

VOLVO BM

ENGINE				DRIVETRAIN			
 Volvo TD 122, a 6-cylinder, in-line, direct-injection, 4-stroke, turbocharged diesel engine with wet, replaceable cylinder liners.				 Torque converter: Single-stage. Transmission: Volvo BM power shift transmission of countershaft type with single-lever control. Directional clutch modulation provides faster and smoother shifting between forward and reverse. Shifting system: Volvo BM Automatic Power Shift.			
Air cleaning: Air cleaning in three stages 1. Multi cyclone cleaner with automatic particle ejector 2. Paper filter with indicator 3. Safety filter				Axes: Fully floating half-shafts with planetary type hub reductions. One-piece cast-steel axle housing. Fixed front axle and oscillating rear axle.			
Differential: 100-% differential lock on front axle. Engagement and disengagement by means of switch on cab floor.				Hub reduction: Volvo BM manufacture with low-friction roller bearings on each planet wheel.			
Tires: Alternative tires are available for different work operations.				Torque multiplication 2,27 : 1 Transmission, make Volvo BM Model HT 220 Speeds forward/reverse 1 km/h (mile/h) 6,5 (4,0) 2 km/h (mile/h) 12,1 (7,5) 3 km/h (mile/h) 24,0 (14,9) 4F km/h (mile/h) 35,1 (21,8)			
Measurement with tires 26.5 - 25 Front axle, make Volvo BM Model AWB 40 Rear axle, make Volvo BM Model AWB 40 Oscillation ± ° 15 Ground clearance at 15° mm (in) 610 (24,0) oscillation							
ELECTRICAL SYSTEM				BRAKE SYSTEM			
 Contronic monitoring system with extended function surveillance. Solid-state electrical distribution box. The electrical system is well-protected by fuses. Prewired for optional equipment.				 The brake system meets the requirements of ISO 3450, SAE J1473 and EG 71/320 Service brakes: Volvo BM fully hydraulically operated, enclosed wet circulation oil-cooled disc brakes. Transmission disengagement during braking pre-selected via a switch on the instrument panel.			
Central warning: <i>Central warning lamp for following functions: engine oil pressure, brake pressure, parking brake (buzzer by starting), engine temperature (buzzer as well), transmission temperature, transmission oil pressure, temperature front and rear axle/brake cooling (buzzer as well), secondary steering (optional equipment), transmission hydraulic oil filter.</i>				Secondary system: Dual-circuit system with rechargeable accumulators. One circuit or the parking brake fulfills the requirements.			
Parking brake: Enclosed, wet multi-disc brake built into the transmission. Spring-loaded application. Hydraulic release via a lever to the left of the operator.				Number of discs/wheel 1 Area/brake pad cm ² (in ²) 1750 (271) Brake area/wheel cm ² (in ²) 3500 (542) Accumulators, volume, total l (in ³) 3 (183) Parking brake, area, total cm ² (in ²) 2583 (400) Accumulator, volume, total l (in ³) 0,5 (30,5)			
Voltage V 24 Batteries V 2x12 Battery capacity Ah 2x140 Alternator rating W / A 1680 / 60 Starter motor output kW (hp) 6,6 (9,0)							
SERVICE REFILL CAPACITIES							
							
Crankcase l (US gal) 33 (8,7) Fuel tank l (US gal) 339 (89,6) Cooling system l (US gal) 80 (21,1) Transmission total l (US gal) 48 (12,7) Front axle, total l (US gal) 46 (12,2) Rear axle, total l (US gal) 46 (12,2) Hydraulic system, total l (US gal) 260 (68,7) Hydraulic tank l (US gal) 165 (43,6)							

DIMENSIONAL DATA FOR VOLVO BM L180

Tires: 26.5 R 25* XHA (L3)

Where applicable, specifications and dimensions are in accordance with ISO 7131, SAE J732, ISO 7546, SAE J742, ISO 5998, SAE J818.

