



Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente

Dissertação de Mestrado em Tecnologia e Gestão de Ambiente

Avaliação de Ciclo de Vida da produção e utilização de hidrogénio com base em biomassa lenho-celulósica para Portugal

Ana Filipa Duarte de Sousa Coelho

Júri

Presidente: Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo

Orientadores: Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

Mestre João Miguel dos Santos Almeida Nunes

Vogal: Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro

Agosto 2008

*“O segredo de progredir é começar.
O segredo de começar é dividir as tarefas árduas
e complicadas, em tarefas pequenas e fáceis
de executar e depois começar pela primeira.”*

Mark Twain

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Doutor Fausto Freire e Mestre João Nunes, pelo seu saber já consolidado pela experiência e pela insistência nos pormenores para a elaboração desta dissertação, transformando-me numa pessoa profissionalmente mais enriquecida.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me e dando estímulos todos os dias, valorizando todos os meus potenciais. Sem eles esta experiência não seria possível.

A todos os meus “velhos” e grandes amigos, que apesar da sua ausência em determinados momentos, a sua amizade esteve sempre presente, incentivando-me incondicionalmente nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos do curso que, apesar da distância dos últimos tempos, sempre me incentivaram e deram força no decorrer do meu percurso académico. Juntos partilhámos momentos inesquecíveis.

Aos amigos do Laboratório de Ecologia Industrial, pelo companheirismo, boa disposição e disponibilidade de entajuda partilhada, mesmo nos momentos mais difíceis.

A todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a minha evolução pessoal e profissional, em todo o meu percurso académico e em especial na execução desta dissertação.

Resumo

O crescente aumento do preço do barril do petróleo e os importantes impactes ambientais associados ao uso e produção dos combustíveis fósseis tem contribuído para o potencial uso do hidrogénio como substituto dos combustíveis fósseis. Contudo, a maior parte do hidrogénio é produzido com base no “*steam reforming*” do gás natural e outras fontes de energia fósseis, sendo apenas 3% com base em fontes renováveis. Por conseguinte, deve surgir uma mudança para que seja cada vez mais produzido hidrogénio com base em fontes renováveis. Para isso são necessários estudos para avaliar o potencial de sistemas de bio-hidrogénio (bio-H₂), abordando aspectos tecnológicos, energéticos e ambientais, encontrando oportunidades de melhoria.

Nesta dissertação apresenta-se um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida realizado para investigar as necessidades energéticas e os impactes ambientais inerentes à produção e utilização de bio-H₂ com base em biomassa lenho-celulósica, para a região centro de Portugal. Um modelo de ciclo de vida (“*well to wheels*”) foi desenvolvido e implementado, e tem como principais etapas: *i*) produção e transporte da biomassa; *ii*) produção do gás de síntese; *iii*) produção, transporte e armazenamento do bio-H₂ e *iv*) utilização do bio-H₂ em veículos ligeiros. O modelo considera duas alternativas tecnológicas para a produção e utilização de bio-H₂ (fases *iii* e *iv* do ciclo de vida): compressão do bio-H₂ (35 MPa) e a sua utilização em veículos “*fuel cell*” e liquefacção do bio-H₂ (-253°C) e a sua utilização em motores de combustão interna. Foi descrito detalhadamente o sistema de produção de bio-H₂ e elaborado um inventário de ciclo de vida. Os dados recolhidos para a produção e transporte da biomassa são referentes a Portugal e os dados para os restantes processos incluídos no ciclo de vida foram retirados da literatura técnico-científica.

A análise dos resultados está dividida em duas partes: “*well to tank*” e “*well to wheels*”, sendo apresentada a energia primária fóssil requerida e os impactes ambientais do ciclo de vida do bio-H₂, por MJ de energia final do Bio-H₂, (“*well to tank*”) e por km percorrido (“*well to wheels*”). Foi realizada uma análise detalhada das fases de ciclo de vida e da comparação das duas alternativas consideradas (compressão e liquefacção). Adicionalmente, os resultados numa perspectiva “*well to wheels*” para os dois veículos propulsionados a bio-H₂ são comparados, energética e ambientalmente, com um veículo propulsionado a diesel.

Os resultados obtidos numa perspectiva “*well to tank*” permitiram verificar que a produção e transporte do bio-H₂ comprimido necessita de 1,05 MJ de energia primária fóssil por cada MJ de bio-H₂ produzido, enquanto o bio-H₂ liquefeito necessita de 1,18 MJ (mais 12%). A principal razão para esta diferença reside no processo de densificação energética, pois o processo de liquefacção requer mais 39% de energia primária fóssil do que o processo de compressão. Os resultados da avaliação dos impactes ambientais foram obtidos através do método CML-2000 “*mid-point*”. A emissão de gases com efeito de estufa (GEE), numa perspectiva “*well to tank*” varia entre os 96 gCO_{2-eq} (bio-H₂ comprimido) e 106 gCO_{2-eq} (bio-H₂ liquefeito) por cada MJ de bio-H₂ produzido. O processo que requer mais energia primária fóssil (32% da energia total requerida) e que tem maiores impactes ambientais é o “*reforming*”. A razão do significativo contributo no ciclo de vida, deve-se ao elevado consumo de electricidade, a qual representa 95% da energia total requerida e contribui com 81% das emissões totais de GEE,

Em termos do consumo de energia primária fóssil no ciclo de vida (“*well to wheels*”) os resultados permitiram verificar que um veículo “*fuel cell*” propulsionado a bio-H₂ comprimido é mais eficiente do que um veículo com motor de combustão interna propulsionado a bio-H₂ liquefeito, uma vez que, este necessita de mais 55% de energia primária fóssil por km percorrido.

Através da comparação realizada entre os veículos que utilizam bio-H₂ com os veículos que utilizam diesel concluiu-se que o bio-H₂ comprimido é o que requer menores quantidades de energia primária fóssil, por km percorrido. Os resultados obtidos na avaliação ambiental apresentaram valores mais elevados para o ciclo de vida do bio-H₂ liquefeito em todas as categorias de impacte ambiental. Em termos de GEE, um veículo “*fuel cell*” propulsionado a bio-H₂ comprimido pode evitar emissões na ordem dos 54% (155 g CO_{2-eq}) e dos 34% (67 gCO_{2-eq}) em comparação com veículos com motores de combustão interna propulsionados a bio-H₂ liquefeito e a diesel, respectivamente.

A análise a uma possível implementação de uma central de produção de bio-H₂ com base em biomassa lenho-celulósica para Portugal não é uma perspectiva promissora. Constatou-se, através dos resultados preliminares obtidos, que a quantidade de biomassa e de área de cultivo necessárias à produção de bio-H₂, em elevada escala, apresenta limitações significativas face à realidade portuguesa.

Palavras-chave: Hidrogénio; biomassa lenho-celulósica; Cultura energética; Análise Energética; Análise Ambiental; Avaliação de Ciclo de Vida.

Abstract

The potential for using hydrogen as a future energy carrier to displace fossil fuels in the transportation sector has been emerging due to increasing oil barrel prices and important environmental impacts associated with fossil fuels production and use. However, hydrogen production is currently accomplished almost exclusively by steam reforming of natural gas and other fossil resources with less than 3% based on renewable energy sources. Therefore, a shift must occur from hydrogen based on fossil resources (“fossil-H₂”) to hydrogen based on renewable resources (“bio-H₂”), but studies are needed to assess the potential of bio-H₂ systems, addressing technological, energy and environmental aspects and finding opportunities for improvement.

This thesis presents a Life Cycle Assessment carried out to investigate the energy requirement and environmental impacts of bio-H₂ to be produced from lignocellulosic biomass from the center region of Portugal. A “well to wheels” model has been developed and implemented. The model includes the following life cycle stages: *i*) biomass production and transportation; *ii*) biomass gasification; *iii*) hydrogen production, transportation and storage and *iv*) hydrogen use as fuel in passenger vehicles. Two alternative pathways have been considered for hydrogen production and use (life cycle stages *iii* and *iv*): hydrogen compressed (35 MPa) to be used in fuel cell engines and hydrogen liquefied (-253°C) to be used in internal combustion engines, which have been compared. A detailed description of the biomass-to-hydrogen system has been performed and the corresponding life cycle inventory implemented. Data has been collected for the biomass production and transportation for Portugal and from the scientific and technical literature for the remaining life cycle processes.

Results are presented in terms of life-cycle primary energy requirement and environmental impacts for the overall system divided in two parts: “well to tank” and “well to wheels”. A more detailed analysis is performed per life cycle stage and to compare the two alternative hydrogen systems considered (compressed and liquefied). In addition, well to wheel results for both bio-H₂ vehicles are compared with a fossil diesel vehicle in terms of primary energy savings and environmental impacts, with emphasis in avoided GHG emissions.

In terms of “well to tank” results, the compressed bio-H₂ route requires 1,05 per MJ while the liquefied bio-H₂ route requires 1,18 MJ of primary energy input per MJ of Bio-H₂

(more 12%), which is mainly due to an higher energy intensive liquefaction process (more 39%) than compression. Environmental life cycle impact results have been calculated using the CML 2000 mid-point approach. The greenhouse gas (GHG) emissions (well to tank) range from 96gCO_{2-eq} (bio-H₂ compressed) to 106gCO_{2-eq} (bio-H₂ liquefied) per MJ of bio-H₂ produced. The process that requires more fossil energy (32% of total fossil energy) and has more environmental impacts is steam reforming due to high electrical power consumption, which represents 95% of energy requirement and contributes to 81% of total GHG emissions.

In terms of overall life cycle (“well to wheels”) fossil energy requirement, the results show that a fuel cell engine vehicle using bio-H₂ compressed is more efficient than an internal combustion engine (ICE) vehicle fuelled with bio-H₂ liquefied, which requires more 55% energy per km travelled. Similarly, the environmental impacts are also higher for the bio-H₂ ICE vehicle. Bio-H₂ fuel cell could avoid about 155 gCO_{2-eq} (54% reduction), comparatively a bio-H₂ vehicle ICE.

The “well to wheels” comparison of bio-H₂ vehicles with a fossil diesel vehicle shows that bio-H₂ fuel cell vehicles require less fossil energy than diesel vehicle ICE. In terms of greenhouse gases (GHG) emissions, a bio-H₂ fuel cell vehicle displacing a fossil diesel vehicle could avoid about 67gCO_{2-eq} per km travelled (34% reduction).

Finally, the dissertation presents a preliminary assessment of the potential for implementing a lignocellulosic biomass-to-hydrogen system at the centre region of Portugal. Preliminary results show a strong limitation in terms of the biomass feedstock and cultivated area needed to supply the large hydrogen production scale expected for near-future plants.

Keywords: Hydrogen; Lignocellulosic Biomass; Energy Crops; Energy Analysis; Environmental Life Cycle Assessment; weel to wheels.

Índice

<i>Agradecimentos</i>	<i>i</i>
<i>Resumo</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Índice</i>	<i>vi</i>
<i>Índice de Tabelas</i>	<i>vii</i>
<i>Índice de Figuras</i>	<i>viii</i>
<i>Capítulo 1 - Introdução</i>	<i>1</i>
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Tecnologias de produção de hidrogénio	3
1.4 Estrutura da dissertação	6
<i>Capítulo 2 – Modelo e inventário do ciclo de vida do bio-hidrogénio</i>	<i>7</i>
2.1 Introdução	7
2.2 Metodologia de ACV: definição de fronteiras e unidade funcional	9
2.3 Descrição das fases do CV.....	12
2.4 Inventário	21
<i>Capítulo 3 – Resultados e discussão</i>	<i>26</i>
3.1 Análise energética.....	26
3.2 Análise ambiental	31
3.3 Comparação com outros estudos	36
3.4 Bio-hidrogénio vs Diesel	38
3.5 Avaliação do potencial com base nos resultados obtidos	41
<i>Capítulo 4 – Conclusões</i>	<i>44</i>
4.1 Conclusões	44
4.2 Trabalhos futuros	46
<i>Referências bibliográficas</i>	<i>47</i>
<i>Apêndice A – Fluxogramas obtidos no programa SimaPro</i>	<i>A- 1</i>

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Necessidades de biomassa lenho-celulósica.....	16
Tabela 2.2 - Etapas do sistema de limpeza de gases	18
Tabela 2.3 - Composição do gás de síntese	18
Tabela 2.4 - Inventário da produção de bio-hidrogénio	22
Tabela 2.5 - Inventário da construção da central de produção	23
Tabela 2.6 - Inventário do transporte de bio-H ₂	24
Tabela 2.7 - Inventário do consumo de bio-hidrogénio.....	24
Tabela 2.8 - Eficiências da #Alternativa 1	25
Tabela 2.9 - Eficiências da #Alternativa 2.....	25
Tabela 3.1 – Resultados das várias categorias de impacte ambiental	32
Tabela 3.2 - Energia primária requerida: presente estudo vs outros estudos científicos	37
Tabela 3.3 - Emissões de CO ₂ -eq: presente estudo vs outros estudos científicos.....	37
Tabela 3.4 – Resultados das várias categorias de impacte ambiental: bio-H ₂ vs diesel.....	39
Tabela 3.5 – Raio de acção teórico/raio de acção real	42

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Métodos de produção de Hidrogénio.....	3
Figura 2.1 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de bio-H ₂	11
Figura 2.2 - Preço da produção de hidrogénio em função da potência do gaseificador (adaptado de Hamelinck e Faaij, 2002).....	12
Figura 2.3 - Fluxograma da energia auxiliar requerida para a produção.....	15
Figura 2.4 - Gaseificador em leito fluidizado circulante (adaptado de Lensu e Alakangas, 2004).....	17
Figura 2.5 - Armazenamento de hidrogénio comprimido.	21
Figura 2.6 - Armazenamento de hidrogénio líquido.....	21
Figura 3.1 - Fluxograma de energia fóssil primária requerida na produção e transporte do bio-H ₂ comprimido.	27
Figura 3.2 - Fluxograma de energia primária requerida no CV do H ₂ liquefeito.....	29
Figura 3.3 - Energia primária fóssil requerida em cada processo.	30
Figura 3.4 - Energia primária fóssil requerida na densificação energética e transporte do bio-H ₂	31
Figura 3.5 - Valores normalizados das categorias de impacte ambiental.....	33
Figura 3.6 - Emissões de Sb-eq na produção e transporte do bio-H ₂	34
Figura 3.7 – Emissões de SO ₂ -eq na produção e transporte do bio-H ₂	35
Figura 3.8 - Emissões de CO ₂ -eq na produção e transporte do bio-H ₂	36
Figura 3.9 - Energia fóssil primária requerida: bio-H ₂ vs diesel.	38
Figura 3.10 - Categorias de impacte ambiental normalizadas: bio-H ₂ vs diesel.	40
Figura 3.11 - Emissões de CO ₂ -eq: bio-H ₂ vs diesel.	41
Figura 3.12 - Mapa da distribuição geográfica de povoamentos puros de eucalipto em Portugal.....	43

Capítulo 1 - Introdução

No presente capítulo apresenta-se o enquadramento geral do tema abordado nesta dissertação e descreve-se a motivação da mesma. Realiza-se ainda uma abordagem teórica, no qual se documenta algumas das tecnologias utilizadas para a produção do hidrogénio, de origem renovável e fóssil) e enumeram-se os objectivos desta dissertação.

1.1 Enquadramento e Motivação

A bioenergia é considerada como uma opção chave para a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa e para substituir os combustíveis fósseis. O uso actual de bioenergia cobre 9% a 14% das necessidades globais de energia. No entanto, a maior parte é utilizada tradicionalmente com base em processos ineficazes, poluidores e muito ineficientes em termos energéticos (Hamelink e Faaij, 2006). Em Portugal, a biomassa predominante é a lenho-celulósica, sendo a floresta a sua principal fonte, a qual representa cerca de 38% do território continental, segundo os dados estatísticos da Direcção Geral dos Recursos Florestais (DGRF 2006a).

O sector dos transportes representa cerca de 27% do consumo de energia secundária e é quase sempre de origem fóssil (Hamelink e Faaij, 2006). O rápido aumento da procura de combustíveis para utilização nos transportes, combinado com a rápida diminuição de reservas de petróleo, aumenta a dependência sobre um número limitado de países que fornecem petróleo (Rogner *et al.*, 2000). Os biocombustíveis podem, então, desempenhar um papel importante, tanto na resolução das emissões de gases com efeito de estufa dos transportes, como da dependência em relação ao petróleo.

A União Europeia (UE) é uma das líderes mundiais na produção de biocombustíveis, produzindo e consumindo um total de 2,1 milhões de toneladas de biocombustíveis, no sector dos transportes, querendo atingir as 5 milhões de toneladas em 2010 (Bioenergia, 2004). Neste continente, destacam-se os países da Alemanha, Itália, Áustria e França. De modo a impulsionar o mercado energético do hidrogénio (H₂) e estabelecendo o seu uso já na próxima década, a UE pretende investir 470 milhões de euros em pesquisa tecnológica nessa área (Morales, 2008). Neste contexto, foi criada a “*Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative*” (JTI) que se dedica à pesquisa e desenvolvimento, com o objectivo

de acelerar a investigação tecnológica da produção de H₂ e de “*fuel cells*”. O objectivo da UE é catalisar a entrada de carros a H₂ no mercado, tornando a indústria capaz de produzir em larga escala, alcançando o mercado em massa entre 2015 e 2020 (HE, 2007). Em 2003, a Comissão Europeia previa que 5% dos veículos comercializados em 2020 fossem propulsados a H₂ e que em 2050 esse número aumentasse para os 35%.

Em Portugal, é na área da investigação que têm vindo a ser realizados estudos sobre H₂ e “*fuel cells*”. Da pesquisa realizada, verificou-se que a primeira central portuguesa de produção de H₂ está situada na Serra do Cume, nos Açores, a qual recorre à energia eólica para produzir H₂. O seu estudo de implementação começou a ser realizado em 2002 e em 2005 iniciou a produção de H₂, apresentando, actualmente, cinco pilhas de combustível a H₂. Além desta empresa, existem ainda projectos de investigação na área de “*fuel cell*” a nível de Institutos de Investigação ou Departamentos Universitários.

Aproximadamente 95% da produção de H₂ em todo o mundo é realizada por consumidores industriais de H₂ que implementam unidades de produção de H₂ nas suas próprias instalações, no intuito de satisfazer as suas próprias necessidades (Morris, 2003; Muller-Langer *et al.*, 2007).

A procura e o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para a produção de combustíveis de origem não fóssil são um passo importante para diminuir a emissão de gases com efeito de estufa, os impactes ambientais e a dependência do consumo de combustíveis fósseis. Esta dissertação centra-se nesta temática e tem como base de referência a produção potencial de bio-hidrogénio em Portugal e tem em vista alcançar os objectivos apresentados na secção 1.3

1.2 Objectivos

O principal objectivo visa a realização de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da produção de bio-hidrogénio (bio-H₂) com base em biomassa lenho-celulósica e, com base no modelo de ciclo de vida desenvolvido, sugerir melhorias de optimização, em termos energéticos e ambientais, na cadeia de produção do mesmo.

A densidade energética dos combustíveis é um factor importante em termos logísticos e de autonomia e, deste modo, o segundo objectivo deste estudo compara, ambiental e

energeticamente, os processos de liquefacção e compressão do hidrogénio e o seu impacto no ciclo de vida do biocombustível.

O último objectivo pretende comparar o ciclo de vida (CV) do bio-H₂, comprimido e liquefeito, com o diesel, mediante a quantificação dos benefícios energéticos e ambientais.