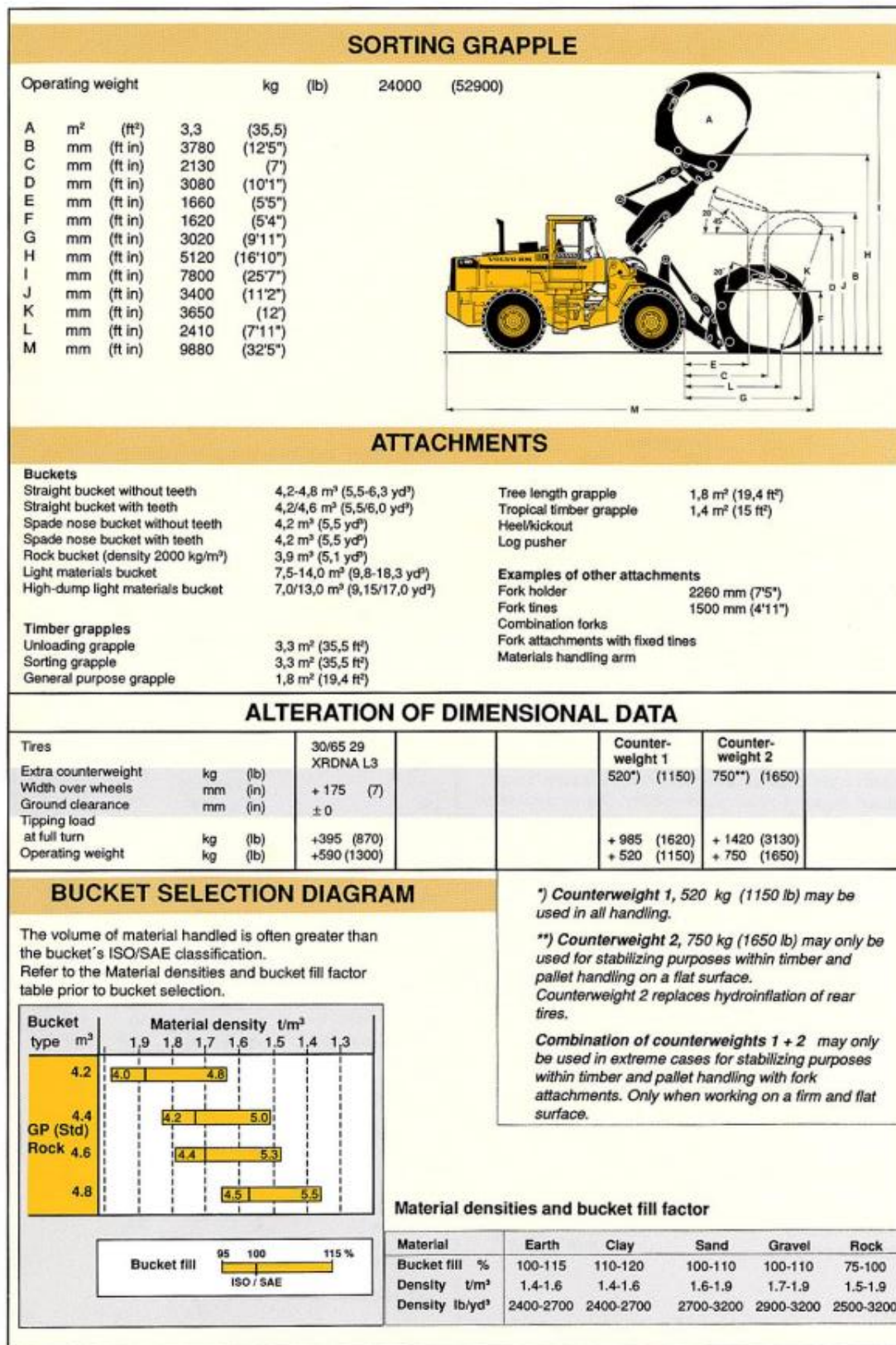
B	mm	(ft in)	6960	(22'10")
C	mm	(ft in)	3550	(11'8")
D	mm	(ft in)	480	(1'7")
F	mm	(ft in)	3560	(11'8")
G	mm	(ft in)	2135	(7')
J	mm	(ft in)	4100	(13'5")
K	mm	(ft in)	4480	(14'8")
O	°		57	
P	°		45	
R	°		45	
R ₁	°		48	
S	°		71	
T	mm	(ft in)	110	(0'4")
U	mm	(ft in)	520	(1'9")
X	mm	(ft in)	2280	(7'6")
Y	mm	(ft in)	2955	(9'8")
Z	mm	(ft in)	4030	(13'3")
a ₂	mm	(ft in)	6780	(22'3")
a ₃	mm	(ft in)	3830	(12'7")
a ₄	±		37	

* Carrying position SAE

Bucket type

- 1 = Straight without teeth
- 2 = Spade nose with teeth
- 3 = Straight with teeth
- 4) = Edge savers
- R = Hook-On
- D = Pin-On

Order No.		92183		92182		91611		91610		91973
		4)		4)		4)		4)		
Volume heaped	m ³	4,8	4,6	4,8	4,6	4,4	4,2	4,4	4,2	4,2
	(yd ³)	(6,3)	(6,0)	(6,3)	(6,0)	(5,8)	(5,5)	(5,8)	(5,5)	(5,5)
Mounting/Bucket type	D / 1	D / 1	D / 1	R / 1	R / 1	D / 1	D / 1	R / 1	R / 1	D / 3
Tipping load, straight	kg	17410	18000	16730	17300	17630	18200	16950	17510	18190
	(lb)	(38380)	(39680)	(36880)	(38140)	(38870)	(40125)	(37370)	(38600)	(40100)
35° turn	kg	15290	15870	14640	15210	15500	16070	14860	15410	16030
	(lb)	(33710)	(34990)	(32280)	(33530)	(34170)	(35430)	(32760)	(33970)	(35340)
at full turn	kg	15040	15620	14390	14960	15260	15820	14620	15170	15780
	(lb)	(33160)	(34440)	(31720)	(32980)	(33640)	(34880)	(32230)	(33440)	(34790)
Breakout force	kN	181	193	170	180	189	202	177	189	210
	(lbf)	(40690)	(43390)	(38220)	(40460)	(42490)	(45410)	(39790)	(42490)	(47210)
A	mm	8640	8540	8730	8620	8580	8470	8660	8560	8390
	(ft in)	(28'4")	(28'0")	(28'8")	(28'3")	(28'2")	(27'10")	(28'5")	(28'1")	(27'6")
L	mm	6180	6180	6230	6230	6130	6130	6180	6180	6200
	(ft in)	(20'3")	(20'3")	(20'5")	(20'5")	(20'1")	(20'1")	(20'3")	(20'3")	(20'4")
V	mm	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200	3200
	(ft in)	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")	(10'6")
a ₁ clearance circle	mm	14960	14900	15010	14950	14920	14870	14970	14910	14830
	(ft in)	(49'1")	(48'10")	(49'3")	(49'0")	(48'11")	(48'9")	(49'1")	(48'11")	(48'8")
E	mm	1420	1330	1500	1410	1350	1270	1430	1350	1200
	(ft in)	(4'8")	(4'4")	(4'11")	(4'7")	(4'5")	(4'2")	(4'8")	(4'5")	(3'11")
H	mm	3070	3140	3020	3090	3120	3190	3060	3140	3240
	(ft in)	(10'1")	(10'3")	(9'11")	(10'2")	(10'3")	(10'6")	(10'0")	(10'3")	(10'8")
M	mm	1330	1290	1390	1350	1280	1240	1350	1310	1190
	(ft in)	(4'4")	(4'3")	(4'6")	(4'5")	(4'2")	(4'1")	(4'5")	(4'3")	(3'11")
N	mm	1960	1950	2000	1990	1930	1920	1980	1970	1890
	(ft in)	(6'5")	(6'4")	(6'7")	(6'6")	(6'4")	(6'3")	(6'6")	(6'5")	(6'2")
Operating weight	kg	23600	23290	23930	23620	23470	23160	23780	23470	23350
	(lb)	(52030)	(51340)	(52760)	(52075)	(51740)	(51060)	(52430)	(51740)	(51480)



STEERING SYSTEM				HYDRAULIC SYSTEM			
 Load-sensing hydrostatic articulated steering with power amplification. Pump: Variable-flow axial piston pump mounted on a power take-off on the transmission. System supply: The steering system is fed from a separate steering pump. Cylinders: Two double-acting cylinders with chromed piston rods.				 Open centre system with pilot-operated hydraulic valve. Pump: A double pump (vane pump) mounted on a power take-off on the transmission. <i>Pump 1</i> works with all tilt and lift movements. <i>Pump 2</i> works with tilt out and lift up to 20 MPa (2900 psi). A pilot-controlled selector valve cuts-in flow to the system. System supply: The pilot system is fed from a separate pilot pump, shared by the brake system. Valve: Double-acting 3-spool valve. The control valve is actuated by a 3-spool pilot valve. Lift function: The valve has four positions: Raise, neutral, lower and float. Disengageable inductive/magnetic automatic boom kick-out, adjustable for any position between maximum reach and full lift height. Tilt function: The valve has three positions: Rollback, neutral and dump. Disengageable inductive/magnetic automatic bucket positioner, adjustable to any desired loading angle.			
Steering cylinders			2	Cylinders: Double-acting.			
Bore	mm (in)	100	(3,9)	Filters: Full-flow filtration through 10 µm filter cartridge.			
Piston rod diameter	mm (in)	50	(2)	Loader unit: <i>Torque Parallel Linkage</i> – with very high breakout force throughout the working range. Good parallel lift-arm action with both level and fully angled-up bucket throughout entire lifting range. Lift cylinders mounted in line with lift-arms. Tilt cylinder mounted between lift-arms.			
Stroke	mm (in)	418	(16,5)	Main pumps			
Relief pressure	MPa (psi)	21,0	(3045)	Relief pressure, pump 1	MPa (psi)	22,5	(3362)
Max. flow	l/min	116,6		Flow	l/min	313,4	
	(US gal/min)		(30,8)		(US gal/min)		(82,8)
at	MPa (psi)	10	(1450)	at	MPa (psi)	10	(1450)
and engine speed	r/s (r/min)	35,0	(2100)	and engine speed	r/s (r/min)	35,0	(2100)
CAB				Relief pressure, pump 2	MPa (psi)	20,0	(2900)
 Tested and approved according to standards: ROPS (ISO/CD 3471-1990, SAE J1040), FOPS (ISO 3449, SAE J231), also meets standard according to "Overhead guards for rider lift trucks" (ISO 6055) and "Operator Restraint System" (SAE J386). Safety and comfort: The <i>Care Cab</i> has convenient boarding steps and a wide door opening. It is lined on the inside with sound-absorbent material and mounted on 4 rubber pads to damp sound and inhibit vibration. Large glazed areas, good all-round visibility. The windshield is curved and made of laminated green-tinted glass. All important operator information is presented clearly in front of the operator. Information panel for <i>Contronic</i> monitoring system (optional). Heater and defroster: Heating element with filtered fresh air and 4-speed fan which gives over pressure and defroster outlets for all windows. Operator's seat: Spring-suspended, adjustable operator's seat with lap belt. The seat is hung on a bracket on the rear wall. The force from the lap belt is absorbed by the seat rails.				Flow	l/min	91,5	
Emergency exits			3		(US gal/min)		(24,2)
Sound level in cab (ISO 6396)				at	MPa (psi)	10	(1450)
max.	dB (A)	-		and engine speed	r/s (r/min)	35,0	(2100)
Ventilation	m³/min (ft³)	10	(353)	Relief pressure, pump 2	MPa (psi)	20,0	(2900)
Heating capacity	kW (Btu/h)	11	(37500)	Flow	l/min	91,5	
Operator's seat	ISRI	6000/575			(US gal/min)		(24,2)
				at	MPa (psi)	10	(1450)
				and engine speed	r/s (r/min)	35,0	(2100)
				Pilot pump			
				Relief pressure	MPa (psi)	3,0-4,5	(435-652)
				Flow	l/min	26,0	
					(US gal/min)		(6,9)
				at	MPa (psi)	10	(1450)
				and engine speed	r/s (r/min)	35,0	(2100)
				Lift cylinders			
				Bore	mm (in)	190	(7,5)
				Piston rod diameter	mm (in)	90	(3,5)
				Stroke	mm (in)	788	(31,0)
				Tilt cylinder		1	
				Bore	mm (in)	260	(10,2)
				Piston rod diameter	mm (in)	120	(4,7)
				Stroke	mm (in)	480	(18,9)
				Raise time *	s	6,6	
				Dump time *	s	2,5	
				Lower time (empty)	s	3,5	
				Total cycle time	s	12,6	
				* with load as per ISO 5998 and SAE J818.			