1.3 Tecnologias de produção de hidrogénio

A produção de hidrogénio pode ser efectuada com base em diferentes técnicas, as quais diferem quanto ao tipo de matéria-prima utilizada, ao processo de conversão envolvido (termoquímico, electroquímico ou bioquímico) e às fontes de energia primária utilizadas para satisfazer os consumos auxiliares (fóssil ou renovável) (Boudries e Dizene, 2008). Apresenta-se na Figura 1.1 as alternativas de produção de hidrogénio mais recorrentes.

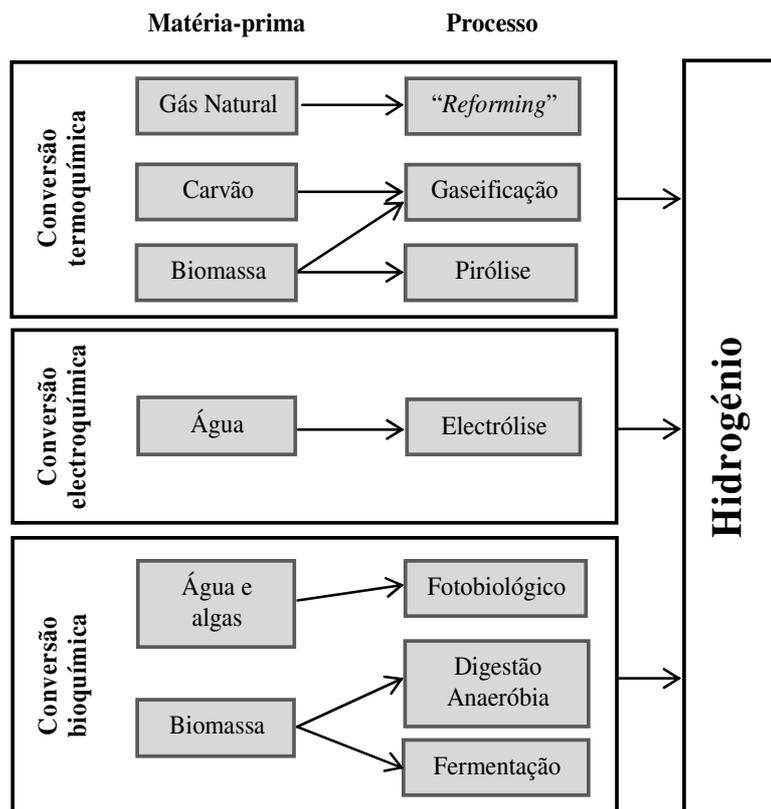


Figura 1.1 – Métodos de produção de Hidrogénio.

Das alternativas de produção de H₂, destacam-se a conversão termoquímica e a conversão electroquímica como as técnicas mais utilizadas presentemente (Weil *et al.*, 2006).

1.3.1 Bio-hidrogénio

Entende-se por bio-hidrogénio (bio-H₂), um combustível produzido com base em biomassa ou energia eléctrica renovável. Este biocombustível apresenta algumas vantagens energéticas e ambientais quando comparado com o hidrogénio de origem fóssil, e.g. gás natural (Nath e Das, 2003). Os tipos de conversão em bio-H₂ reúnem-se em três grupos, como se pode verificar na Figura 1.1 apresentada: *i*) conversão termoquímica; *ii*) conversão electroquímica; e *iii*) conversão bioquímica. O presente estudo pretende analisar, em termos energéticos e ambientais, a conversão termoquímica da biomassa lenho-celulósica em bio-H₂, com recurso ao processo de gaseificação e, deste modo, não será dado destaque à componente tecnológica dos processos de conversão.

Na conversão termoquímica, em que se recorre aos processos de gaseificação e pirólise, a biomassa é sujeita a altas temperaturas para ser convertida em outro combustível. Os processos de gaseificação e pirólise apresentam diferenças na quantidade de oxigénio presente no reactor, na temperatura de operação e no tipo de combustível obtido. O processo de pirólise ocorre na ausência de oxigénio a uma temperatura que ronda os 500 °C e são formados produtos combustíveis em todos os estados físicos (gasoso, líquido e sólido). Na gaseificação a amplitude térmica de operação é de 700-1200 °C e o produto formado neste processo é maioritariamente gás de síntese, usualmente chamado “*syngas*”, ou gás produto, dependendo da temperatura de gaseificação (Faaij, 2006).

A conversão electroquímica, mais conhecida por electrólise da água, para a produção de bio-H₂, utiliza energia eléctrica com base em fontes de energias renováveis para separar os elementos químicos presentes na água (H₂ e oxigénio). Através deste processo é possível obter H₂ com elevado grau de pureza. Esta tecnologia apresenta um maior desenvolvimento tecnológico comparativamente com as outras tecnologias e apresenta uma implementação à escala comercial mais significativa (Mueller-Langer *et al.*, 2007; Boudries e Dizene, 2008).

A digestão anaeróbia – conversão bioquímica – consiste na decomposição biológica da matéria orgânica da biomassa, em condições de ausência de oxigénio, realizada por bactérias anaeróbias, cujos produtos do metabolismo compõem uma mistura gasosa, denominada por biogás. Este gás é principalmente constituído por metano, que após sofrer um processo de “*reforming*” permite obter H₂. Para esta alternativa de produção de bio-H₂

ainda se pode recorrer ao bioetanol, convertendo os açúcares de plantas (e.g. batata, milho, beterraba e cana-de-açúcar) em etanol através do processo de fermentação e, posteriormente, converter o etanol em H_2 sujeitando-o um processo catalítico no qual reage com a água. No processo fotobiológico alguns organismos fotossintéticos, como é o caso das algas, produzem hidrogénio através das suas actividades metabólicas. Neste processo as enzimas presentes na célula agem como catalisadores e decompõem as moléculas de água, originando o bio- H_2 . Esta tecnologia tem vindo a ser estudada e com o recurso a sistemas catalíticos e de engenharia a produção de hidrogénio pode ser aumentada. Esta técnica pode, eventualmente, promover um meio prático e de baixo custo para a conversão da luz solar em bio- H_2 .

1.3.2 Produção de Hidrogénio com base em recursos fósseis

Na presente subsecção é realizada uma abordagem muito simplista, dos processos mais recorrentes de produção de H_2 com base em recursos fósseis. Uma significativa parte do H_2 produzido no Mundo é de origem fóssil, sendo o gás natural e o carvão as matérias-primas mais utilizadas. Estes dois recursos fósseis são convertidos em H_2 através dos processos “*reforming*” e gaseificação, respectivamente. Em 2004, o processo “*reforming*” era a maneira mais importante e económica de produzir H_2 (Koroneos *et al.*, 2004). Este processo tem por base uma reacção endotérmica do metano (CH_4) presente no gás natural com vapor a altas temperaturas, na presença de um catalisador. Esta reacção produz um gás composto principalmente por monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), H_2 e CH_4 não reactivo. A gaseificação do carvão é, actualmente, uma tecnologia comercial utilizada na indústria química e tem tido particular destaque nas regiões onde o acesso ao gás natural é limitado ou difícil. O processo de gaseificação do carvão é idêntico ao da biomassa, o carvão reage com ar ou oxigénio e vapor a altas temperaturas no gaseificador formando um gás de síntese, que é principalmente constituído por H_2 , CO, CO_2 e algum CH_4 .

A alternativa de produção de H_2 com recurso à conversão electroquímica é muito semelhante à apresentada na subsecção anterior, diferindo na fonte utilizada para a produção de electricidade a fornecer, que neste caso recorre aos combustíveis fósseis. Devido aos elevados preços da electricidade, o recurso à electrólise tem vindo a decair na Europa, pois este processo depende significativamente da electricidade (Mueller-Langer *et al.*, 2007).

1.4 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em quatro capítulos, incluindo o presente capítulo de introdução. O Capítulo 2 é dedicado à apresentação da metodologia utilizada e do modelo de ciclo de vida desenvolvido para um sistema de produção de bio-H₂ liquefeito e comprimido, incluindo a sua utilização em veículos automóveis ligeiros “*fuel cell*” e de motores de combustão interna. O capítulo 2 apresenta ainda o inventário realizado com base no modelo desenvolvido. A análise e discussão dos resultados obtidos da análise energética da energia fóssil primária requerida (E_{req}) e dos impactes ambientais, com particular destaque para a categoria ambiental efeito de estufa, dos sistemas de produção do bio-H₂ são realizadas no Capítulo 3. No final deste Capítulo realiza-se ainda uma análise comparativa, em termos energéticos e ambientais, entre os veículos a bio-H₂ e a diesel (sistema fóssil). O último Capítulo salienta as principais conclusões do trabalho desenvolvido e apresenta-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Modelo e inventário do ciclo de vida do bio-hidrogénio

Neste capítulo apresenta-se o modelo de ciclo de vida desenvolvido para um sistema de produção de bio-hidrogénio (bio-H₂) liquefeito e comprimido e a sua utilização em veículos automóveis ligeiros de combustão interna e “*fuel cell*”. Realiza-se ainda uma descrição das etapas e processos presentes no ciclo de vida da produção do bio-H₂ e apresenta-se o inventário de ciclo de vida para o modelo desenvolvido.

Neste capítulo, sempre que o termo biomassa é utilizado, refere-se especificamente à biomassa lenho-celulósica.

2.1 Introdução

O modelo de ciclo de vida desenvolvido para o bio-H₂ é constituído pelos seguintes processos principais:

- produção e transporte da biomassa lenho-celulósica até à central de produção de bio-H₂;
- produção do gás de síntese;
- produção do bio-H₂ liquefeito e comprimido;
- transporte do bio-H₂ até à estação de abastecimento de combustível;
- armazenamento do bio-H₂ na estação de abastecimento; e
- utilização do bio-H₂ em veículos ligeiros de combustão interna e “*fuel cell*”.

A produção da biomassa envolve o preparo dos terrenos, cultivo, fertilização e corte de uma cultura dedicada de eucalipto globulus. Em Portugal não é muito comum o uso de culturas energéticas lenho-celulósicas, no entanto o conceito mais próximo é o da cultura dedicada de povoamento de eucalipto globulus para fins industriais (Nunes, 2008). Por este motivo, considerou-se que toda a biomassa utilizada para a produção do bio-H₂ tem origem num povoamento florestal de eucalipto globulus com características semelhantes às das culturas energéticas e que está localizado em redor da central de produção. O transporte da biomassa, desde o local onde é produzida até à central, será realizado por camião com capacidade mássica e volúmica de 24 ton e 77 m³, respectivamente.

O processo de produção do gás de síntese envolve o pré-tratamento da biomassa e a gaseificação. O pré-tratamento torna-se necessário devido às condições de alimentação do gaseificador, pois este processo requer um teor de humidade presente na biomassa inferior a 15% (em base seca) e um tamanho das partículas entre 1,25 e 2 mm (Franco *et al.*, 2002). Considerou-se, tendo em conta a realidade portuguesa, um teor de humidade para a biomassa de 120% (em base seca) após o corte (biomassa verde) (Nunes, 2008). Para reduzir o tamanho e o teor de humidade da biomassa será necessário proceder à trituração e secagem, respectivamente. A produção do gás de síntese realiza-se através da gaseificação da biomassa a altas temperaturas, 800-900°C (Gulyurtlu, 2007). O tipo de gaseificação escolhido neste estudo é em leito fluidizado circulante pois permite uma maior taxa de conversão de carbono, do que a gaseificação em leito fluidizado borbulhante, devido ao tempo de residência das partículas ser maior (Andrade *et al.*, 2007). O processo de gaseificação inclui um sistema de limpeza de gases.

O gás de síntese à saída do gaseificador é constituído principalmente por monóxido de carbono (CO) e hidrogénio (H₂), podendo conter também alguns hidrocarbonetos, sendo necessário separar o hidrogénio dos outros componentes. Esta separação realiza-se através de duas reacções: “*steam reforming*” e “*shift reaction*”. Por final utiliza-se o processo de “*Pressure Swing Adsorption*” (PSA) para remover as impurezas e obter uma pureza de 99,99% de bio-H₂. Posteriormente, o bio-H₂ será comprimido ou liquefeito sendo estes os processos que actualmente estão mais desenvolvidas e com maior aplicação em veículos ligeiros. O bio-H₂ pode ser comprimido a 35 e a 70 MPa, dependendo da resistência do depósito do automóvel a que este se destina, contudo, neste estudo considerou-se uma compressão a 35 MPa, pois a maioria dos automóveis que actualmente existem a H₂ comprimido possuem reservatórios para estas pressões. O bio-H₂ liquefeito necessita de estar a uma temperatura muito baixa (-253°C), pois o seu ponto de ebulição é também muito baixo (Koroneos *et al.*, 2007).

Depois de obtido o bio-H₂, este será transportado e armazenado em estações de abastecimento de combustíveis para posterior utilização em veículos ligeiros. A utilização do bio-H₂ em automóveis ligeiros pode ser realizada através de “*fuel cells*” ou de motores de combustão interna. As “*fuel cells*” funcionam como uma bateria e convertem o combustível mediante um oxidante, o oxigénio, em electricidade. Enquanto as “*fuel cells*” promovem uma mudança na fisionomia do automóvel, a combustão do hidrogénio em

motores de combustão interna é apenas uma mudança de fonte energética, que pode ser aplicada aos automóveis actuais, com pequenas alterações. A utilização do hidrogénio em motores de combustão interna tem ainda a vantagem de permitir uma maior flexibilidade, do ponto de vista do utilizador final, visto que permite o funcionamento bi-fuel (gasolina e hidrogénio). Ou seja, sempre que o utilizador desejar pode mudar o tipo de combustível que pretende utilizar, através de um botão.

Para distinguir os dois tipos de utilização final do bio-H₂ optou-se por considerar duas alternativas diferentes, as quais se apresentam na Figura 1.1: *i*) #Alternativa 1 – utilização de bio-H₂ comprimido num veículo “*fuel cell*”; e *ii*) #Alternativa 2, utilização de bio-H₂ liquefeito num veículo a combustão interna.

2.2 Metodologia de ACV: definição de fronteiras e unidade funcional

A ACV é uma metodologia que avalia os potenciais impactos ambientais associados a um produto. Essa avaliação tem em conta o ciclo de vida do produto e todas as etapas da sua produção desde a extracção das matérias-primas até à sua disposição final (“*from the cradle to the grave*”). Quando uma ACV é aplicada à utilização de um combustível no sector dos transportes, tanto as emissões por combustão como por evaporação precisam de ser contabilizadas, assim como as emissões de todo o ciclo de vida (CV) do combustível. Ou seja, um CV completo tem em conta as emissões directamente libertadas pelo veículo e por todos os processos associados à produção do combustível (Beer, *et al.*, 200).

Para a realização de um estudo de ACV é necessário definir as fronteiras do sistema, de modo a identificar e calcular os fluxos de massa e energia à entrada e à saída do sistema. As fronteiras do sistema representam a separação entre o sistema e o ambiente que o envolve.

A noção de unidade funcional (UF) responde à necessidade de quantificar o desempenho de um produto ao executar a função que lhe está a ser atribuída. A selecção da UF deverá considerar a função do objecto em estudo, ou seja, ter em conta a perspectiva do utilizador. Neste estudo, definiu-se como unidade funcional 1 km percorrido, a qual permite comparar as duas utilizações do bio-H₂ definidas anteriormente e comparar estas com o recurso ao combustível fóssil (diesel) em veículos ligeiros.

Na Figura 1.1 apresenta-se o modelo de ciclo de vida desenvolvido e os principais fluxos de materiais e energia que atravessam a fronteira do sistema. A descrição detalhada dos processos apresentados na encontra-se no ponto 3.3.

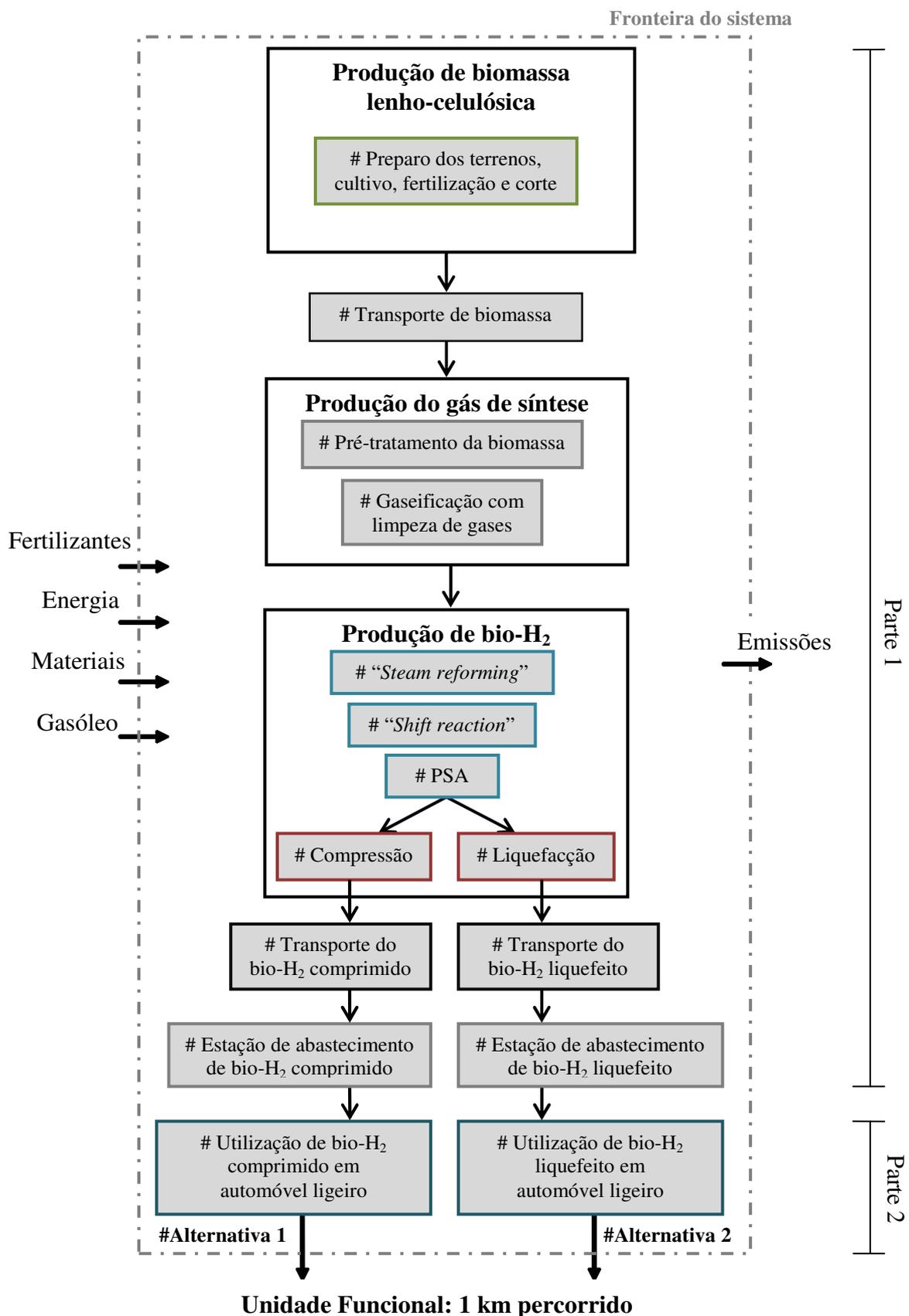


Figura 2.1 - Fluxograma do modelo de ciclo de vida da produção de bio-H₂.

2.3 Descrição das fases do CV

Nesta secção são descritos todos os processos envolvidos na produção do bio-H₂ até à sua utilização final e são enunciadas todas as considerações adoptadas para a realização do presente estudo. Após a descrição dos processos de produção de biomassa, gás de síntese e bio-H₂ são apresentados os cálculos efectuados para determinar as quantidades de biomassa, gás de síntese e bio-H₂ que serão necessárias ao funcionamento da central de produção.

Este estudo é realizado com dados da zona centro de Portugal, ou seja, assume-se que a central de produção de bio-H₂ se encontra situada na zona centro. O bio-H₂ é produzido com base em gás de síntese proveniente da gaseificação da madeira eucalipto globulus. Considera-se ainda, que o tempo de vida útil da central será de 25 anos, laborando 322 dias por ano e 24 horas por dia (Syed *et al.*, 1997). Para determinar a dimensão da central, analisou-se um estudo de viabilidade económica para a produção de bio-H₂. Nesse estudo (Hamelinck e Faaij, 2002) é realizada uma análise económica da produção do metanol e do hidrogénio com base em biomassa em centrais de produção com diferentes dimensões. Na Figura 2.2 pode-se constatar a relação entre o preço de produção de 1 MJ de bio-H₂ e a potência¹ do gaseificador.

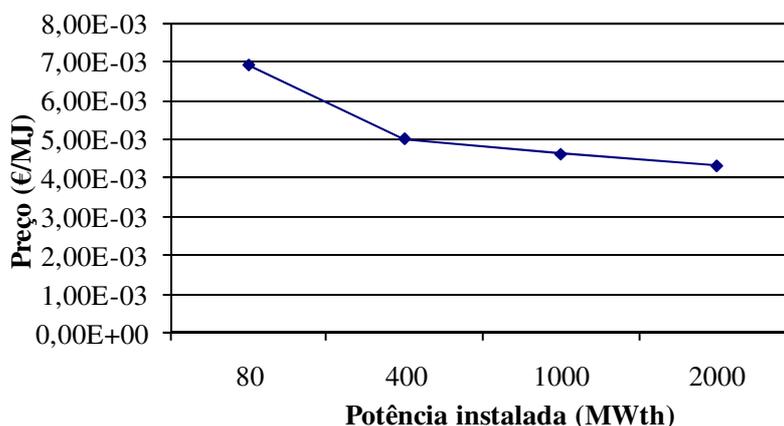


Figura 2.2 - Preço da produção de hidrogénio em função da potência do gaseificador (adaptado de Hamelinck e Faaij, 2002).

¹ A potência do gaseificador é definida pela quantidade de energia que entra neste equipamento, ou seja, a quantidade de biomassa admitida pelo aparelho.

Da análise da Figura 2.2 verifica-se que à medida que aumenta a potência instalada, o custo de produção de 1 MJ de bio-H₂ diminui. A partir dos 400 MW_{th} o custo de produção apresenta um declive menos acentuado, pelo que se pode considerar que o valor mínimo de viabilidade económica para a produção do bio-H₂ é de 400 MW_{th}, tendo sido esta a dimensão considerada para o presente estudo.

A descrição dos processos e os aspectos mais relevantes de cada fase do ciclo de vida é realizada nas seguintes subsecções, tendo sido divididas em: *i*) produção de biomassa lenho-celulósica; *ii*) produção de bio-H₂; e *iii*) transporte, armazenamento e utilização final do bio-H₂.

3.3.1 Produção da biomassa lenho-celulósica

#Preparo dos terrenos, cultivo e corte

O preparo dos solos é realizado de forma a melhorar as suas condições físicas e obter ganhos de produtividade na plantação, tendo-se considerado que este tipo de operação é realizado com recurso a uma máquina florestal. A plantação é feita manualmente, e cada planta permite a realização de três cortes com ciclo de 10 anos (gera três vezes biomassa), necessitando apenas da preparação dos terrenos em cada 30 anos de cultivo. A plantação é semelhante às das culturas energéticas (e.g. choupo), tendo-se considerado no presente estudo que o povoamento florestal se encontra nas imediações da central. O corte da biomassa é realizado com o recurso a uma máquina florestal (processadora), a qual realiza a operação de recolha. A fertilização dos povoamentos florestais depende das características do solo e do tipo de planta. As quantidades e o tipo de fertilizante a utilizar foram obtidos com base na análise dos solos, tendo sido considerados os valores médios praticados na zona centro, os quais. O tipo de fertilizante considerado é do tipo NPK (7:14:7)² (Nunes, 2008). Neste estudo considera-se nulo o stock de carbono no solo devido à significativa incerteza na comunidade científica dos valores do volume de carbono retido no solo (Nunes, 2008). Considerou-se ainda que os consumos de energia e materiais associados à construção de maquinaria e utensílios agrícolas são desprezáveis, pois têm um contributo pouco significativo no CV (Gasol *et al.*, 2007).

#Transporte

² N – Azoto; P – Fósforo; K – Potássio: composição mássica de 7% de Azoto, 14% de Fósforo e 7% de Potássio.

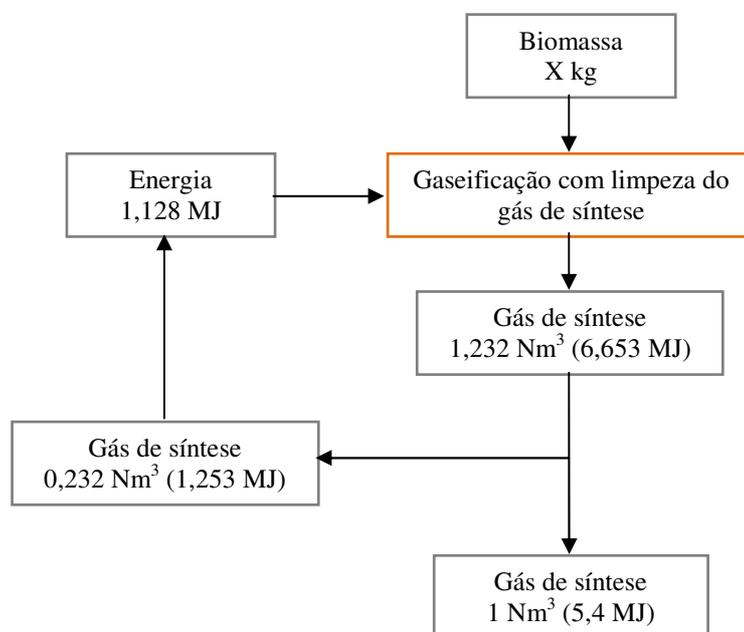
Obteve-se uma distância média percorrida desde a floresta até à central de 28,34 km (duas vezes o raio de acção). Os cálculos para esta distância encontram-se no final desta subsecção. Considerou-se para a distância de transporte a distância linear de área necessário ao cultivo (raio de acção), porque não foi encontrada nenhuma referência sobre o coeficiente de tortuosidade para Portugal, nem a relação entre necessidade linear e real de área florestal.

A quantidade de biomassa necessária para alimentar a central tem em conta as necessidades para a produção de bio-H₂ e para os consumos auxiliares de energia térmica, referentes aos processos de secagem e gaseificação. Não foram encontrados dados na literatura referentes à eficiência de produção do gás de síntese para uma potência instalada de 400 MW_{th}, contudo, a única referência encontrada que mais se aproxima refere que para uma potência instalada de 7,2 MW_{th} são produzidos 3333 Nm³ de gás de síntese por hora (Jungbluth *et al.*, 2007). Deste modo, teve que se assumir que para os 400 MW_{th} serão produzidos 185000 Nm³/h de gás de síntese. Sabendo que o PCI do gás de síntese é de 5,4 MJ/Nm³, obtém-se uma necessidade de 0,463 kg_{biomassa_seca}/Nm³ (PCI da biomassa: 16,8 MJ/kg_{biomassa} para 15% de humidade em base seca³). Em termos de biomassa verde obtém-se uma necessidade de 1,02 kg (120% de humidade, em base seca) para produzir 1 Nm³ de gás de síntese, ou seja, são necessárias 189 ton/h de biomassa verde.

De seguida, são determinados os consumos de biomassa verde para satisfazer os requisitos auxiliares de energia térmica do processo de secagem e gaseificação. A biomassa utilizada para a produção de energia térmica auxiliar provém da cultura energética do eucalipto. Para associar os impactes ambientais e os requisitos energéticos dos processos de cultivo e transporte até à central desta biomassa auxiliar, os cálculos serão apresentados na base da biomassa verde. A biomassa, para a produção de gás de síntese, antes de entrar no gaseificador tem de passar pelo processo de secagem. Segundo o estudo (Hamelinck *et al.*, 2005), são necessários 2,8 MJ/kg_{água_evaporada} no secador. Para uma humidade inicial de 120% e final de 15% (em base seca) é necessário fornecer 1,46 MJ de energia térmica por cada kg de biomassa verde. Admitiu-se que a fonte térmica para o processo de secagem é proveniente de um gerador de gases quentes (eficiência de 80%) com base na combustão directa de biomassa, deste modo, necessita-se de 0,095 kg de biomassa verde.

³ Valor máximo de humidade para a biomassa admitida à entrada do gaseificador.

A energia térmica a fornecer ao gaseificador provém do gás de síntese, ou seja, é produzida uma quantidade em excesso de gás com intuito de utilizá-lo para gerar energia térmica. De seguida, apresenta-se, na Figura 2.3, um fluxograma com as necessidades de gás combustível para a produção de 1 Nm³ líquido⁴ de gás de síntese.



Nota: A letra X representa a quantidade de biomassa verde necessária ao processo de gaseificação.

Figura 2.3 - Fluxograma da energia auxiliar requerida para a produção de 1 Nm³ de gás de síntese líquido.

Da análise da Figura 2.3 verifica-se que para produzir 1 Nm³ de gás de síntese com a finalidade de produzir bio-H₂ será necessário produzir mais 0,232 Nm³ do mesmo para a combustão, obtendo-se assim, que para produzir 1,232 Nm³ necessita-se de 1,26 kg de biomassa verde.

Na Tabela 2.1 apresenta-se o valor total – para o tempo de vida útil estimado da central – de biomassa verde necessária para a produção de bio-H₂ e consumos auxiliares de energia térmica associados ao processo de secagem e gaseificação.

⁴ Entende-se por gás de síntese líquido a produção líquida deste e não o seu estado físico.

Tabela 2.1 – Necessidades de biomassa lenho-celulósica

Processo	Consumo de biomassa (ton ×10³)
Secagem	4375
Gaseificação (energia térmica para o reactor)	8458
Produção de hidrogénio	36457
Total	49290

Pelo valor obtido na Tabela 2.1 e assumindo-se uma produção de biomassa de 781 ton/ha, em cada 30 anos, (Nunes, 2008), obtém-se um raio de acção linear para a central de 14,17 km.

3.3.2 Produção do gás de síntese

#Pré-tratamento da biomassa

A biomassa será depositada temporariamente num coberto de metal com uma área de 3200 m² antes de ser processada (área estimada por uma pessoa com muita experiência neste tipo de armazenamentos). Este armazenamento deve ser controlado de forma a evitar mudanças nas características fundamentais da biomassa, principalmente no seu teor de humidade (Brand, 2007; Rocha, 2008). A biomassa será depois transportada, desde o local onde se encontra armazenada até à linha de secagem. Este transporte será efectuado por três telas transportadoras, duas de 30 m e uma outra mais longa de 205 m, para que o declive não seja muito acentuado. Existe ainda uma outra tela de transporte no local de armazenamento, mas não se encontrará em funcionamento permanente, pois funciona apenas como reserva. A tela de borracha que constitui estes distribuidores tem de um tempo de vida útil de 5 anos, necessitando de cinco mudas durante o tempo de vida estimado para a central. No processo de secagem serão necessários quatro ventiladores, com uma potência de 605 kW, para forçar a passagem dos gases quentes por dois secadores de tambor rotativo (dois para cada secador). Os materiais dos ventiladores consideraram-se desprezáveis, pelo tipo e dimensões dos materiais. Cada secador tem uma capacidade de secagem de 36 a 38 ton/h. Após o processo de secagem, a biomassa é triturada, reduzindo o seu tamanho. Para tal são necessários dois trituradores. O primeiro tritura a biomassa até se obterem partículas entre 20 e 30 mm e o segundo reduz o tamanho destas para o desejado (1,5 a 2 mm).

#Gaseificação com limpeza de gases:

Como já foi referido no ponto 3.1, o leito fluidizado circulante é o tipo de gaseificador que mais se adequa à produção de bio-H₂ e está representado na Figura 2.4.

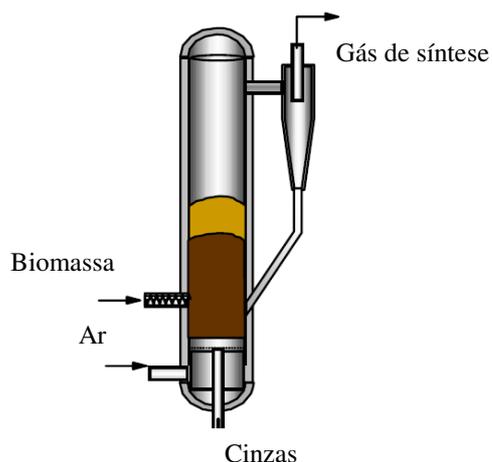


Figura 2.4 - Gaseificador em leito fluidizado circulante (adaptado de Lensu e Alakangas, 2004).

Nos gaseificadores em leito fluidizado as partículas da biomassa são mantidas em suspensão no leito simultaneamente com a areia (material fluidizante). A areia funciona como um permutador de calor e é aquecida e mantida em suspensão por uma corrente de ar, fluido fluidizante, que entra no gaseificador, criando as condições favoráveis de transferência de calor e homogeneidade da temperatura no reator (Lazarinos, 2007). A fluidização promove, deste modo, o contacto entre partículas e gases e uma temperatura uniforme em todo o leito. (Lazarinos, 2007). O fluido fluidizante antes de exercer a sua função sofre um processo de compressão e de seguida é bombeado para o gaseificador. As partículas que são arrastadas pelo gás de síntese à saída do gaseificador passam por um ciclone. Aqui o gás de síntese é removido e a areia e o carvão são recirculados novamente para o leito (reutilização do material inerte). Embora o gás de síntese seja constituído na sua maioria por CO, H₂ e hidrocarbonetos, contém outros produtos, como por exemplo partículas, alcatrão, compostos alcalinos, ácido sulfídrico (H₂S), ácido clorídrico (HCl), amónia (NH₃), dissulfeto de carbono (CS₂) e ácido cianídrico (HCN) (Jungbluth *et al.*, 2007). Estes potenciais contaminantes têm de ser removidos e o método considerado neste estudo para a sua remoção é o “*wet low temperature cleaning*”. As etapas consideradas neste sistema de limpeza de gases estão descritas na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Etapas do sistema de limpeza de gases

Etapa	Características	Compostos requeridos
“ <i>Tar cracking</i> ”	Remoção do alcatrão	Dolomite e zeolite
Ciclone	Remoção da maioria das impurezas sólidas (menores que 5 µm)	
“ <i>Bag filter</i> ”	Remoção das restantes partículas e dos compostos alcalinos	
“ <i>Scrubbers</i> ”	Remoção das partículas residuais, espécies químicas na fase de vapor, compostos de nitrogénio reduzidos e gases de halogéneo reduzidos	Água, NaOH ou H ₂ SO ₄
“ <i>ZnO guard bed</i> ”	Redução da concentração de enxofre abaixo dos 0,1 ppm	

No processo de limpeza de gases a água é adicionada ao processo de limpeza do gás de síntese para remover as impurezas presentes no gás de síntese, enquanto o hidróxido de sódio (NaOH) e o ácido sulfúrico (H₂SO₄) removem o ácido sulfídrico (H₂S) e o ácido clorídrico (HCl). A amónia é utilizada para a remoção do dissulfeto de carbono (CS₂) e ácido cianídrico (HCN) (Jungbluth *et al.*, 2007). Este método de limpeza de gases é uma tecnologia convencional, havendo no entanto alguma incerteza no que diz respeito à eficácia da limpeza dos gases a baixas temperaturas (Hamelinck e Faaij, 2002). Os consumos de electricidade relativos à limpeza dos gases estão incluídos no processo de gaseificação, bem como os respectivos compostos utilizados para a sua realização. Apresenta-se na Tabela 2.3 a composição do gás de síntese, depois do processo de limpeza (Jungbluth *et al.*, 2007).

Tabela 2.3 - Composição do gás de síntese

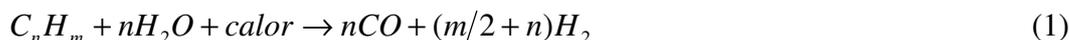
Componentes	% molar
N ₂	50,4
H ₂ O	13,7
H ₂	5,6
CO	14,0
CO ₂	12,5
CH ₄	3,1
C _n H _m	0,6

Aquando da descrição dos cálculos para a produção da biomassa, realizada no ponto 3.3.1, calculou-se também a produção diária de gás de síntese de $4,4 \times 10^6$ Nm³. Assim, para o tempo de vida útil estimado da central, a produção de gás de síntese será de 35742×10^6 Nm³.

3.3.3 Produção do bio-H₂

#“*Steam reforming*”, “*shift reaction*” e PSA:

O “*steam reforming*” converte alguns dos compostos (metano e hidrocarbonetos) presentes no gás de síntese, por intermédio do vapor, em CO e H₂. O processo “*reforming*” rege-se pela seguinte equação:



A eficiência de conversão do metano e dos hidrocarbonetos em CO e H₂ é de 86% (Adamson e Pearson, 2000). O “*shift reaction*” é um processo que produz bio-H₂ adicional através de uma reacção do CO com a água:



Através desta reacção consegue-se que 90% do CO seja convertido em H₂ (Ruether *et al.*, 2005). O produto CO₂ desta reacção é libertado para a atmosfera. Não foram encontrados dados na literatura relativos ao consumo de energia do reactor utilizado para o processo “*shift reaction*”, pelo que não foi considerado no inventário.

O sistema PSA é uma tecnologia de separação de gases utilizada com frequência em processos industriais e, neste caso, esta é utilizada para a purificação de bio-H₂ (Sordi *et al.*, 2006). Este processo purifica o bio-H₂ a 99,99% (apenas 0,01% do combustível não bio-H₂), tendo uma eficiência de recuperação do mesmo de 80% (Lau *et al.*, 2002).

Os equipamentos necessários aos três processos descritos são essencialmente reactores de aço, pelo que, quando comparadas as suas quantidades mássicas com as dos secadores, gaseificador e estruturas da central, podem ser consideradas desprezáveis. Assim, os materiais dos três reactores não foram considerados neste estudo.

#Compressão

A energia necessária para a compressão do bio-H₂ depende do processo termodinâmico utilizado (Bossel e Eliasson, 2003 e Yamada *et al.*, 2007). Apenas foram encontradas referências de consumos de electricidade para processos adiabáticos, pelo que foi o considerado neste estudo.

#Liquefacção

O processo de liquefacção do bio-H₂ requer grandes quantidades de energia, para que se consiga obter e manter o bio-H₂ no estado líquido, a uma temperatura de -253°C, pois a temperatura à saída do PSA é de 40°C (Koroneos *et al.*, 2007; Hamelinck e Faaij, 2002). Assume-se que toda a energia requerida neste processo é fornecida por energia eléctrica proveniente da rede eléctrica nacional.

A eficiência de conversão do gás de síntese em bio-H₂ é de 61,7%, o que significa que para produzir 1 MJ de bio-H₂ são necessários 0,3 Nm³. Pelos cálculos efectuados anteriormente concluiu-se que a quantidade de gás de síntese produzida no tempo útil estimado da central será de 35742 × 10⁶ Nm³. Associando esta produção à eficiência de conversão em bio-H₂, obtém-se uma produção de bio-H₂ para os 25 anos de 1,19 × 10¹¹ MJ.