STANDARD EQUIPMENT			
Safety and comfort ROPS- and FOPS-cab Cab heating with filtered fresh air intake and defroster Tinted glass Ergonomically designed and adjustable operator's seat with seat belt Rear-view mirrors, external, two Rear-view mirror, internal, one Lighting: headlights, full and dipped beam, asymmetrical, halogen parking lights working lights, front (two), halogen working lights, rear (two), halogen brake lights rear lights cab lighting instrument lighting direction indicators Utility box in cab File holder Instrument panel with symbols	Sun visor Safety start Lever lock for hydraulic levers Mudguards Hazard flashers Windshield wipers, front and rear windows Intermittent wipers, front Horn Ashtray Cigarette lighter Lifting lugs Openable window, right Radio console without radio Extended lube points Engine & electrical system Contronic monitoring system Battery disconnect switch Alternator Air cleaner with ejector discharge Engine temperature gauge Hydraulic transmission temperature gauge Hour recorder Fuel gauge	Tell-tale and warning lamps for: working lights, front/rear charging full-beam headlights direction indicators engine oil pressure transmission oil pressure differential lock parking brake brake pressure hazard flashers air cleaner transmission hydraulic oil filter <i>Central warning (with buzzer):</i> engine oil pressure brake pressure parking brake (with buzzer) engine temperature (with buzzer) transmission temperature transmission oil pressure temperature front and rear axle/brake cooling (with buzzer) secondary steering (optional) transmission hydraulic oil filter	Drivetrain Power Shift transmission Automatic Power Shift (APS) (4F/3R) Single-lever shift control Differential lock, front axle Internal circulation brake cooling, front and rear axle Tires 26,5 R25* Hydraulic system Control valve (3-spool) Pilot valve (3-spool) Tilt position indicator Boom kickout Bucket positioner Hydraulic oil cooler Vane pump
OPTIONAL EQUIPMENT (Standard on certain markets)			
Service and maintenance equipment Tool kit Wheel nut wrench set Lockable tool box Engine equipment Electrical engine block heater Low-emission version Preheating coil Oil bath pre-cleaner Cyclone pre-cleaner High-altitude version Coolant filter Electrical equipment Rotating beacon with collapsible mount Side marker lights Left-hand asymmetrical headlights (halogen) Extra working lights, front (two), halogen	Extra working lights, rear (two), halogen Attachment lights (halogen) Back-up alarm Transmission equipment Switch, forward/reverse shifting Cab equipment Radio Instructor's seat Heated operator's seat Windshield washers, front/rear Dual brake pedals Hand throttle Sliding vent window Air conditioning Installation kit for radio Extra speedometer Tilttable steering wheel Information panel (Contronic): start figuration, setting language and versions, operating hours	general operating information, stop watch/trip meter, cycle counter, service interval engine electrical system transmission axles/brakes Hydraulic equipment 3rd hydraulic control Return line, 3rd hydraulic control Electrical cable kit for 4th hydraulic control Hydraulic attachment bracket incl. separate attachment locking Boom lowering system Boom Suspension System External equipment Towing hitch Slow Moving Vehicle sign Covering mudguards	Counterweight, 520 kg (1150 lb) Counterweight, 750 kg (1650 lb) Protective equipment Protective grilles for headlights Protective grilles for rear working lights Protective grilles for rear lights Muffler guard Other equipment German version (TBG) Air horn Secondary steering Comfort Drive Control (CDC) Fueling strainer External brake oil cooling system, front and rear axles Tires 30/65* R29

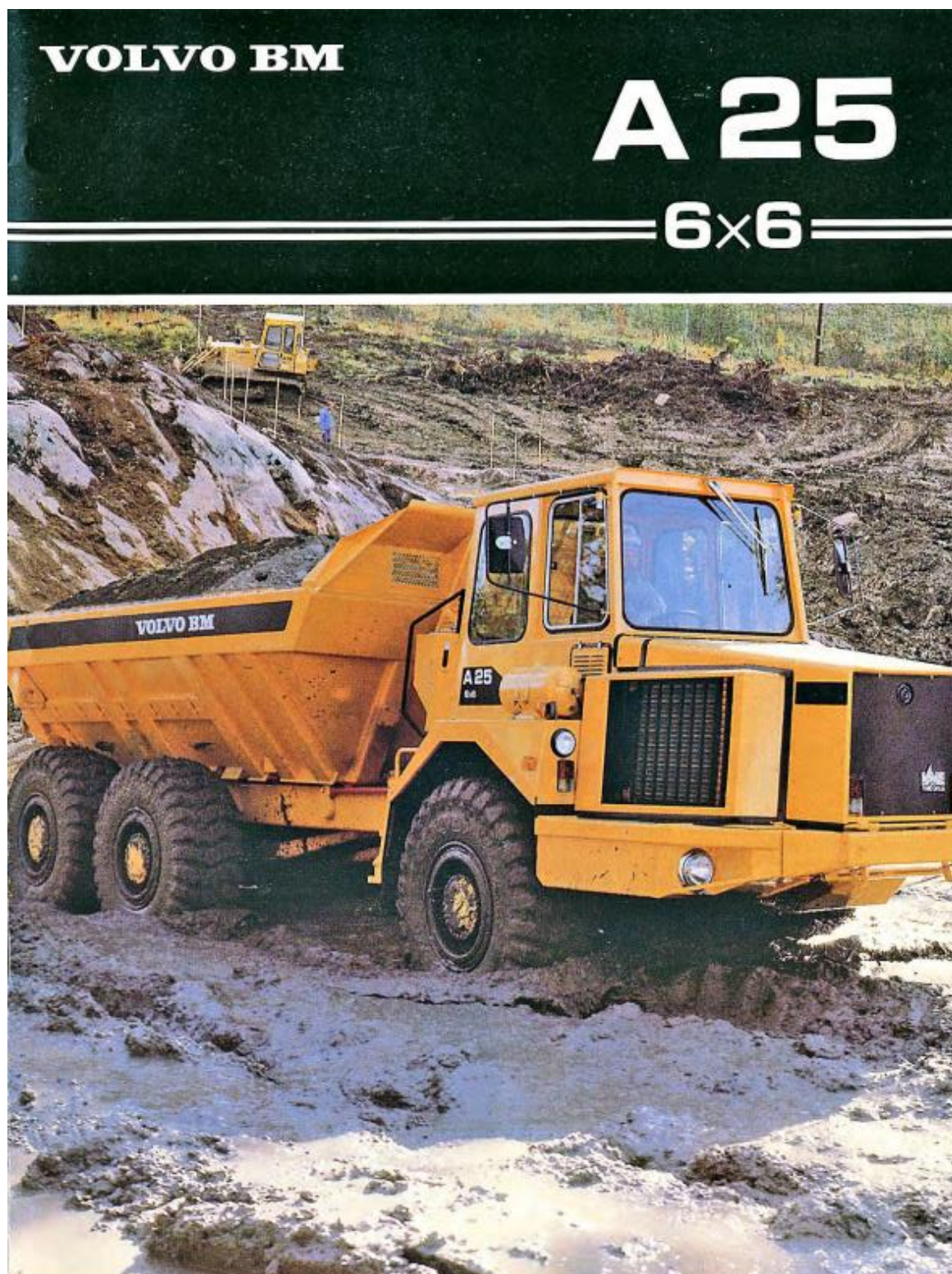
We reserve the right to change specifications and design without prior notice.
The illustrations do not necessarily show the standard version of the machine.