3.3.4 Transporte, armazenamento e utilização final do bio-H₂

#Transporte do bio-hidrogénio comprimido e liquefeito

Tanto o transporte do bio-H₂ comprimido como o liquefeito é realizado por camiões cisterna. No entanto, para o caso do bio-H₂ liquefeito estes devem possuir tanques refrigerados com bons isolamentos para que o hidrogénio se mantenha à temperatura de -253 °C e que seja evitada a passagem das moléculas do estado líquido para o gasoso. Para o caso do bio-H₂ comprimido, os camiões cisternas têm de estar preparados para armazenar um combustível à pressão de 35 MPa (Santos e Santos, 2005). Um camião com capacidade volúmica de 77 m³ pode transportar 208 GJ de bio-H₂ comprimido e 1332 GJ de bio-H₂ liquefeito.

#Estação de abastecimento de bio-H₂ comprimido e liquefeito

Neste estudo, considera-se que o armazenamento do bio-H₂ é efectuado numa estação de abastecimento de combustível, situada a 70 km da central de produção. Neste estudo não foram considerados os equipamentos e os consumos de energia associados ao armazenamento do bio-H₂ na estação, por não se ter encontrado informação na literatura.

#Utilização do bio-H₂ comprimido num automóvel ligeiro

O bio-H₂ é armazenado em tanques de alta pressão, com forma cilíndrica, apresentando-se na Figura 2.5 um exemplo de um tanque para armazenar hidrogénio comprimido. Nos veículos que circulam a bio-H₂ comprimido são utilizadas “*fuel cell*” para converter o

bio-H₂ em electricidade. Para este estudo, considera-se que o consumo de bio-H₂ num automóvel a células de combustível é de 11,6 kg/100 km (Dutton e Page, 2007).

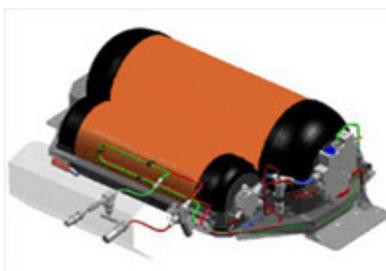


Figura 2.5 - Armazenamento de hidrogénio comprimido.

#Utilização do bio-H₂ liquefeito num automóvel ligeiro

No armazenamento do bio-H₂ liquefeito são normalmente utilizados tanques criogénicos para manter a temperatura de -253 °C. Na Figura 2.6 está representado um exemplo de um tanque de armazenamento de hidrogénio líquido. Para este caso o bio-H₂ pode ser utilizado em células de combustível ou em motores de combustão interna. Para este estudo considera-se apenas a utilização deste tipo de bio-H₂ em motores de combustão interna, devido à sua aplicação prática. O consumo de bio-H₂ considerado para um automóvel com este tipo de armazenamento e tecnologia de 22,7 kg/100 km (Dutton e Page, 2007).

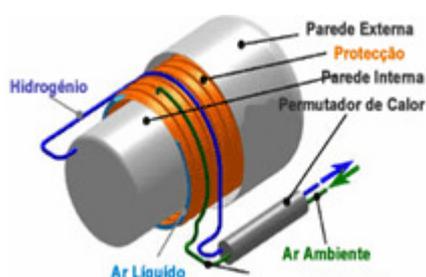


Figura 2.6 - Armazenamento de hidrogénio líquido.

2.4 Inventário

O inventário do ciclo de vida encontra-se dividido em duas partes. A Figura 2.1 mostra esquematicamente a divisão considerada: Parte 1 – “*well to tank*”; e Parte 2 – “*tank to wheels*”, isto é, a primeira parte considera todos os processos desde a produção da biomassa até ao armazenamento do bio-H₂ no tanque de um automóvel e a segunda parte considera a utilização do bio-H₂ no veículo. A realização deste inventário é o resultado da

intersecção de diversas informações técnico-científicas encontradas na literatura. Na Tabela 2.4 apresenta-se o inventário dos processos envolvidos na produção de bio-H₂.

Tabela 2.4 - Inventário da produção de bio-hidrogénio

Processo	Input	Valor médio	Unidades	Referências
Produção da biomassa lenho-celulósica				
# Preparo do terreno, cultivo e corte	Terreno florestal	1,5×10 ⁻⁶	ha/ton	Mendes, 2008
#Fertilização	N	8×10 ⁻⁵	kg/ton	Nunes, 2008
	P	1,6×10 ⁻⁴	kg/ton	
	K	8×10 ⁻⁵	kg/ton	
#Transporte	Diesel ¹	2,1×10 ⁻²	kg.km/ton	Nunes, 2008
Produção do gás de síntese				
#Pré-tratamento da biomassa				
Telas de transporte	Electricidade	6,3×10 ⁻⁴	MJ/ton	6
Trituração	Electricidade	1,9×10 ⁻²	MJ/ton	6 e Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
Secagem	Electricidade	5,7×10 ⁻²	MJ/ton	6 e Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Energia térmica	8,7×10 ⁻²	MJ/ton	Hamelinck <i>et al.</i> , 2005
#Gaseificação com limpeza de gases	Água	1,4×10 ⁻¹	kg/m ³	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Dolomite ¹	1,0×10 ⁻²	kg/m ³	
	Zeolite ²	2,1×10 ⁻³	kg/m ³	
	Areia ³	9,7×10 ⁻³	kg/m ³	
	NaOH ⁴	8,3×10 ⁻⁴	kg/m ³	
	H ₂ SO ₄ ⁴	3,3×10 ⁻³	kg/m ³	
	Electricidade ⁵	9,6×10 ⁻²	MJ/m ³	
Compressão do ar Bombagem	Electricidade ⁵	1,3×10 ⁻²	MJ/m ³	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Electricidade ⁵	2,4×10 ⁻²	MJ/m ³	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
Produção do bio-H₂				
# “Reforming”	Electricidade ⁵	1,6×10 ⁻¹	MJ/MJ _{H2}	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007; Bromberg <i>et al.</i> , 1999 e Spilsbury, 2001
# PSA	Electricidade ⁵	5,0×10 ⁻²	MJ/MJ _{H2}	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007 e Kai <i>et al.</i> , 2007
# Compressão	Electricidade ⁵	1,6×10 ⁻¹	MJ/MJ _{H2}	Drnevich, 2003
# Liquefacção	Electricidade ⁵	2,2×10 ⁻¹	MJ/MJ _{H2}	GEMIS e Syed <i>et al.</i> , 1998

Notas da Tabela:

- 1 – Dolomite proveniente do Porto, situado a 70 km da central de produção.
- 2 – Zeolite proveniente de Istambul (Turquia), situada a 844 km da central de produção.
- 3 – Areia proveniente de Cantanhede, situada a 59 km da central de produção.
- 4 – Hidróxido de sódio e ácido sulfúrico proveniente da Maia, situada a 77 km da central de produção.
- 5 – Neste estudo considerou-se que o consumo de electricidade provém da rede eléctrica nacional e teve-se como base o “mix” energético nacional.
- 6 – Os dados foram obtidos numa indústria transformadora de madeira.

Pela análise da Tabela 2.4 pode-se constatar que o diesel e a electricidade são as componentes mais relevantes em todo o processo. No processo de produção do gás de síntese, a gaseificação com limpeza de gases é a que tem maiores consumos de electricidade. Relativamente à produção do bio-H₂ a liquefacção é o processo que consome mais electricidade, por cada MJ de bio-H₂ produzido. O consumo de electricidade no processo de compressão é 30% inferior ao da liquefacção.

Na Tabela 2.5 apresenta-se o inventário da construção da central de produção de bio-H₂ com integração da central de produção de gás de síntese.

Tabela 2.5 - Inventário da construção da central de produção

Processo	Input/materiais	Valor médio	Unidades	Referências
Produção do gás de síntese				
#Pré-tratamento da biomassa				
Armazenamento	Ferro ¹	3,1×10 ⁵	kg	
	Chapa de ferro ¹	3,3×10 ⁴	kg	
Telas de transporte ²	Distribuidores	Ferro	5,2×10 ⁴	kg
		Tela de borracha	2,0×10 ³	kg
	Distribuidor longo	Ferro	3,3×10 ⁴	kg
		Tela de borracha	4,6×10 ³	kg
				8
Secagem ³	Secadores e ventiladores	2,5×10 ⁵	kg	
Trituração ⁴	Triturador 1	Ferro	5,2×10 ⁴	kg
	Triturador 2	Ferro	1,2×10 ⁴	kg
#Gaseificação com limpeza de gases				
Central de produção	Cimento ⁵	3,6×10 ²	m ³	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Diesel ⁶	1,1×10 ⁶	MJ	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Alumínio ⁷	7,2×10 ²	kg	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Cobre ⁸	1,8×10 ³	kg	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Aço ¹	5,4×10 ⁴	kg	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Aço com poucas ligas ¹	1,8×10 ⁴	kg	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Electricidade	2,2×10 ⁵	MJ	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Calor	1,1×10 ⁸	MJ	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
Gaseificador ⁷	Aço	6,8×10 ⁶	kg	GEMIS
	Petróleo	8,8×10 ⁶	kg	GEMIS
	Nitrogénio gasoso	1,8×10 ⁷	kg	GEMIS
	Alumínio	5,9×10 ²	kg	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
	Electricidade	4,7×10 ¹⁰	MJ	GEMIS
	Calor	2,7×10 ¹⁰	MJ	GEMIS
Produção do bio-H₂				
# Compressão	Alumínio ¹	2,0	kg	US Patent, 1983 e Shmalko <i>et al.</i> , 1999
# Liquefacção	Aço ¹	8,0×10 ⁵	kg	GEMIS
	Cimento ⁵	5,3×10 ⁶	kg	GEMIS

Notas da tabela:

1 – Ferro, alumínio e aço provenientes de Ovar, situado a 38 km da central de produção.

2 – A linha de distribuição em ferro é proveniente da Suécia (Arbra), situada a 3700 km da central, e a parte constituída em borracha da Amadora, situada a 270 km da central de produção.

3 – Secador proveniente de Espanha (Barcelona), situada a 1128 km da central de produção.

4 – Triturador proveniente da Suécia (Arbra), situada a 3700 km da central de produção.

5 – Cimento proveniente Souselas, situada a 67 km da central de produção.

6 – Diesel proveniente da refinaria do porto de Leixões, situado a 72 km da central de produção.

7 – Gaseificador proveniente da Bélgica (Charleroi), situada a 1800 km da central de produção.

8 – Os dados foram obtidos numa indústria transformadora de madeira.

Através da análise da Tabela 2.5 pode-se constatar que os materiais mais utilizados para a construção da central são o ferro, o aço e o alumínio. Estes representam cerca de 30% da totalidade dos materiais utilizados, em termos mássicos. Pode-se também verificar que a energia gasta na construção do gaseificador é superior à da construção da central de produção.

O inventário do transporte do bio-H₂ desde a central de produção até à estação de abastecimento é apresentado na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Inventário do transporte de bio-H₂

	<i>Input</i>	Valor	Unidades
Transporte de H ₂ comprimido	Diesel ¹	3,48E-03	MJ/MJ _{bio-H₂}
Transporte de H ₂ liquefeito	Diesel ¹	5,43E-04	MJ/MJ _{bio-H₂}

Notas da tabela:

1 - Considera-se que o consumo de diesel do camião é de 0,296 l/km e que tem capacidade para transportar 77 m³. Considera-se ainda que a densidade volúmica e energética do diesel é de 0,835 kg/l e de 41,84 MJ/kg, respectivamente.

Através da Tabela 2.6 é possível verificar que se consome mais diesel ao transportar bio-H₂ comprimido do que bio-H₂ liquefeito. Este facto deve-se à quantidade de energia transportada, pois para o mesmo volume, transporta-se mais energia quando o hidrogénio está liquefeito do que comprimido (visto que o bio-H₂ liquefeito tem uma densidade energética superior que o bio-H₂ comprimido)

A Tabela 2.7 refere-se ao inventário do consumo de bio-hidrogénio em carros com a tecnologia de células de combustível (bio-H₂ comprimido) e em carros com a tecnologia de combustão interna (bio-H₂ liquefeito).

Tabela 2.7 - Inventário do consumo de bio-hidrogénio

	<i>Input</i>	Valores	Unidades
Automóvel a H ₂ comprimido	Bio-H ₂	1,39	MJ/km
Automóvel a H ₂ liquefeito	Bio-H ₂	2,72	MJ/km

Pela análise da Tabela 2.7 verifica-se que o consumo de bio-H₂ num automóvel com a tecnologia de combustão interna é aproximadamente o dobro quando comparado com um automóvel a células de combustível. Esta diferença de consumos está relacionada com as eficiências das tecnologias utilizadas, uma vez que, a tecnologia de combustão interna apresenta uma eficiência de 15%, significativamente inferior quando comparada com os 50% da “fuel cell”.

Na descrição dos processos, realizada no ponto anterior, foram referidas as respectivas eficiências de conversão, contudo, na Tabela 2.8 e na Tabela 2.9 estão sumarizadas as diferentes eficiências de conversão desde a produção da biomassa até à utilização do bio-H₂ num automóvel ligeiro, para a #Alternativa 1 e 2, respectivamente.

Tabela 2.8 - Eficiências da #Alternativa 1

Processo	Eficiências (%)	Referências
Gaseificação	83	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
“Reforming”	86	Adamson e Pearson, 2000
“Shift reaction”	90	Ruether <i>et al.</i> , 2005
PSA	80	Lau <i>et al.</i> , 2002
Compressão	90	Dutton e Page, 2007
“Fuel cells”	50	Seitarides <i>et al.</i> , 2007
TOTAL	23	

Tabela 2.9 - Eficiências da #Alternativa 2

Processo	Eficiências (%)	Referências
Gaseificação	83	Jungbluth <i>et al.</i> , 2007
“Reforming”	86	Adamson e Pearson, 2000
“Shift reaction”	90	Ruether <i>et al.</i> , 2005
PSA	80	Lau <i>et al.</i> , 2002
Liquefacção	70	Dutton e Page, 2007
Combustão Interna	15	Lau <i>et al.</i> , 2002
TOTAL	5,4	

Da análise das tabelas apresentadas verifica-se que os processos de conversão da energia final em energia útil (“fuel cells” e combustão interna) são os que têm eficiências inferiores. Também os processos de gaseificação e PSA têm uma eficiência inferior aos outros processos envolvidos na produção do bio-H₂. Pode-se ainda concluir que a #Alternativa 1 é 18% mais eficiente do que a #Alternativa 2.

Capítulo 3 – Resultados e discussão

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta investigação. Este capítulo encontra-se dividido em três secções. Na primeira é apresentada uma análise energética da energia fóssil primária requerida (E_{req}) por MJ de bio-hidrogénio (bio-H_2) produzido, realizando-se ainda uma análise específica aos processos. Na secção seguinte realiza-se uma análise dos impactes ambientais com particular destaque para a categoria ambiental efeito de estufa (emissões de gases com efeito de estufa - $\text{gCO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}_{\text{bio-H}_2}$). Na última secção apresenta-se uma avaliação comparativa, em função da unidade funcional (1 km percorrido), entre um veículo automóvel ligeiro propulsionado com bio-H_2 comprimido (#Alternativa 1 – #A1) e liquefeito (#Alternativa 2 - #A2) – dois sistemas estudados na presente dissertação – e compara-se ainda com um veículo análogo, mas com propulsão a diesel fóssil.

3.1 Análise energética

Na análise energética do modelo de ciclo de vida desenvolvido é contabilizada a quantidade de energia fóssil primária necessária para produzir 1 MJ de bio-H_2 comprimido e liquefeito, bem como o seu transporte até à estação de abastecimento. A energia fóssil primária representa a soma da energia final com as perdas existentes em todo o Ciclo de Vida (CV) associadas à transformação e transporte e à energia despendida na construção e manutenção das instalações e equipamentos (Malça e Freire, 2006). São quantificadas as necessidades energéticas desde a produção da biomassa lenho-celulósica até ao armazenamento no tanque do automóvel (“*well to tank*”). A análise completa do CV, “*well to wheels*”, é realizada nas secções 4.3 e 4.4, no entanto na primeira é realizada uma comparação com outros estudos da literatura científica e na secção 4.4 com o sistema convencional diesel. Os resultados obtidos nestas secções foram obtidos com a introdução do modelo de ciclo de vida desenvolvido e do inventário realizado, no programa Simapro7 (programa de avaliação de ciclo de vida). Neste programa, utilizou-se o método *Cumulative Energy Demand* para obter a E_{req} . É de referir que a E_{req} é apenas a de origem fóssil, não sendo contabilizada a de origem renovável, como é o caso da biomassa. Assim é possível analisar a eficiência de utilização de recursos fósseis nas técnicas utilizadas para a conversão da energia primária renovável (biomassa) em energia final (bio-H_2). Na Figura

3.1 é apresentado o fluxograma referente à E_{req} para a produção e transporte até à estação de abastecimento do bio- H_2 comprimido.

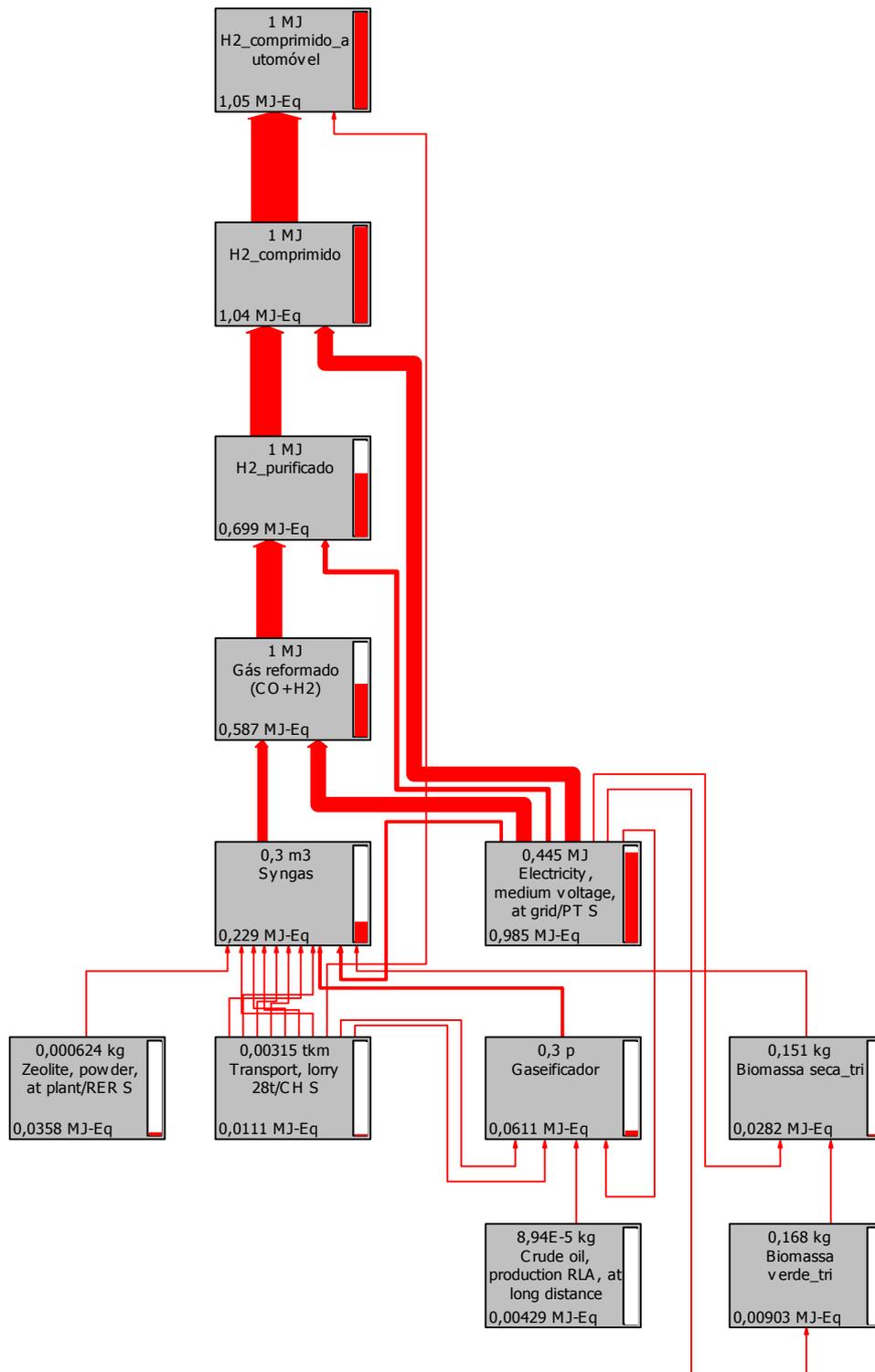


Figura 3.1 - Fluxograma de energia fóssil primária requerida na produção e transporte do bio- H_2 comprimido.

Através da análise da Figura 3.1 verifica-se que são necessários 1,05 MJ de energia primária fóssil para produzir e transportar 1 MJ de bio-H₂ comprimido. Constata-se ainda, que o consumo de electricidade é a componente que tem maior peso na E_{req} na produção do bio-H₂ comprimido. Esta representa 0,985 MJ-eq em 1,05 MJ-eq, o que corresponde a 94% da E_{req} total. A restante E_{req} é constituída pelo transporte de materiais, como por exemplo o transporte do gaseificador e de todos os materiais necessários ao processo de gaseificação, pelo petróleo e pela zeolite. A seguir ao consumo de electricidade, a componente com maior peso (3,4% da E_{req} total) é a zeolite, pois a sua produção tem um elevado consumo de energia fóssil primária (57,4 MJ-eq por cada kg de zeolite produzido).

Analogamente ao fluxograma apresentado na Figura 3.1, apresenta-se na Figura 3.2 a E_{req} para a produção e transporte do bio-H₂ liquefeito.

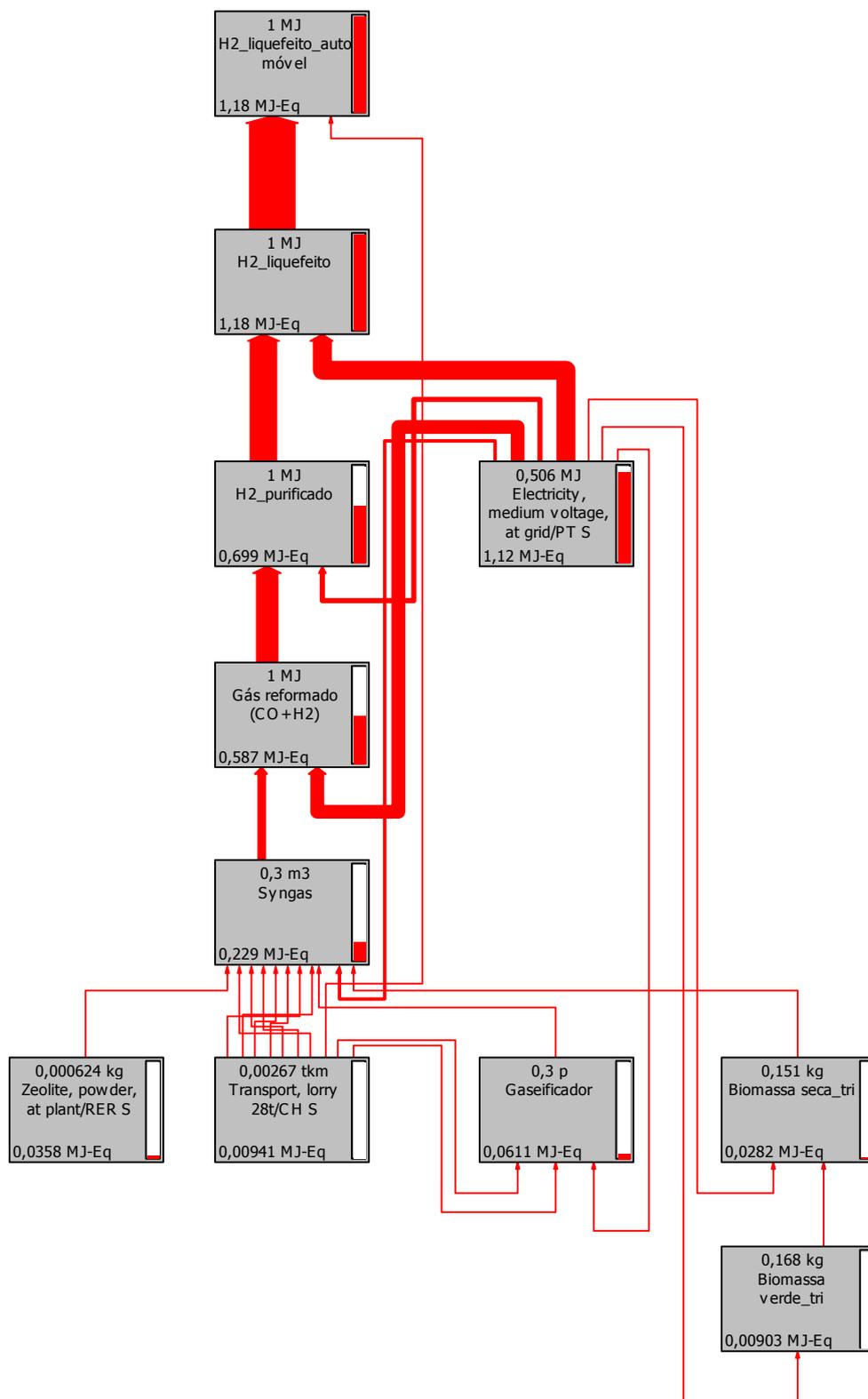


Figura 3.2 - Fluxograma de energia primária requerida no CV do H₂ liquefeito.

A análise da Figura 3.2 permite verificar que para produzir 1 MJ de bio-H₂ liquefeito são necessários 1,18 MJ de energia primária fóssil, aproximadamente 12% superior,

comparativamente com o bio-H₂ comprimido. Esta diferença reside na maior quantidade de electricidade consumida pelo segundo sistema. Pode-se verificar ainda que, tal como na Figura 3.1, a electricidade é a componente com maior peso em todo o CV, em termos de E_{req}, representando 95% da E_{req} total. Os restantes 5% estão associados ao transporte de materiais e equipamentos e à zeolite. Analogamente à análise da Figura 3.1, a seguir à electricidade, o consumo de zeolite é mais contributivo para a E_{req}.

Para uma melhor visualização da contribuição de cada processo na cadeia de produção do bio-H₂ (comprimido e liquefeito) apresenta-se a Figura 3.3 onde estão representados os consumos de energia primária fóssil requerida para cada processo.

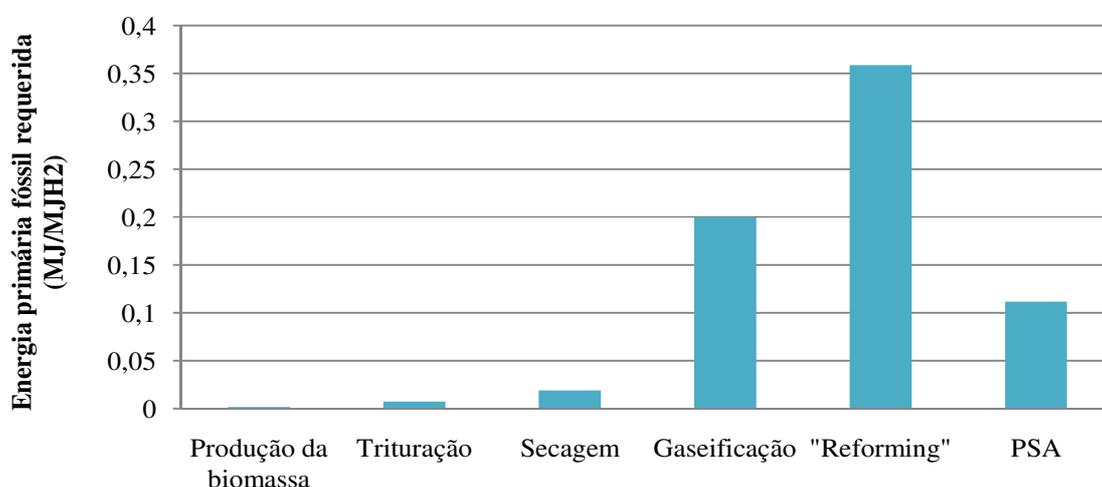


Figura 3.3 - Energia primária fóssil requerida em cada processo.

Da análise do gráfico verifica-se que processo “*reforming*” é mais contributivo para a E_{req}, isto é, é o processo que mais energia fóssil primária necessita por cada MJ de bio-H₂ produzido. Este processo tem um peso de 34% em toda a cadeia de produção do bio-H₂ comprimido e cerca de 31% na produção do bio-H₂ liquefeito. A importante contribuição deste processo na produção de bio-H₂ deve-se aos significativos consumos de electricidade que apresenta, visto que é um processo endotérmico. Segue-se a gaseificação da biomassa como o segundo processo com maiores requisitos energéticos, o qual representa 19% da E_{req} total para a produção de bio-H₂ comprimido e 17% para bio-H₂ liquefeito. O processo menos significativo, em termos de E_{req}, é a produção da biomassa, representando, aproximadamente, 0,1% para o bio-H₂ comprimido e liquefeito.

Na representa-se a energia primária fóssil requerida para os processos que diferem das duas alternativas consideradas (densificação energética – compressão ou liquefacção – e transporte do bio-H₂), com o intuito de analisar especificamente as diferenças mais significativas entre as duas alternativas.

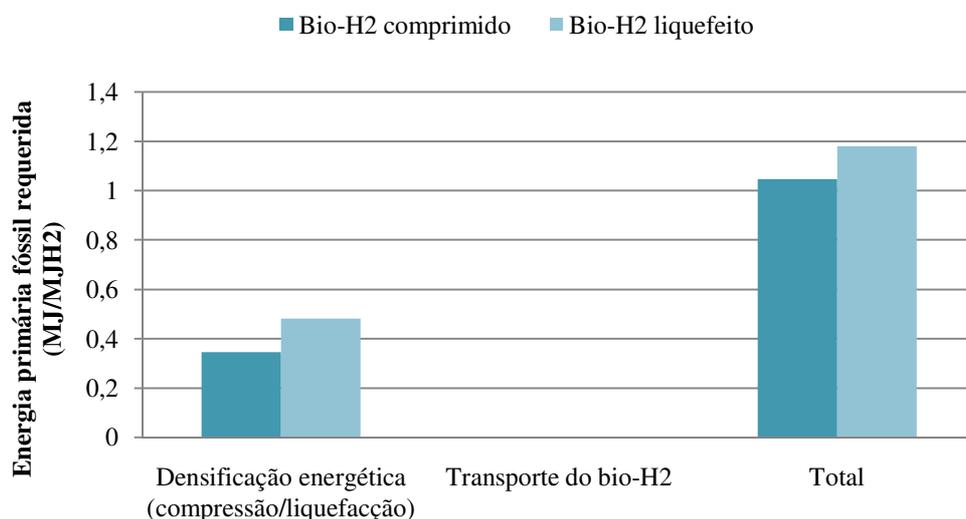


Figura 3.4 - Energia primária fóssil requerida na densificação energética e transporte do bio-H₂.

Pela análise da Figura 3.4 verifica-se que a liquefacção requer mais energia primária fóssil do que o processo de compressão, apresentando uma diferença de 27%. Comparando o processo de transporte com o processo de densificação, o seu peso é muito pouco significativo. Apesar do processo de transporte do bio-H₂ liquefeito apresentar um requisito energético inferior, em termos de ciclo de vida, a alternativa da compressão é mais eficiente energeticamente.

3.2 Análise ambiental

Nesta secção é realizada a avaliação ambiental numa perspectiva “*well to tank*”, à semelhança da secção anterior (nas secções 4.3 e 4.4 é realizada a avaliação ambiental numa perspectiva “*well to wheels*”). Para esta avaliação foi utilizado o método CML 2000 do programa SimaPro7 que engloba as seguintes categorias de impacte ambiental: depleção abiótica, aquecimento global, depleção da camada do ozono, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade aquática marinha, ecotoxicidade terrestre, oxidação fotoquímica, acidificação e eutrofização. A categoria ecotoxicidade

aquática marinha não foi considerada neste estudo pois existe um problema na base de dados do software utilizado relativamente a esta categoria. Apresenta-se na Tabela 3.1 os valores das várias categorias de impacte ambiental para a produção e transporte do bio-H₂ comprimido e liquefeito.

Tabela 3.1 – Resultados das várias categorias de impacte ambiental

Categoria de Impacte	Unidades	Bio-H₂ comprimido	Bio-H₂ liquefeito	Diferença bio-H₂ comprimido e liquefeito (%)
Depleção abiótica	kg Sb _{-eq}	5,9×10 ⁻⁴	6,7×10 ⁻⁴	12,67
Aquecimento global	kg CO ₂ -eq	9,5×10 ⁻²	1,1×10 ⁻¹	10,84
Depleção da camada de ozono	kg CFC-11 _{-eq}	4,8×10 ⁻⁹	5,4×10 ⁻⁹	12,01
Toxicidade humana	kg 1,4-DB _{-eq}	2,9×10 ⁻²	3,3×10 ⁻²	12,12
Ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4-DB _{-eq}	4,5×10 ⁻³	4,8×10 ⁻³	7,82
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB _{-eq}	6,8×10 ⁻⁴	7,7×10 ⁻⁴	12,90
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄	3,9×10 ⁻⁵	4,3×10 ⁻⁵	11,43
Acidificação	kg SO ₂ -eq	9,2×10 ⁻⁴	1,0×10 ⁻³	12,53
Eutrofização	kg PO ₄ -eq	3,9×10 ⁻⁵	4,3×10 ⁻⁵	12,21

Através da análise da Tabela 3.1 verifica-se que para todas as categorias de impacte ambiental o bio-H₂ comprimido apresenta valores inferiores, cerca de 12%, comparativamente com o bio-H₂ liquefeito. A diferença entre ambos está directamente relacionada com a diferença da E_{req}, mais concretamente com a diferença de consumos de electricidade.

Na Figura 3.5 apresentam-se os valores normalizados das diferentes categorias de impacte consideradas, isto é, os valores caracterizados afectados por um factor de ponderação, de modo a mostrar a importância relativa de cada categoria.

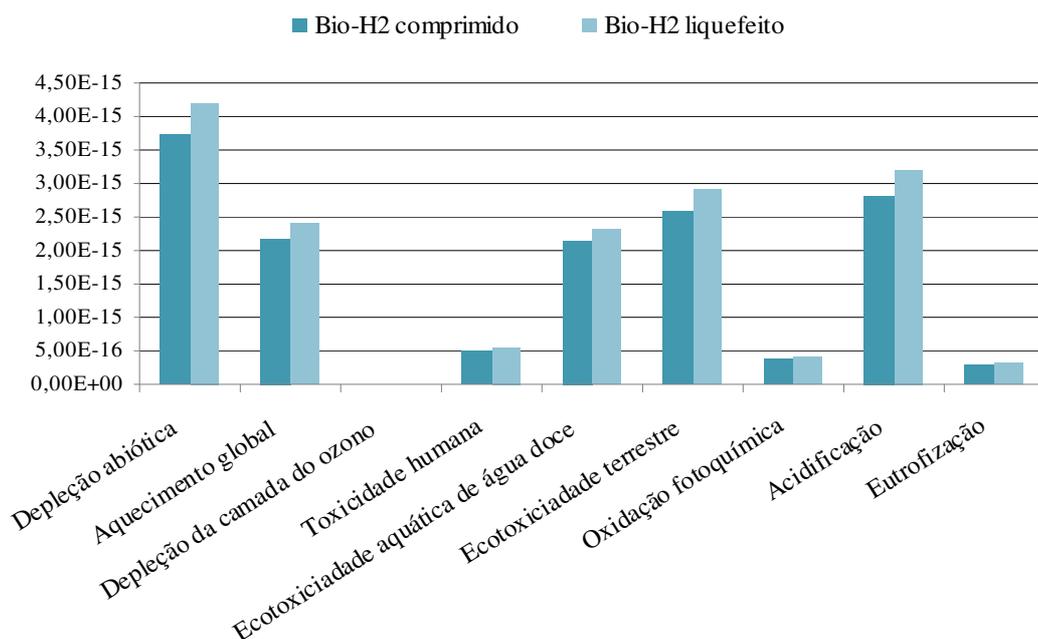


Figura 3.5 - Valores normalizados das categorias de impacte ambiental.

Pela análise do gráfico pode-se verificar que a categoria de impacte ambiental mais afectada é a depleção abiótica. Este indicador de categoria de impacte está relacionado com a extracção de minerais e de combustíveis fósseis que entram no sistema. Como já foi referido, o consumo de electricidade para produzir bio-H₂ é significativo e, como em Portugal, a electricidade dependente significativamente dos recursos fósseis, isto origina que este impacte ambiental se sobressaia em relação aos outros. Relativamente à categoria com menor impacte ambiental é a depleção da camada do ozono, a qual apresenta valores normalizados muito baixos quando comparada com as outras categorias de impacte ambiental, pois não se verifica a emissão de quantidades significativas de CFC-eq.

Para uma análise mais detalhada, optou-se por escolher três categorias de impacte ambiental e analisá-las por processos de produção do bio-H₂, com o objectivo de verificar qual o processo com maior contribuição na categoria em causa. Considerou-se a depleção abiótica, por ser a mais afectada, o aquecimento global, pela sua importância actual no contexto mundial, o qual avalia as emissões de Gases com Efeito de Estufa (GEE), e a acidificação, para posterior comparação com outro estudo. Na Figura 3.6 apresentam-se as emissões de antimónio equivalentes ($\text{kg}_{\text{Sb-eq}}/\text{MJ}_{\text{bio-H}_2}$), que identificam a categoria ambiental depleção abiótica.