VME Industries Sweden AB
S-631 85 ESKILSTUNA SWEDEN

Ref. No. 21 2 669 1958 ENGELSKA
Printed in Sweden 7.01.93

Anexo III

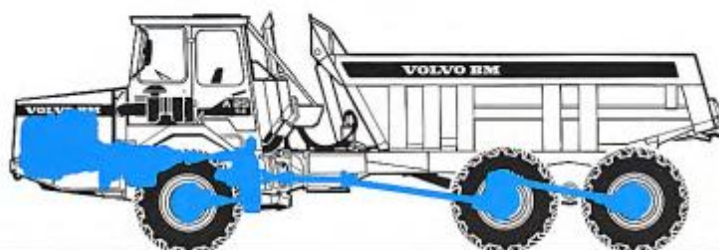
Especificações técnicas do *dumper* Volvo BM 25



6 WHEEL DRIVE A25 6x6- FOR FAST HIGH - VOLUME HAULING

The Volvo BM A25 6x6 is a flexible 25 ton machine intended primarily for use on relatively long haulage runs and in severe terrain. The articulated A25 6x6 is built for high average speeds. This means that it can move large quantities of bulk material in a short time span, allowing high productivity to be maintained, without putting high demands on haulroad upkeep.

The features that give the A25 6x6 its high-speed capability are its suspension system, automatic gear shift, high powered engine and its superb maneuverability. The features that keep it rolling on the difficult haul sections are its six large high-flotation tires the all-terrain bogie and the longitudinal and transverse differential-locks which can be engaged on-the-move.



DRIVETRAIN

The A25 6x6 is powered by the Volvo TD 71 K turbo diesel with intercooler. This is a modern, lightweight engine combining high power with low fuel consumption.

The drivetrain is composed of well-matched, components for long term reliability. Power is transmitted to the six driving wheels via a fully automatic transmission with lock-up and a dropbox with built-in differential and high/low gear unit.

The dropbox distributes power between the front axle and the bogie axles. Drive to the trailing bogie axle, together with the longitudinal differential-lock, can be engaged and disengaged on the move as required.

All axles have transverse differential-locks with 100 % lock up. This superb system enables you to select the right drive combination to give optimum traction and offroad mobility in bad conditions and fast, economic hauling when conditions are good.

ALL-TERRAIN BOGIE

Volvo BM's all-terrain bogie has independent axle suspension and ample ground clearance. This gives each pair of wheels a high degree of individual movement with good ground contact. This ensures a smooth, "floating" ride over uneven terrain. Volvo BM's bogie design provides optimum distribution of the drive power under all operating conditions.

The A25 6x6 has a bogie that is designed to allow for different tire options. Equipped with 23.5-25 tires, the A25 6x6 also has very low ground pressure and rolling resistance for unexcelled off-road mobility.





COMFORT AND SAFETY

Because the A25 6x6 is designed for high-speed operation, the operator is comfortably seated, even during hard driving over bumpy surfaces. The cab is spacious with low noise levels and has well arranged controls and instrumentation for safe, effortless driving.

The cab is tested and ROPS/FOPS-approved. The dual-circuit brake system has disc-brakes on all axles. This gives security during transports of big loads.



SUSPENSION

Tires, rubber suspension with shock absorbers, rubber cab mounting and the suspended operator's seat, all interact to give the A25 6x6 excellent driving characteristics. This suspension is also completely maintenance-free.



SIMPLE SERVICE

Simple, fast servicing procedures give you more productive operating hours from the machine and your operator. Lube points are easily accessible, and there are only a few which need daily attention. The hood can be tilted forward, completely exposing the engine compartment for routine checks and maintenance.



ENGINE

Volvo TD 71 K Intercooler: 6-cylinder-in-line direct-injected turbocharged aftercooled 4-cycle diesel with overhead valves and wet replaceable cylinder linings.

Fan: Hydrostatic driven thermostatically controlled radiator fan drawing power only when needed.

Max power at	rps	rpm	40	2400
SAE J 1349 Gross	kW	hp	180	244
Flywheel power at	rps	rpm	40	2400
SAE J 1349 Net / DIN 6271*	kW	hp	177	240
Max torque at	rps	rpm	27	1600
SAE J 1349 Gross	Nm	lbf ft	815	601
SAE J 1349 Net / DIN 6271**	Nm	lbf ft	800	590,1
Displacement, total	dm ³	in ³	6,73	411
Bore	mm	in	104,77	4,125
Stroke	mm	in	130	5,12
Compression ratio			15,5:1	

*) with fan at normal 20 rps (1200 rpm). With fan operating at 40 rps (2400 rpm) the flywheel power is 160 kW (218 hp) which corresponds to DIN 70020.

**) with fan at normal 20 rps (1200 rpm). With fan operating at 40 rps (2400 rpm) the maximum torque is 710 Nm which corresponds to DIN 70020.