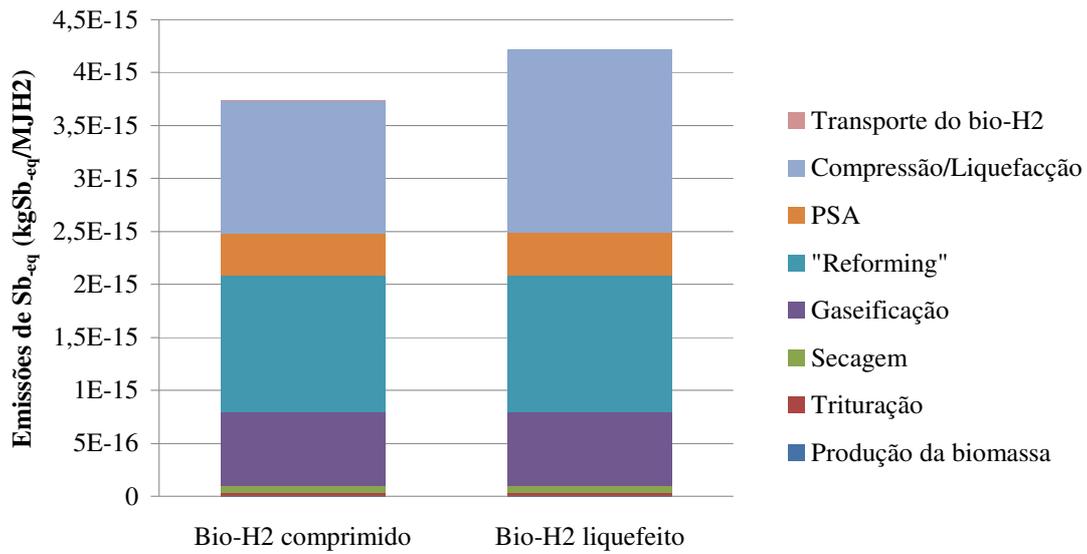


Figura 3.6 - Emissões de Sb-eq na produção e transporte do bio-H₂.

A análise da Figura 3.6 permite verificar os processos mais relevantes na depleção abiótica são o “*reforming*” e a compressão/liquefacção, uma vez que são os processos que apresentam consumos de energia eléctrica superiores. A diferença entre o bio-H₂ comprimido e liquefeito reside no processo de compressão e liquefacção, sendo que o processo de liquefacção apresenta, aproximadamente, mais 40% de emissões de antimónio relativamente ao bio-H₂ comprimido.

Em relação à categoria de impacte ambiental acidificação apresenta-se, na Figura 3.7, a emissão de dióxido de enxofre equivalente (SO_{2-eq}) por cada MJ de bio-H₂ produzido.

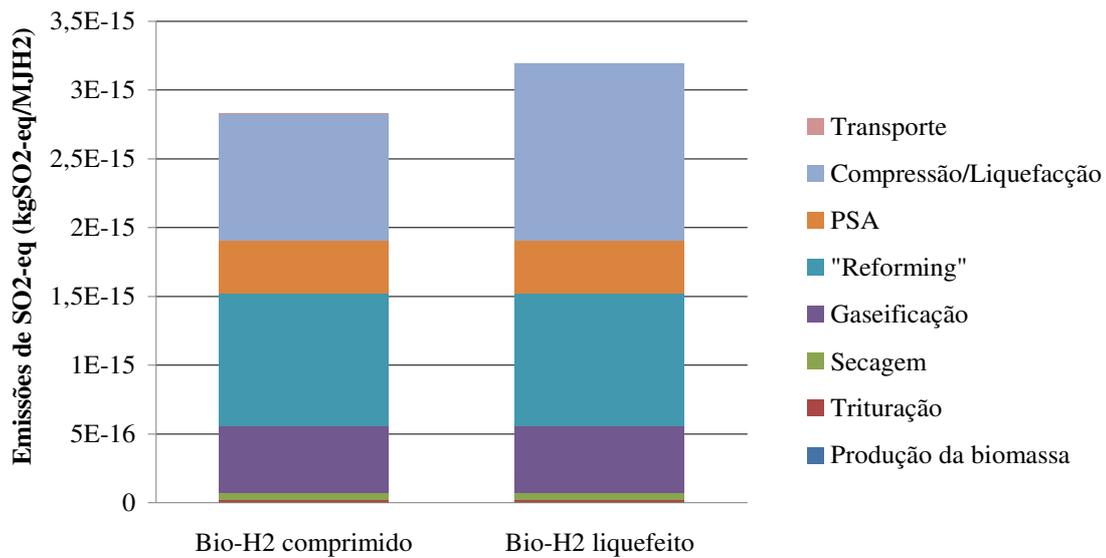


Figura 3.7 – Emissões de SO_2 -eq na produção e transporte do bio- H_2 .

À semelhança da Figura 3.6 o “*reforming*” e a compressão/liquefacção são os processos com maior impacte ambiental e a diferença entre os dois processos de produção está directamente relacionada com a electricidade consumida. As restantes categorias de impacte ambiental irão apresentar uma semelhança específica às duas apresentadas, com excepção da categoria de impacte aquecimento global, devido ao crédito de CO_2 acumulado na fotossíntese, onde a análise específica difere um pouco.

Ao contrário do que muitas vezes é referido, as emissões de CO_2 e de gases com efeito de estufa para a atmosfera nos sistemas de produção de energia com base em biomassa não são nulas. Apesar de se considerar neutra a emissão directa de CO_2 referente à combustão da biomassa sólida, pois existe um equilíbrio estabelecido pela fotossíntese, é necessário considerar as emissões de CO_{2-eq} geradas pelos processos envolvidos em todo o CV. As emissões de CO_{2-eq} representam as componentes do CO_2 , CH_4 e N_2O em termos de CO_2 , com base nos factores de ponderação do IPCC ($1gCO_2 = 1gCO_{2-eq}$; $1gCH_4 = 23gCO_{2-eq}$; $1gN_2O=296gCO_{2-eq}$). Na Figura 3.8 apresentam-se as emissões de CO_{2-eq} para cada processo de produção do bio- H_2 e transporte do mesmo.

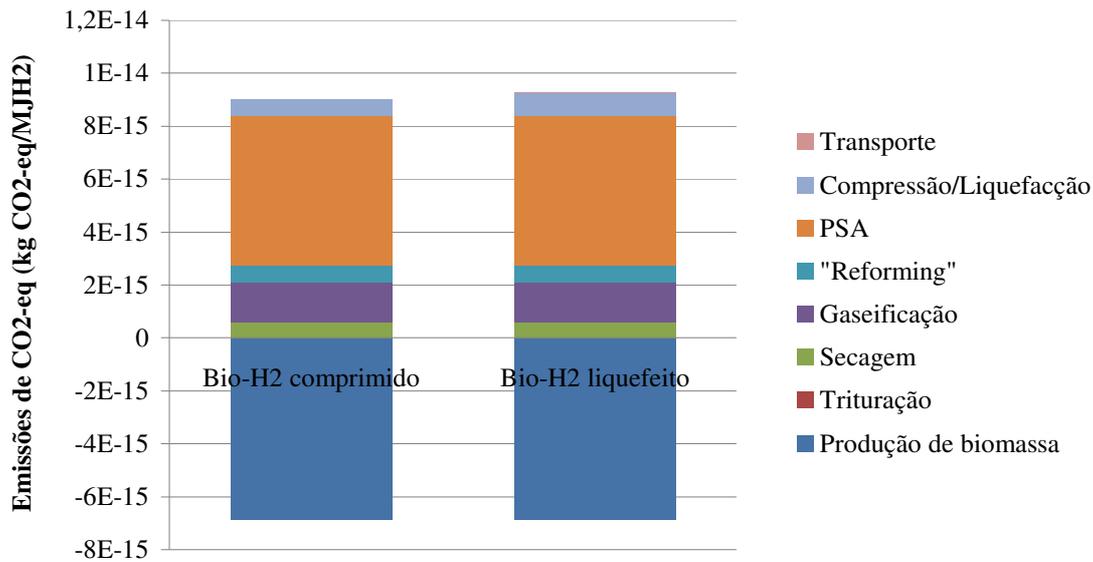


Figura 3.8 - Emissões de CO₂-eq na produção e transporte do bio-H₂.

Pela análise da Figura anterior, verifica-se que o processo mais relevante em termos de emissões de CO₂-eq é o PSA, contribuindo com cerca de 63%, para o caso do bio-H₂ comprimido e 61% para o bio-H₂ liquefeito. Isto deve-se ao facto de neste processo ser libertado para a atmosfera o CO₂ que é formado no processo “*shift reaction*”. Pode-se verificar ainda que a produção da biomassa tem um contributo positivo na produção e transporte do bio-H₂, visto que as emissões de CO₂-eq são negativas (-1,8 kgCO₂-eq/MJH₂). Este facto é justificado pelo armazenamento de CO₂ durante a fotossíntese, contribuindo com um crédito significativo, acabando por serem compensadas algumas das quantidades de CO₂ que são libertadas durante a cadeia de produção. A electricidade contribui, relativamente às emissões de CO₂-eq, com 80% do total emitido, ou seja, é a entrada mais importante no sistema.

3.3 Comparação com outros estudos

Na presente secção é realizada uma comparação com outros estudos da literatura científica no intuito de se compararem os resultados obtidos do presente estudo. Os estudos que se seleccionaram para comparação foram: Concauwe, 2007; S&T, 2003; e Koroneos *et al.*, 2007. Na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3 apresentam-se os valores dos resultados obtidos nesta investigação e nos estudos seleccionados para comparação, no que diz respeito à energia primária fóssil requerida e emissões de CO₂-eq, respectivamente.

Tabela 3.2 - Energia primária requerida: presente estudo vs outros estudos científicos

Alternativa	Energia primária fóssil requerida	Presente estudo	Concawe, 2007	S&T, 2003
#A1	MJ/MJ _{H2comp.}	1,05	0,23	-
	MJ/km	1,46	1,85	2,88
#A2	MJ/MJ _{H2liq.}	1,18	0,07	-
	MJ/km	3,21	4,50	6,92

Com base na análise da Tabela 3.2 pode-se verificar que a energia primária fóssil requerida para o CV do bio-H₂ (numa perspectiva “well to wheels”), nesta investigação é ligeiramente inferior, comparativamente com os dois estudos apresentados. Esta diferença pode dever-se às eficiências de conversão das tecnologias utilizadas nos veículos. Visto que ambos os estudos foram realizados nos Estados Unidos da América e que os veículos ligeiros têm maiores consumos do que os da Europa. Relativamente à energia primária fóssil requerida no processo de produção do bio-H₂ esta é superior para esta investigação, e pode dever-se ao facto de se ter assumido que a electricidade provinha da rede eléctrica nacional, enquanto nos outros estudos consideraram que os consumos auxiliares de electricidade eram satisfeitos com base na conversão energética da biomassa em energia eléctrica.

Tabela 3.3 - Emissões de CO₂-eq: presente estudo vs outros estudos científicos

Alternativa	Emissões de CO ₂ -eq	Neste estudo	Concawe, 2007	S&T, 2003	Koroneos, 2007
#A1	g/MJ _{H2comp.}	96	14	-	
	g/km	133	13	9	
#A2	g/MJ _{H2liq.}	106	8	-	160
	g/km	288	15	25	

Pela análise da Tabela 3.3 pode-se verificar que as emissões de CO₂-eq apresentadas pelos outros estudos são significativamente inferiores às obtidas nesta investigação. Esta diferença de valores tem como origem a proveniência dos consumos de electricidade, pois, tal como já foi referido, neste estudo toda a energia eléctrica necessária ao processo de produção provém da rede eléctrica nacional e não de um recurso renovável (considerando nulas as emissões provenientes destes).

Relativamente ao estudo do Koroneos a diferença reside na electricidade. Apesar de também ter sido considerada da rede eléctrica nacional, o estudo é efectuado para a Grécia e o uso de recursos fósseis para a produção de electricidade é superior do que em Portugal.

3.4 Bio-hidrogénio vs Diesel

Nesta secção é efectuada a comparação, energética e ambiental, entre os veículos sobre o qual se efectuou o presente estudo e um veículo ligeiro convencional fóssil. Para este último veículo, considera-se como sendo a #Alternativa 3 (#A3), tendo-se seleccionado os veículos a diesel, porque, em Portugal, o recurso a este tipo veículo tem crescido nos últimos anos. Estes três veículos são comparados em termos de energia fóssil primária requerida, categorias de impacte ambiental e emissões de CO_{2-eq}, em função da unidade funcional definida, 1 km percorrido (numa análise “well to wheels”).

No Apêndice A apresentam-se os fluxogramas referentes à energia fóssil requerida e às emissões de CO_{2-eq} para as três alternativas consideradas, em função de 1 km percorrido por pessoa. Considera-se que a ocupação média do veículo é de uma pessoa. Na Figura 3.9 apresentam-se os consumos de energia fóssil primária das três alternativas consideradas.

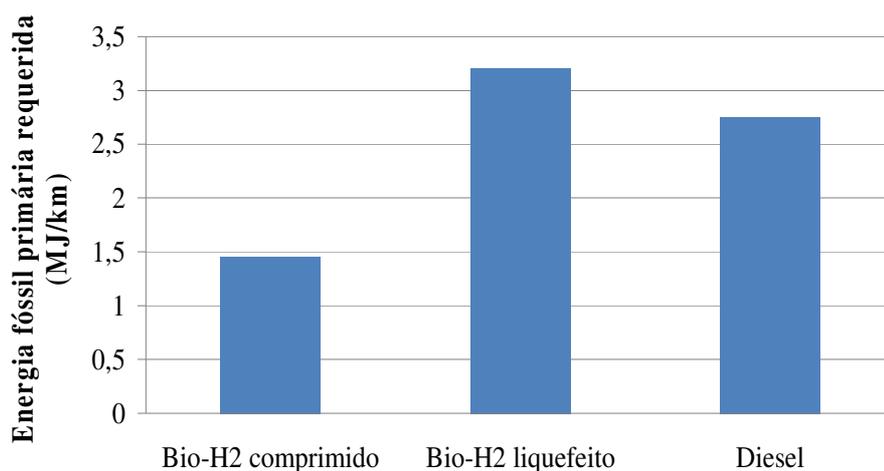


Figura 3.9 - Energia fóssil primária requerida: bio-H₂ vs diesel.

Através da análise do gráfico pode-se concluir que o veículo propulsionado a bio-H₂ liquefeito tem um consumo de energia primária requerida superior relativamente às outras alternativas apresentadas. Ao considerar a #A3 é possível ter uma poupança energética de 14%, em relação à #A2. Contudo, se compararmos esta com a utilização de um veículo propulsionado a bio-H₂ comprimido conseguem-se poupanças energéticas em quase 55% (1,75 MJ de energia primária fóssil requerida a menos, por km percorrido).

Na Tabela 3.4 apresentam-se os resultados obtidos para cada categoria de impacte ambiental considerada.

Tabela 3.4 – Resultados das várias categorias de impacto ambiental: bio-H₂ vs diesel

Categoria de Impacte	Unidades	CV bio-H₂ comprimido	CV bio-H₂ liquefeito	CV Diesel
Depleção abiótica	kg Sb _{-eq}	$8,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$
Aquecimento global	kg CO ₂ - _{eq}	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,9 \times 10^{-1}$	$2,0 \times 10^{-1}$
Depleção da camada de ozono	kg CFC-11 _{-eq}	$6,7 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-8}$	0
Toxicidade humana	kg 1,4-DB _{-eq}	$4,1 \times 10^{-2}$	$8,9 \times 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-2}$
Ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4-DB _{-eq}	$6,2 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-4}$
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB _{-eq}	$9,5 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-5}$
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄	$5,4 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$5,4 \times 10^{-5}$
Acidificação	kg SO ₂ - _{eq}	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$5,7 \times 10^{-4}$
Eutrofização	kg PO ₄ - _{eq}	$5,4 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^{-5}$

Da análise da Tabela 3.4 conclui-se que o bio-H₂ liquefeito apresenta impactes ambientais superiores, em todas as categorias, em relação ao CV do bio-H₂ comprimido e ao CV do diesel devido aos elevados consumos de electricidade da cadeia de produção e da eficiência de conversão de energia final em energia útil (aplicação automóvel).

Na Figura 3.10 apresenta-se o gráfico com os valores normalizados das categorias de impacto para o CV das três alternativas consideradas.

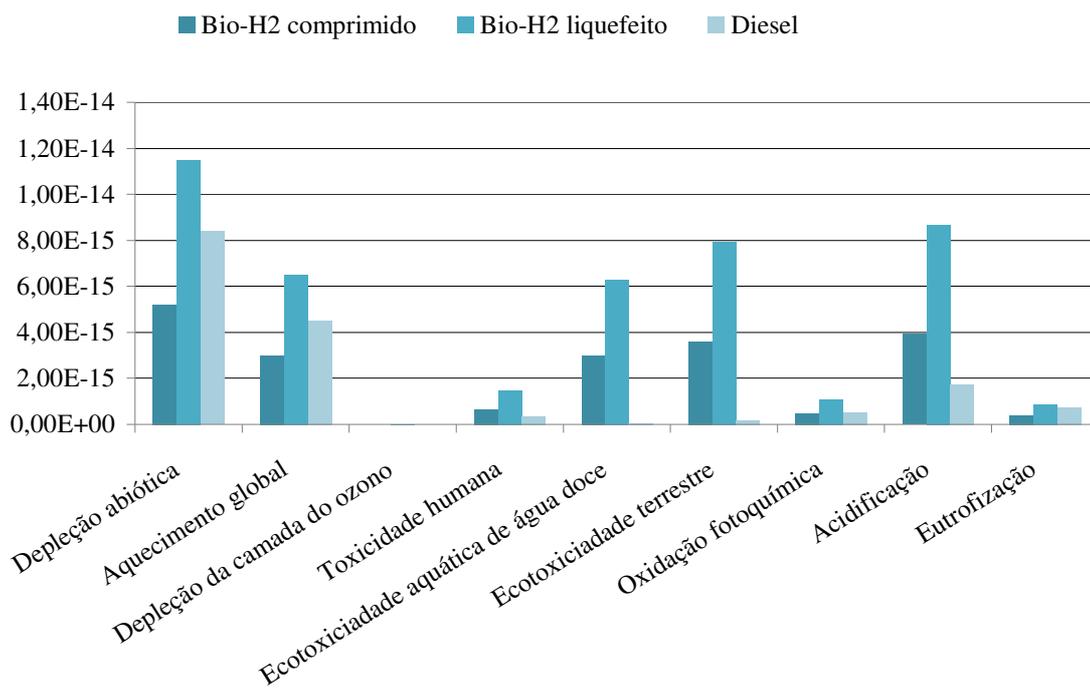


Figura 3.10 - Categorias de impacto ambiental normalizadas: bio-H2 vs diesel.

Pela análise da Figura é possível verificar que a categoria de impacto ambiental mais afectada é a depleção abiótica, para qualquer alternativa. Para as categorias de impacto ambiental depleção abiótica, aquecimento global e eutrofização o CV do diesel apresenta valores mais elevados do que o CV do bio-H₂ comprimido. Contudo, para todas as outras categorias de impacto ambiental, o diesel é o que tem menores impactos ambientais. Verifica-se ainda, tal como na Tabela 3.4, que o bio-H₂ liquefeito é o que apresenta maiores impactos ambientais, em qualquer categoria, comparativamente com os outros dois sistemas apresentados. A categoria menos afectada é depleção da camada do ozono.

Na Figura 3.11 apresenta-se a emissão de GEE (CO₂-eq/km_{percorrido}) para as três alternativas consideradas.

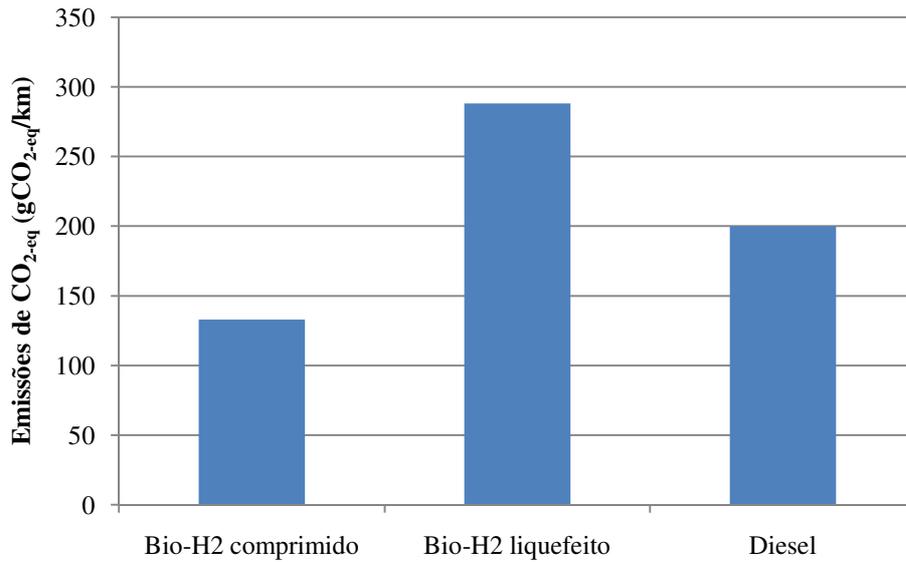


Figura 3.11 - Emissões de CO₂.eq: bio-H₂ vs diesel.