ELECTRICAL SYSTEM

Voltage	V	24
Battery capacity	Ah / No	135 / 2
Generator rating	W / A	1540 / 55
Starter motor power	kW hp	5 6,8



DRIVETRAIN

Torque converter : single stage with free-wheeling stator and automatic lock-up.

Transmission : Planetary transmission, electronically controlled fully automatic gear-shifting.

Dropbox: Volvo BM dropbox with 2-stage design, power take-off and differential.

Differential locks : One longitudinal and three transversal differential locks. All with 100% lock-up.

Axles: All axles are of Volvo BM design. The driving axles have fully floating axle shafts with planetary gear type hub reduction.

Torque converter	2,4 : 1
Transmission	ZF 5 HP 500
Speeds (Tires 23.5 R 25)	
Low gear, forward	1 km/h mph 6 3,7
	2 km/h mph 9 5,6
	3 km/h mph 15 9,3
	4 km/h mph 22 13,7
	5 km/h mph 31 19,3
Low gear, reverse	1 km/h mph 7 4,3
High gear, forward	1 km/h mph 9 5,6
	2 km/h mph 15 9,3
	3 km/h mph 25 15,5
	4 km/h mph 36 22,4
	5 km/h mph 51 31,2
High gear, reverse	1 km/h mph 11 6,8
Dropbox	FL 652
Front axle, type	AH S4 E
First bogie axle, type	AH S4 C
Second bogie axle, type	AH S4 D



TIRES

Tires, front, radials
Tires, bogie, radials

23,5 R 25*
23,5 R 25*



BRAKE SYSTEM

Dual-circuit system with air-hydraulic disc-brakes, designed to comply with ISO 3450, and SAE J1473 at total weight 39700 kg - 87530 lb.

Circuit division: one circuit for front axle and one for bogie.

Parking brake: The parking brake is a spring actuated brake on the propeller shaft, designed to hold a loaded machine on a grade up to 18%.

Compressor: The pneumatic system is driven by a gear driven compressor.

Exhaust brake retarder: standard.



STEERING SYSTEM

Hydromechanical articulated steering.
3,4 lock-to-lock turns.

Supplementary steering: Supplementary steering function as standard. Complies with ISO 5010 at total weight 39700 kg - 87530 lb.

Cylinders: Two double-acting cylinders.

Steering angle: $\pm 45^\circ$



SUSPENSION

VOLVO BM SUSPENSION SYSTEM

Front axle: Two rubber springs with bottoming absorption on either side. Stabilizer. Two shock-absorbers on either side.



CAB

Volvo BM cab, tested and approved in accordance with ROPS standard ISO 3471/SAE J1040C and FOPS ISO 3449/SAE J231.

The cab is mounted on rubber pads, which reduces vibrations at the operator's station.

Heater and defroster: Filtered air and pressurized cab.

Operator's seat: Operator's seat with flameproof upholstery. Extra seat for trainer.

Number of exits (includes door)	2
Internal noise level	dB (A) 77



HYDRAULIC SYSTEM

Pump: Engine-dependent variable piston pumps mounted on flywheel power take-offs. Three of four take-offs are used.

One ground-dependent piston pump for supplementary steering mounted on the dropbox.

Filtration: Filtration of oil through 2 paper and magnet filters.

* = pump 1,2,3

** = ground-dependent hydraulic pump

Pump capacity	dm ³ (l) /min	100* / 118**
	US gal /min	26,4* / 31,2**
at	rps	40
	rpm	2400
Working pressure	MPa	18,5*
	psi	2680*
	MPa	18,5**
	psi	2680**



BODY

Cylinder: One single-acting, 6-stage-hoist cylinder with automatic tipping stop.

Body: Body made of hardened-and-tempered steel with particularly high impact strength.

Tipping angle	°	63	
Tipping time with load	s	16	
Lowering time	s	22	
Body plate thickness			
front/sides	mm	in	6 0,24
bottom/chute	mm	in	10 0,39
Wear plates	mm	in	8 0,31
Body and wearplates			
Yield strength	kp /mm ²	psi	90 128 000
Tensile strength	kp /mm ²	psi	125 178 000
Hardness min.	HB		360-440



WEIGHTS

Service weight includes body with wear plates, oil, fuel and water.

Service weight	kg	lb	8800	19400
Front	kg	lb	8400	18520
Rear	kg	lb	17200	37920
Total	kg	lb		
Payload				
Total	kg	lb	22500	49610
Total weight				
Front	kg	lb	11200	24700
Rear	kg	lb	28500	62830
Total	kg	lb	39700	87530



GROUND PRESSURE

At 15% slump of unloaded diameter and specified weights. Cone penetrometer value at depth of 250 mm (9,8 in).

Unloaded				
Front	kPa	psi	97	14,0
Rear	kPa	psi	43	6,23
Loaded				
Front	kPa	psi	124	18,0
Rear	kPa	psi	151	21,9
Cone penetrometer value			66	



LOAD CAPACITY

Body volumes according to SAE 2:1.

Load capacity	kg	sh tons	22500	25
Body volumes, struck	m ³	yd ³	10,4	13,6
heaped	m ³	yd ³	13,0	17,0

In the case of bodies with struck volumes of less than 10 m³ (13 yd³), heaped volume is given to the nearest half m³.

In the case of bodies with struck volumes of 10 m³ (13 yd³) or more, heaped volume is given to the nearest whole m³.