Pela análise do gráfico constata-se que a #A2 é a que apresenta emissões de CO₂-eq superiores, seguindo-se a #A3. Comparando a #A3 com a #A2 verifica-se que podem ser evitadas cerca de 31% das emissões de CO₂-eq, correspondente a 88 gCO₂-eq por cada km percorrido. Relativamente à #A1, verifica-se que podem ser evitadas quase 54% das emissões (155 gCO₂-eq/km), quando comparada com a #A2.

3.5 Avaliação do potencial com base nos resultados obtidos

Esta secção analisa o potencial de implementação de uma central de produção de bio-H₂ em Portugal, assumindo as considerações que foram tidas em conta ao longo do estudo. Realizou-se uma análise de sensibilidade para determinar a influência entre o raio de acção real e o raio de acção teórico obtido (raio de acção linear obtido na secção 2.3). Deste modo, pretende-se determinar a área de influência da central, em função do raio real, para que se possa verificar se é viável a construção deste tipo de centrais em Portugal.

Apresenta-se na Tabela 3.5 a relação entre a área de influência da central e a distância real. Para os dados apresentados na Tabela 3.5 assumiu-se que o raio real pode ser igual ao teórico ou 50 e 100% superior.

Tabela 3.5 – Raio de acção teórico/raio de acção real

	Raio_real/Raio_teorico	Raio teórico (km)	Raio real (km)	Área (ha)
Raio de acção 1	1,0	14,17	14,17	63100
Raio de acção 2	1,5	14,17	21,26	142000
Raio de acção 3	2,0	14,17	28,34	252300

Um local possível para a implementação da central seria na zona entre Albergaria-a-Velha e Sever do Vouga, pois é uma zona de elevada densidade florestal de eucalipto e tem uma das maiores manchas de povoamentos puros de eucaliptos. Além disso, é uma zona em que a prática da silvicultura de eucalipto é bastante significativa, apresentado assim, recursos humanos para a cultura energética de eucalipto para uma central deste tipo. Na escolha deste possível local de implementação, também se teve em consideração para as imediações da central, boas vias de acesso (A1, A25 e N1) e a existência de uma zona portuária (porto de Aveiro que se encontra a cerca de 30 km). Por último, escolheu-se uma zona que não colidisse significativamente com as áreas de influência das maiores indústrias transformadoras de madeira e da pasta e do papel existentes em Portugal. Na Figura 3.12 apresentam-se os raios de acção, mínimo e máximo, para o estudo realizado e o mapa da densidade florestal em Portugal, em função da zona escolhida.

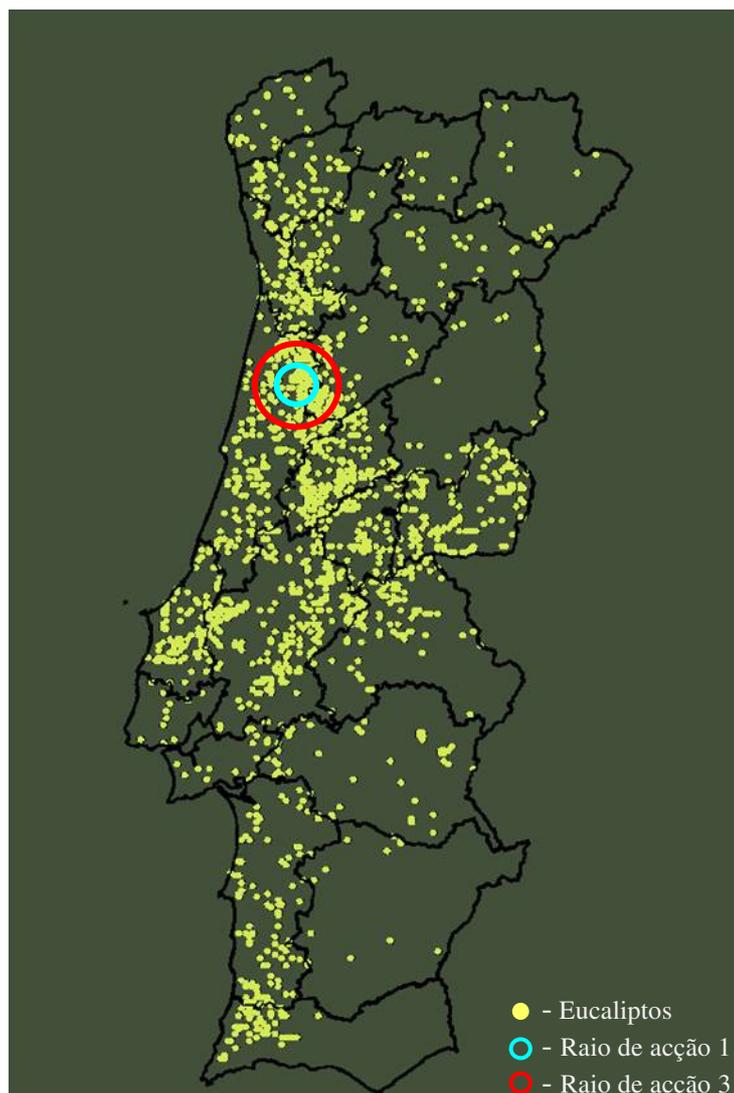


Figura 3.12 - Mapa da distribuição geográfica de povoamentos puros de eucalipto em Portugal

Em Portugal, a área de povoamento puro de eucalipto é de 650000 ha (DGRFb, 2006). Analisando a Tabela 3.5 e a Figura 3.12 verifica-se que a central pode apresentar uma área de influência bastante significativa, a qual pode chegar aos 39% da área de povoamentos puros de eucalipto existentes em Portugal. Da análise efectuada, verifica-se que a implementação deste tipo de centrais pode apresentar limitações bastante significativas, pois o facto de poder absorver 39% dos povoamentos puros de eucalipto, apresentaria uma grande instabilidade no sector florestal, que é importante em Portugal. A implementação de centrais de bio-H₂ em Portugal, para escalas economicamente viáveis (tendo em consideração os actuais valores apresentados na literatura), apresenta-se como uma situação pouco viável, podendo isso acontecer, se no futuro se conseguirem ter escalas de produção de bio-H₂ significativamente mais baixas.

Capítulo 4 – Conclusões

Este capítulo está dividido em duas secções. Na primeira secção são apresentadas as principais conclusões desta dissertação e na segunda são analisadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

4.1 Conclusões

A investigação realizada no âmbito desta dissertação considerou a produção do bio-H₂ (“*well to tank*”) e a utilização do mesmo em veículos ligeiros automóveis. A presente investigação estabelece contributos relevantes, os quais se descrevem a seguir:

- i) desenvolvimento de um modelo de ciclo de vida, que permite avaliar a energia primária fóssil requerida (E_{req}) e os impactes ambientais associados à utilização do bio-H₂ em veículos ligeiros com base em dois processos alternativos de densificação energética;
- ii) comparação com um automóvel ligeiro com utilização de um combustível fóssil, avaliando os requisitos energéticos, os impactes ambientais e as emissões de gases com efeito de estufa;
- iii) estudo preliminar de implementação de sistemas de produção de biocombustíveis para os transportes, para a realidade portuguesa.

O principal objectivo desta dissertação consistiu na modelação do ciclo de vida da produção de bio-H₂, considerando processos alternativos de produção, transporte e utilização do mesmo, quantificando a energia primária fóssil requerida e os impactes ambientais provocados.

Com base na modelação do ciclo de vida definiram-se duas alternativas de produção de bio-H₂. O bio-H₂ comprimido, em termos energéticos, é mais eficiente que o liquefeito, necessitando de menos 11% de energia primária fóssil, numa perspectiva “*well to tank*”. Comparando a utilização do bio-H₂ em veículos de combustão interna ou “*fuel cell*”, verificou-se, em termos de ciclo de vida, que os veículos “*fuel cell*” permitem uma poupança energética de 1,8 MJ por cada km percorrido. A alternativa mais eficiente é a utilização de bio-H₂ comprimido num veículo “*fuel cell*”, contudo, a utilização em motores

de combustão interna é vista, pela indústria automóvel, como uma solução promissora, pois permite uma maior flexibilidade em conjugar este combustível com outros combustíveis (e.g. gasolina) para o mesmo veículo. Esta solução poderá ser interessante, uma vez que, criar uma rede de abastecimento de hidrogénio, com a cobertura à escala da gasolina, poderá ser um processo lento e de difícil concretização a curto e médio prazo.

Em termos ambientais, as conclusões são idênticas às da energia. A entrada mais representativa nos sistemas é a electricidade, a qual tem um impacte semelhante, tanto ao nível energético como ambiental, em ambos os sistemas. À semelhança do que se concluiu para na análise energética, a utilização do bio-H₂ comprimido num veículo “*fuel cell*” é a que apresenta menores impactes ambientais.

A produção de biomassa (excepto a mitigação do CO₂ durante a fotossíntese) e as infra-estruturas dos equipamentos e da central apresentam um contributo pouco significativo, podendo ser desprezáveis comparativamente com os outros processos. Os processos “*reforming*”, liquefacção e compressão são os mais importantes no ciclo de vida devido aos significativos consumos de electricidade que apresentam.

A avaliação comparativa entre a utilização de veículos a bio-H₂ (com base na biomassa lenho-celulósica) e de veículos convencionais a diesel, permitiu demonstrar os significativos benefícios associados à utilização de veículos “*fuel cell*” com o combustível bio-H₂. O bio-H₂ apresenta ainda algumas vantagens relativamente ao diesel, pois a utilização deste combustível em locais de grandes concentrações de poluentes poderá ser uma solução alternativa à descentralização da poluição nos grandes centros urbanos.

Para ser viável a implementação de uma central de produção de bio-H₂, com base na cultura energética do eucalipto, poder-se-ia utilizar quase a totalidade da área florestal de eucalipto existente em Portugal, esgotando-se assim, a matéria-prima para as indústrias (e.g. pasta, papel e transformadoras de madeira). Este cenário poderia causar uma instabilidade significativa no sector florestal. Conclui-se assim, que Portugal apresenta uma capacidade florestal limitada para a integração de centrais de elevada escala de produção, como é o caso do bio-H₂.

A diminuição dos impactes ambientais e energéticos dos processos da cadeia de produção do bio-H₂, e consequentemente do ciclo de vida do sistema, pode ser alcançada a partir das oportunidades de melhoria que se enumeram de seguida:

- i) aumentar a eficiência de utilização da electricidade nestes processos, pois a sua utilização é um aspecto importante, na medida em que esta apresenta um contributo no ciclo de vida de, aproximadamente, 95% e 81% em termos energéticos e ambientais, respectivamente;
- ii) integrar centrais de produção de energia eléctrica, com base em energias renováveis, na central de produção de bio-H₂;
- iii) integração de uma central de co-geração na central de produção de bio-H₂, com base em gás de síntese produzido em excesso, que permitisse satisfazer os consumos de energia eléctrica nos processos e de energia térmica no secador e gaseificador.

4.2 Trabalhos futuros

No decorrer da investigação apresentada nesta dissertação foram identificadas algumas oportunidades para trabalhos futuros de investigação, dando destaque aos processos com maiores consumos de energia e com maiores impactes ambientais. Apresentam de seguida algumas dessas propostas:

- analisar a aplicação de outras tecnologias de gaseificação da biomassa lenho-celulósica e de purificação do bio-H₂ que permitam maiores eficiências de conversão de modo a diminuir os custos de produção do bio-H₂ e outros custos inerentes a esta tecnologia de forma a que se consigam, em termos de viabilidade económica, menores escalas de produção;
- analisar numa perspectiva multi-dimensional (energética, ambiental e económica) o sequestro de CO₂ no processo PSA.
- saber a relação, para Portugal, entre o raio teórico e o real para as culturas energéticas de rotações curtas de eucalipto. Esta relação é importante para o estudo da viabilidade de implementação de centrais de biocombustíveis em Portugal.

Referências bibliográficas

- Adamson, K., Pearson, P., 2000. Hydrogen and methanol: a comparison of safety, economics, efficiencies and emissions. *Journal of Power Sources*; 86, 548-555.
- Andrade, R. V., Lora, E. S. L., Melo, B. A., Sales, C. S. V. B., Gomez, E. O., 2007. Gaseificação de biomassa em leito fluidizado: avaliação de um reator operando com casca de arroz como combustível. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica.
- Beer, T., Grant, T., Brown, R., Edwards, J., Nelson, P., Watson, H., Williams, D., 2000. Life-cycle Emissions Analysis of Alternative Fuels for Heavy Vehicles. CSIRO Atmospheric Research Report C/0411/1.1/F2 to the Australian Greenhouse Office.
- Bioenergia, 2004. Manual sobre tecnologias, projecto e instalação. Disponível em <http://www.forma-te.com/> (acedido no período de Maio 2008 a Agosto 2008)
- Blok, K., Williams, R. H., Katofsky, Hendriks, C. A., 1997. Hydrogen production from natural gas, sequestration of recovered CO₂ in depleted gas wells and enhanced natural gas recovery. *Energy*. Vol 22, No 2/3, pp 161-168.
- Bossel, U., Eliasson, B., 2003. Energy and the Hydrogen Economy.
- Boudries, R., Dizene, R., 2008. Potentialities of hydrogen production in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*; 1-12. Disponível online em <http://www.sciencedirect.com/>.
- Brand, M. A., 2007. Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem.
- Bromberg, L. Cohn, D. R., Rabinovich, A., Alexeev, N., 1999. Plasma catalytic reforming of methane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24; 1131-1137.
- Comissão Europeia, 2003. Hydrogen Energy and fuel cells: a vision of our future. Disponível em <http://ec.europa.eu/>.

- Concawe , 2007. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Joint Researcher Centre. Relatório da Comissão Europeia. 88 pp.
- Drnevich, R., 2003. Hydrogen Delivery: Liquefaction & Compression. Strategic Initiatives for Hydrogen Delivery Workshop.
- Dutton, A. G., Page, M., 2007. The THESIS model: An assessment tool for transport and energy provision in the energy economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32; 1638-1654.
- DGRF 2006a. Estratégia Nacional para as Florestas. Lisboa: Direcção-Geral dos Recursos Florestais. Versão preliminar para Discussão Pública.
- DGRF 2006b. Inventário Florestal Nacional (2005-2006) – Resultados preliminares. Lisboa: Direcção-Geral dos recursos Florestais.
- Faaij, A., 2006. Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11; 343-375.
- Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., Cabrita, I., 2003. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. *Fuel*, 82; 835-842.
- Gasol, C. M., Gabarrell, X., Anton, A., Rigola, M., Carrasco, J., Ciria, P., Solano, M. L., Rieradevall, J. 2007. Life cycle assessment of a Brassica carinata bioenergy cropping system in southern Europe. *Biomass and Bioenergy*, 31; 543-555.
- GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems), Germany.
- Gulyurtlu, I., 2007. Estado da arte da gaseificação e combustão da biomassa. Seminário “Culturas energéticas, biomassa e biocombustíveis”. Universidade de Évora.
- Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C., 2002. Future prospects for production of methanol and hydrogen from biomass. *Journal of Power Sources*, 111; 1-22.
- Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C., 2006. Outlook for advanced biofuels. *Energy Policy*, 34; 3268-3283.

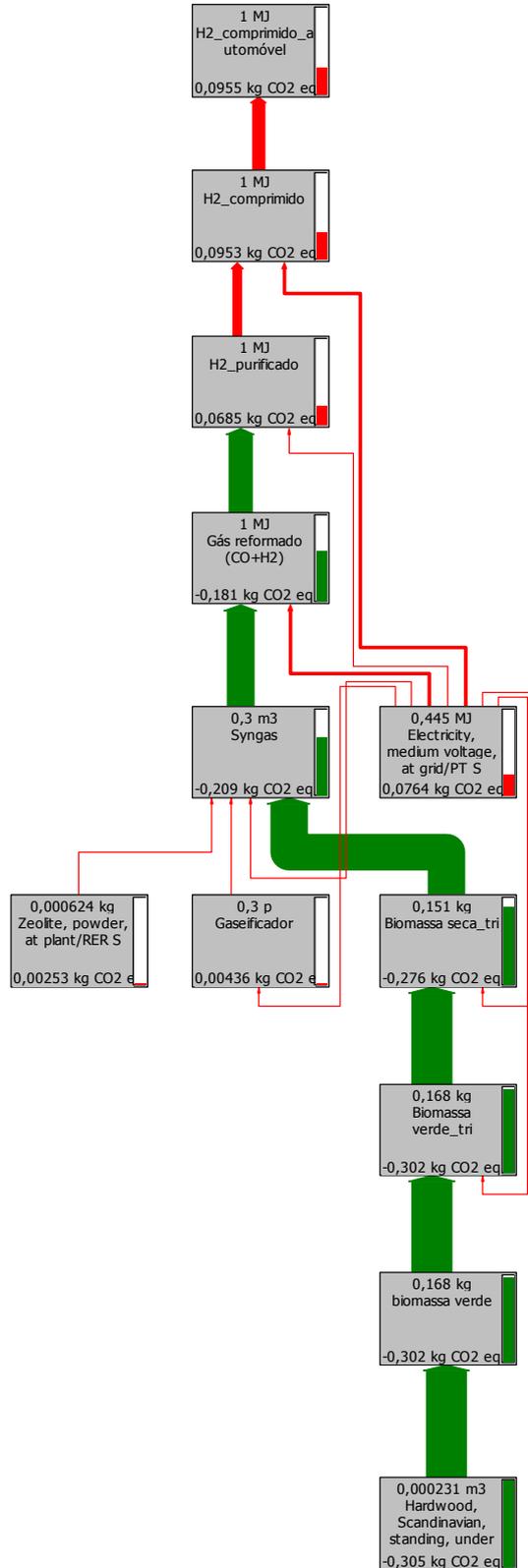
- Hamelinck, C. N., van Hooijdonk, G., Faaij, A., 2005. Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term. *Biomass and Bioenergy*, 28; 384-410.
- HE (Hidrogénio na Europa), 2007. Disponível em <http://www.revistapesquisa.fapesp.br/> (acedido no período de Maio 2008 a Agosto 2008).
- Jungbluth, N., Chudacoff, M., Dauriat, A., Dinkel, F., Doka, G., Faist Emmenegger, M., Gnansounou, E., Kljun, N., Schleiss, K., Spielmann, M., Stettler, C., Sutter, J. 2007: Life Cycle Inventories of Bioenergy. ecoinvent report No. 17, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Kai, T., Uemura, Y., Takanashi, H., Tsutsui, T., Takahashi, T., Matsumoto, Y., Fujie, K., Suzuki, M., 2007. A demonstration project of the hydrogen station located on Yakushima Island – Operation and analysis of the station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32; 2519-3525.
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., Moussiopoulos, N., 2004. Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29; 1443-1450.
- Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., 2007. Hydrogen production via biomass gasification – A life cycle assessment approach. *Chemical Engineering and Processing*.
- Lau, F.S., Bowen, D. A., Dihu, R., Doong, S., Hughes, E. E., Remick, R., Slimane, R., Turn, S. Q., Zabransky, R., 2002. Techno-economic analysis of hydrogen production by gasification of biomass. Final Technical Report.
- Lazarinos, J. G. C., 2007. Tratamento de revestimentos gastos de cuba eletrolítica da indústria de alumínio. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- Lensu, T. Alakangas, E., 2004. Small-scale electricity generation from renewable energy sources. OPET Report 13. VTT Process.

- Malça, J., Freire, F., 2006. Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): Assessing the implications of allocation. *Energy*, 31; 3362-3380.
- Mendes, A. L., 2008. Avaliação do ciclo de vida da biomassa para a produção de energia eléctrica: cultura energética do eucalipto vs resíduos florestais. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Morales, M. A., 2008. Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative (JTI). National Contact Points meeting. Bruxelas.
- Morris, D., 2003. The hydrogen economy and a proposal for an alternative strategy. Institute for Local Self-Reliance.
- Mueller-Langer, F., Tzimas, E., Kaltschmitt, M., Peteves, S., 2007. Techno-economic assessment of hydrogen production process for the hydrogen economy for the short and medium term. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32; 3797-3810.
- Nath, K., Das, D., 2003. Hydrogen from biomass. *Current Science*, vol. 85, no. 3.
- Nunes, J., 2008. Avaliação Integrada da Produção de electricidade com base em biomassa Lenho-Celulósica em Portugal: Emissões de GEE, Análise Tecnológica e Energética de Ciclo de Vida. Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Coimbra.
- Rocha, J. O., 2008. Workshop de Tecnologias BTL (Biomass to Liquid). Projecto programa de pesquisa em políticas públicas.
- Rogner, H. H., Barthel, F., Cabrera, M., Faaij, A., Giroux, M., Hall, D., Kagramanian, V., Kononov, S., Lefevre, T., Nötstaller, R., Odell, P., Taylor, M., 2000. Energy resources. In: Goldemberg, J. (Ed), *World Energy Assessment*, United Nations Development programme, New York, NY, USA, pp.135-171.
- Ruether, J., Ramezan, M., Grol, E., 2005. Life-Cycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Hydrogen Fuel Production in the United States from LNG and Coal. National Energy Technology Laboratory.

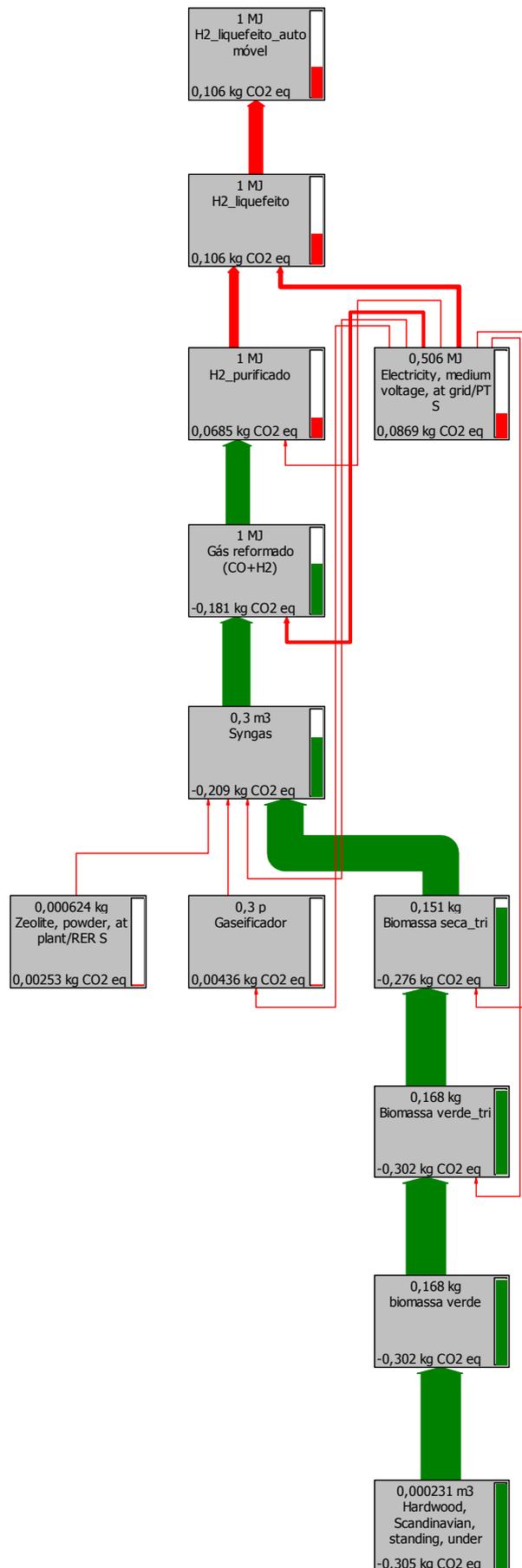
- Santos, F. M. S. M., Santos, F. A. C. M., 2005. O combustível hidrogénio. Millenium - Revista do ISPV, nº31, Maio 2005.
- Seitarides, Th., Athanasiou, C., Zabaniotou, A., 2008. Modular biomass gasification-based solid oxide fuel cells (SOFC) for sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 12, 1251-1276
- Shmalko, Y. F., Ivanovsky, A. I., Lototsky, M. V., Karnatsevich, L. V., Milenko, Y. Y., 1999. Cryo-hydride high-pressure hydrogen compressor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24; 649-650.
- SimaPro 7.0 (Professional) Programa de Avaliação de Ciclo de Vida, Pré Consultants, The Netherlands.
- Sordi, A., da Silva, E. P., Lobkov, D. D., Neto, A. J. M., Lopes, D. G., 2006. Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo PEMFC.
- Spilsbury, C., 2001. Hydrogen Production, Supply and Distribution. Hydrogen Production Workshop. University of Glamorgan.
- Syed, M. T., Sherif, S. A., Veziroğlu, T. N., Sheffield, J. W., 1998. An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23; 565-576.
- S&T, 2003. Hydrogen Pathways Greenhouse gas emissions and energy use. Fuel Cells Canada. Relatório técnico. Vancouver. 56 pp.
- Weil, S., Hamel, S., Krumm, W., 2006. Hydrogen energy from coupled waste gasification and cement production – a thermochemical concept study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31; 1674-1689.
- Yamada, S., Sagara, A., Imagawa, S., Mito, T., Motojima, O., 2007. Conceptual design of the cryogenic system for the helical-type fusion power plant FFHR. *Fusion Engineering and Design*, 82; 2817-2823.

Apêndice A – Fluxogramas obtidos no programa SimaPro

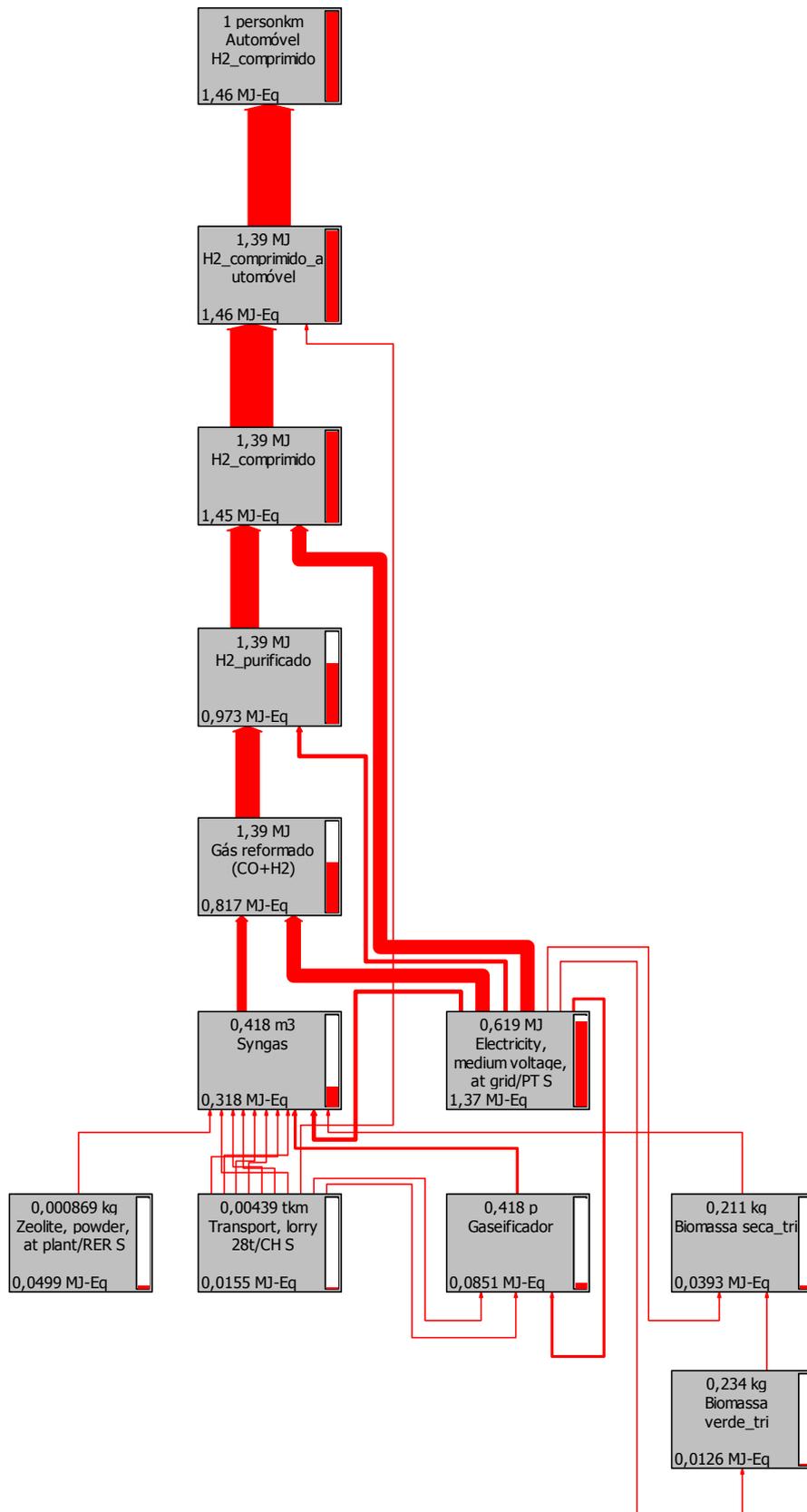
A1 – Fluxograma das emissões de GEE da produção do bio-H₂ comprimido



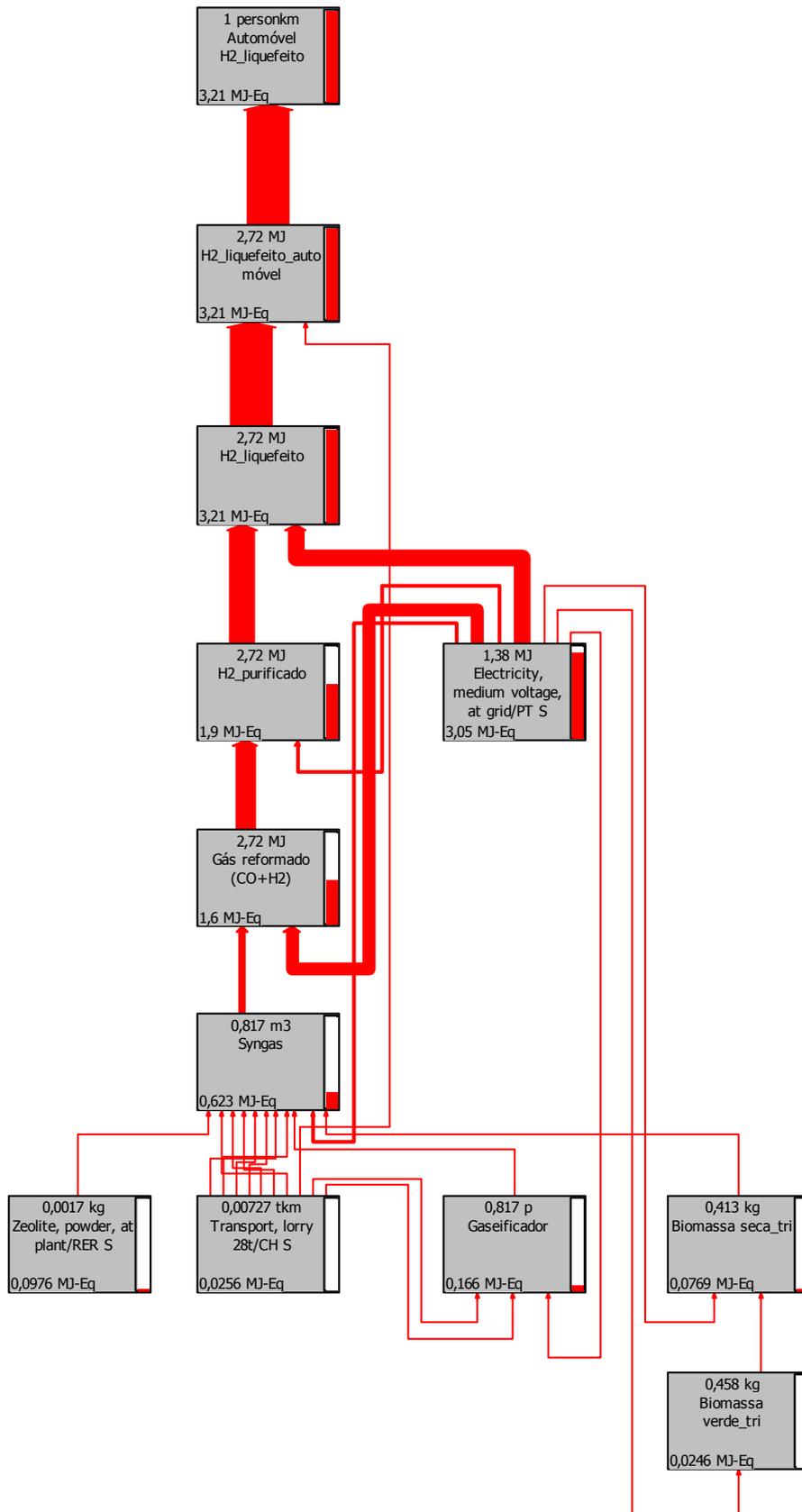
A2 – Fluxograma das emissões de GEE da produção do bio-H₂ liquefeito



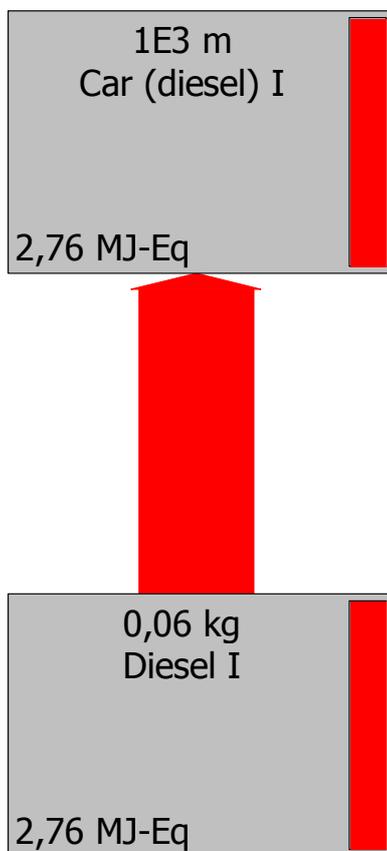
A3 – Fluxograma da energia primária fóssil requerida (“well to wheels”) do bio-H₂ comprimido



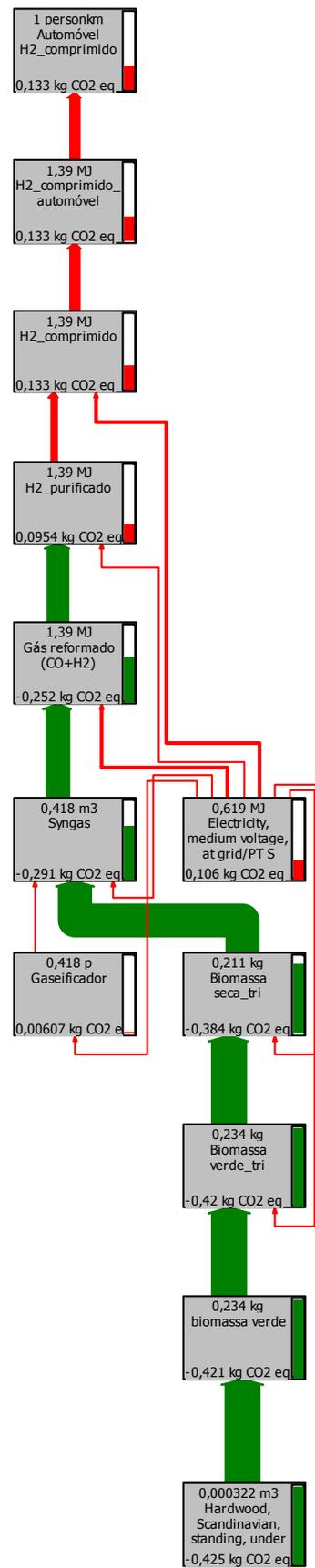
A4 – Fluxograma da energia primária fóssil requerida (“well to wheels”) do bio-H₂ liquefeito



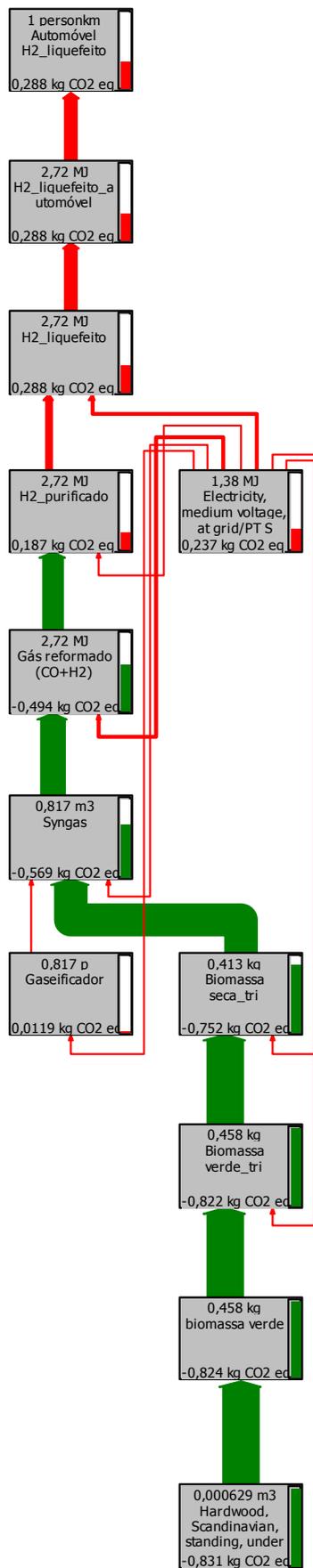
A5 – Fluxograma da energia primária fóssil requerida (“*well to wheels*”) para um veículo a diesel



A6 – Fluxograma das emissões de GEE (“well to wheels”) do bio-H₂ comprimido



A7 – Fluxograma das emissões de GEE (“well to wheels”) do bio-H₂ liquefeito



A8 – Fluxograma das emissões de GEE (“*well to wheels*”) para um veículo a diesel