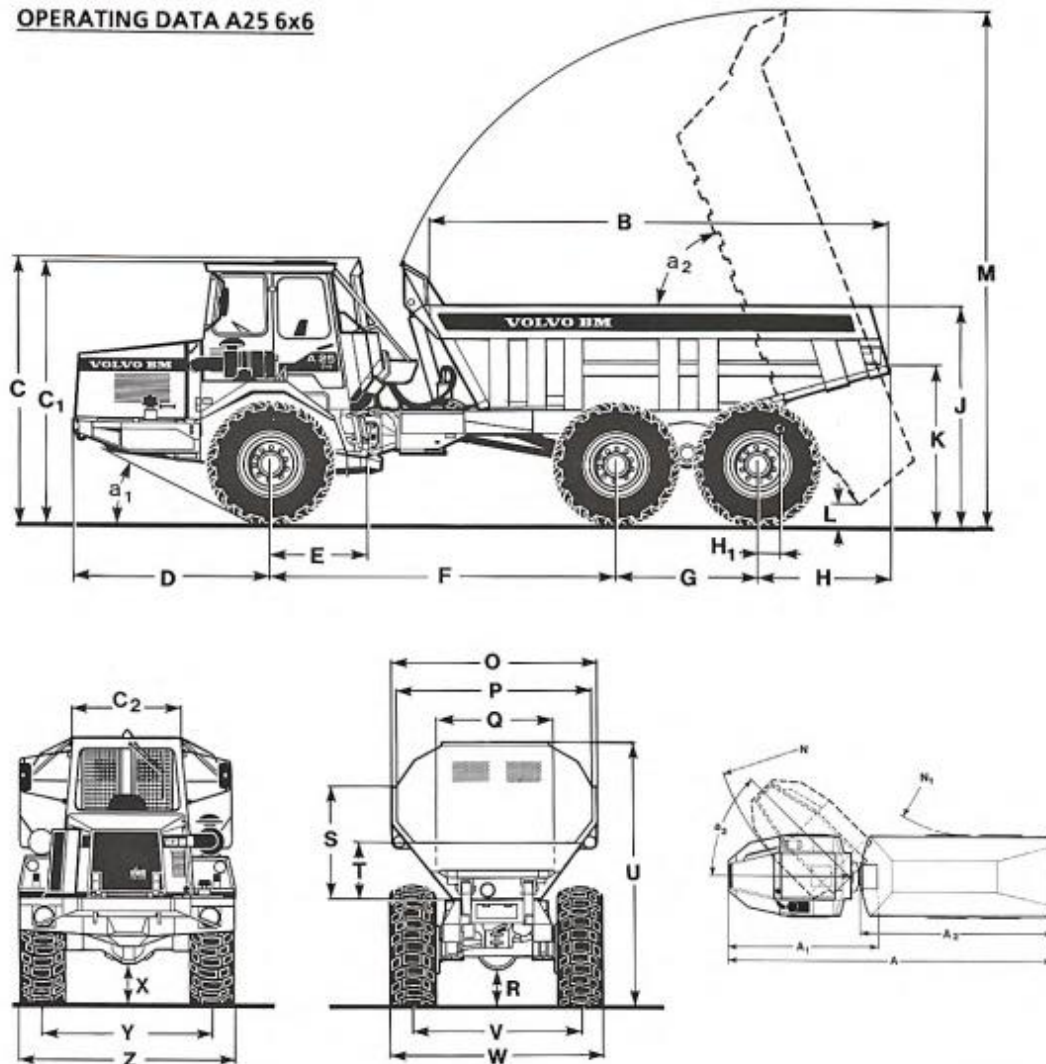
Struck volume is given in m³ (yd³) to one decimal place.



SERVICE REFILL CAPACITIES

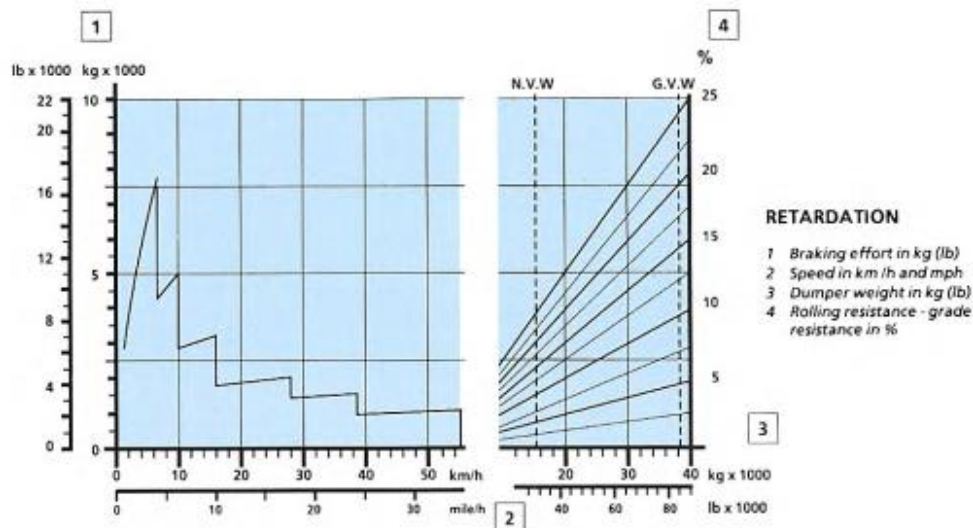
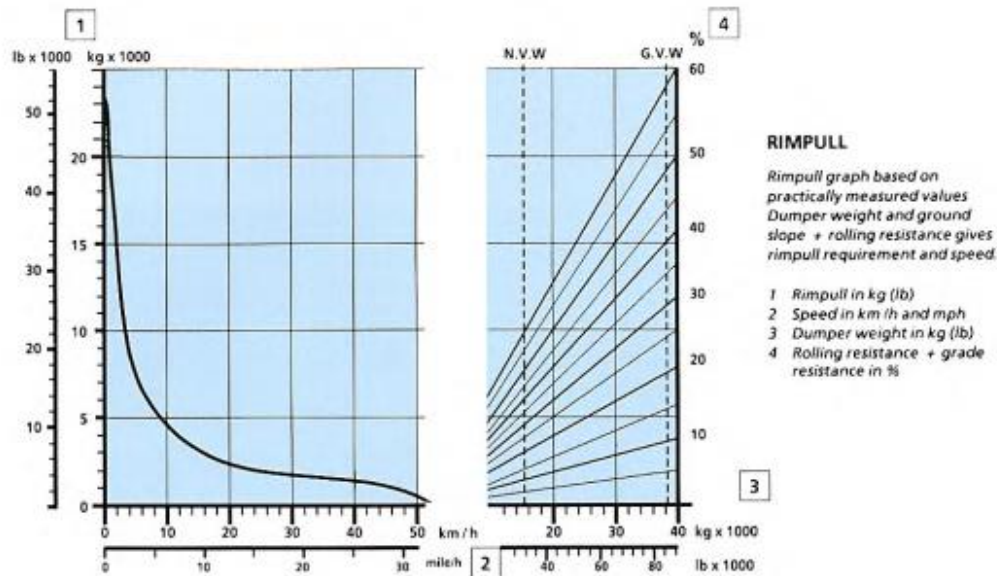
Crankcase	dm ³ (l)	US gal	24	6,3
Fuel tank	dm ³ (l)	US gal	280	74
Cooling system	dm ³ (l)	US gal	30	8,0
Transmission total	dm ³ (l)	US gal	16	4,2
Dropbox	dm ³ (l)	US gal	6	1,6
Front axle	dm ³ (l)	US gal	35	9,2
First bogie axle	dm ³ (l)	US gal	33	8,7
Second bogie axle	dm ³ (l)	US gal	35	9,2
Hydraulic system	dm ³ (l)	US gal	160	42
Hydraulic tank	dm ³ (l)	US gal	145	38,3

OPERATING DATA A25 6x6



* = unloaded machine

A	mm	ft in	9800	32'1"	H ₁	mm	ft in	425	1'5"	S	mm	ft in	1265	4'2"
A ₁	mm	ft in	4495	14'9"	J	mm	ft in	2535	8'4"	T	mm	ft in	380	1'3"
A ₂	mm	ft in	6000	19'8"	J*	mm	ft in	2600	8'6"	U	mm	ft in	3160	10'4"
B	mm	ft in	5440	17'10"	K	mm	ft in	1820	5'11"	U*	mm	ft in	3205	10'6"
C	mm	ft in	3200	10'6"	K*	mm	ft in	1870	6'1"	V	mm	ft in	2150	7'1"
C*	mm	ft in	3240	10'8"	L	mm	ft in	430	1'5"	W	mm	ft in	2795	9'2"
C ₁	mm	ft in	3150	10'4"	M	mm	ft in	6100	20'	X	mm	ft in	450	1'6"
C ₁ *	mm	ft in	3190	10'6"	N	mm	ft in	7850	25'9"	X*	mm	ft in	465	1'6"
C ₂	mm	ft in	1320	4'4"	N ₁	mm	ft in	4250	13'11"	Y	mm	ft in	2150	7'1"
D	mm	ft in	2415	7'11"	O	mm	ft in	2480	8'2"	Z	mm	ft in	2795	9'2"
E	mm	ft in	1200	3'11"	P	mm	ft in	2320	7'7"	a ₁	°		26	
F	mm	ft in	4175	13'8"	R	mm	ft in	450	1'6"	a ₂	°		63	
G	mm	ft in	1650	5'5"	R*	mm	ft in	505	1'8"	a ₃	°		45	
H	mm	ft in	1580	5'2"										



INSTRUCTIONS:

Diagonal lines represent total resistance (Grade % plus rolling resistance %). Charts based on 0% rolling resistance, standard tires and gearing unless otherwise stated.

1. Find the total resistance on diagonal lines on righthand border of performance or retarder chart.
2. Follow the diagonal line downward and intersect the NVW or GVW weight line.
3. From intersection, read horizontally left to intersect the performance or retarder curve.
4. Read down for vehicle speed.

VOLVO BM A25 6x6

STANDARD EQUIPMENT

Safety and comfort

ROPS/FOPS cab
Cab heater with filtered fresh air and defroster
Ergonomically designed and adjustable operator's seat
Windshield wipers
Windshield washers
Rear-view mirrors
Sun visor
Attachment points for seat belt
Trainer seat
Cigarette lighter
Ashtray
Horn
Seat belt
Protective grille for rear window
Hazard flashers
Tinted glass
Fender step with work platform
Mudguard wideners, front, 2,7 m
Mud flaps
Lights:
headlights
main/dipped/asym.
parking lights
reverse lights
Work lights

direction indicators
brake lights
cab lighting
instrument lighting
Tool box
Steering joint locking assembly

Engine and electrical system

Turbocharger
Intercooler
Extra fuel filter
Alternator
Preheating
Secondary steering
Battery disconnect switch
Electrical outlet
Indicator for aircleaner
Speedometer
Gauges for:
brake pressure
fuel
engine temperature
revolutions and hours
Pilot lamps for:
battery charging
main beam
direction indicators
Automatic cut-outs

Warning lamps for:
low hydraulic oil level
steering function
engine-dependent pump
brake hydraulics
low brake pressure
parking brake
engine oil pressure
transmission temperature
air filter
engine overspeed
Central warning:
hydraulic oil level
steering function
brake fluid level
brake pressure
radiator coolant level
engine oil pressure
engine overspeed
airfilter
battery charging
transmission temperature

Drivetrain

Torque converter
Automatic gear-shifting
Dropbox with high/low gear
Automatic lock-up
Longitudinal differential lock
Differential lock, front axle
Differential lock, first bogie axle
Differential lock, second bogie axle

Body with wear plates and exhaust gas ducts

Tires

Front / Rear
23,5 R 25* / 23,5 R 25*

OPTIONAL EQUIPMENT

Electrical equipment

Rotating beacon with collapsible mount

Body equipment

Body heating

Cab

Air conditioning

Towing shackle

Under our policy of continuous product improvement, we reserve the right to change specifications and design without prior notice. The illustrations do not necessarily show the standard version of the machine.

VME Americas Inc.

23001 Euclid Avenue
P.O. Box 178017
Cleveland, Ohio 44117-8017

