



ANÁLISE DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DE HIDROGÊNIO COM UM SISTEMA DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA UM DRONE

Ana Laura Mendonça Almeida Magalhães (almam2000@gmail.com)

Pedro Américo A. M. Júnior (pamerico@pucminas.br)

Igor Guasti Rios (igorguasti3@gmail.com)

Hudson Prado Alexandre (hudson_prado@hotmail.com)

Bernardo de Souza Guimarães (flyingpriest.puc@gmail.com)

Diogo Vilaça Teixeira (flyingpriest.puc@gmail.com)

Felipe Barbosa de Souza Santos

Felipe Moura Vasconcelos

Gabriel Mudadu Carmona Machado

Gláucia da Silveira Eduardo

Jeferson Expedito de Oliveira Silva

Lucas Henrique de Aguiar Bittencourt

Lucas Lacerda Balbino

Luis Henrique Santos (manumecpuc@gmail.com)

Matheus Pacheco Herzeberg Gonçalves

Michael Duarte do Amaral

Paulo Henrique Barros Vasconcellos

Pedro Henrique da Silva Maia

Pedro Mariani de Souza (pedro_pms26@hotmail.com)

Pedro Paulo Santos Rodrigues da Cunha (pepesrc_@hotmail.com)

Samuel Oliveira Figueiredo

Victor Carvalho Franco Marinho

William Ribeiro Silva

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUCMINAS

Avenida Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, Prédio 10 - Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil – 30535-610

Resumo. Este artigo investiga a integração de um sistema de energia híbrido para um pequeno veículo aéreo não tripulado (VANT). O sistema de energia híbrida proposto consiste em célula de combustível de hidrogênio, painéis fotovoltaicos e bateria. O VANT é modelado para que os painéis fotovoltaicos cobrem a área de asa, célula de combustível de membrana de troca de prótons e uma bateria de polímero de lítio. As análises são conduzidas utilizando dados adquiridos através de testes de banco de sistemas de energia e simulações. Usando valores de arrasto, elevação e peso, a potência requerida por um Drone é determinado. As melhores medidas de teste e simulações são realizadas para a potência máxima requerida. O estudo de pesquisa mostra a utilidade do sistema de energia híbrido para um VANT. Finalmente, o artigo também estabelece a eficácia do uso de fontes de energia renováveis para aplicações móveis. Uma célula de combustível regenerativa unicista (URFC) é uma célula única que pode funcionar tanto como célula de combustível como eletrólise. Os URFCs têm economia de massa e volume em comparação com os sistemas de hidrogênio convencionais empregando um sistema de eletrólise e célula de combustível. Por conseguinte, eles têm aplicações potenciais em sistemas de armazenamento de energia elétrica para uma ampla gama de aplicações terrestres e espaciais. Este artigo analisa o estado atual da arte desta promissora tecnologia e identifica os principais desafios técnicos a superar para tornar o sistema URFC mais tecnologicamente e economicamente viável. Todo o estudo é feito usando simulações computacionais e dados experimentais disponíveis. Finalmente, o artigo também estabelece a eficácia do uso de fontes de energia renováveis para aplicações móveis.

Palavras-Chaves: Veículo Aéreo não Tripulado, Células de Hidrogênio, Aviões Elétricos, Painéis Fotovoltaicos, Simulações Computacionais.

1 INTRODUÇÃO

Diante das recentes crises do petróleo e da crescente preocupação com a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, as indústrias têm dado grande enfoque na geração de energias renováveis. Acompanhando este viés ambiental e econômico, o setor aeroespacial vem investindo massivamente na criação de aeronaves que sejam mais eficientes e que poluam menos.

Dentre as principais pesquisas, estão aquelas focadas na geração de energia através do hidrogênio. Empresas do ramo já apresentam em seu portfólio, aeronaves conceito que voam através desse sistema de propulsão, como HY4 e o não tripulado, Phantom Eye. Com estes sistemas, a taxa de emissão é reduzida a zero, ao passo que na combustão do hidrogênio, é gerado energia e vapor de água, e não o dióxido de carbono, presente na queima de combustíveis fósseis.

Entretanto, este tipo de aeronave possui o problema de precisar ser reabastecida com o gás hidrogênio, o que limita seu limite de voo e diminui sua aplicabilidade em grandes rotas. Pensando neste desafio, pretende-se desenvolver uma aeronave movida a hidrogênio, mas que ao mesmo tempo, seja abastecida enquanto está cruzeiro ou em solo.

O princípio de funcionamento do motor a hidrogênio não será alterado nesse projeto. O que se pretende realizar de inovador é instalar painéis fotovoltaicos na superfície da aeronave, e gerar eletricidade. Com essa energia elétrica, foi realizada a eletrólise da água, localizada em pequenos tanques. Através dessa eletrólise, terá a produção de hidrogênio, que por sua vez irá abastecer o avião.

Em paralelo, foi desenvolvido também um sistema que faça a hélice gerar energia à medida que a aeronave esteja em curso de descida ou em desaceleração. Com isso, tem-se em vista adquirir outra fonte alternativa que irá ajudar no abastecimento de energia para a eletrólise da água.

2 OBJETIVOS E METAS

O objetivo geral do presente projeto foi de realizar o estudo da viabilidade de se construir uma aeronave com o sistema de propulsão movido a hidrogênio e que possua células fotovoltaicas no seu exterior para gerar parte do H₂ através da eletrolise da água.

Os objetivos específicos relacionados à pesquisa são:

- 1) Selecionar qual modelo de aeronave que será mais adequado para a realização do projeto.
- 2) Estudar detalhadamente o processo de funcionamento e requisitos mecânicos de um sistema de propulsão movido a hidrogênio.
- 3) Investigar a capacidade produtiva de geração de hidrogênio através da eletrólise da água e verificar o quanto da demanda deste combustível consegue-se suprir.
- 4) Analisar a produtividade de geração de energia elétrica através dos painéis solares e verificar se conseguem suprir a demanda energética da eletrólise.

5) Projetar a disposição dos painéis solares no exterior da aeronave, de modo que se atinja a maior eficiência de captação e o menor acréscimo de carga sobre as estruturas já existentes.

6) Projetar um sistema em que a hélice gere energia para as baterias quando a aeronave estiver em curso de descida ou desacelerando em voo.

7) Realizar o projeto elétrico para que os sistemas de geração e combustão de Hidrogênio sejam instalados de forma que o funcionamento da hélice seja confiável e eficaz.

A poluição atmosférica e o aquecimento global vêm alavancando a busca por combustíveis limpos e renováveis. Neste sentido, pesquisas vêm sendo desenvolvidas utilizando o hidrogênio gasoso como combustível, já que sua combustão libera mais energia/massa que qualquer outro combustível, produzindo água como subproduto. Este projeto tem como objetivo realizar o estudo da viabilidade de se utilizar aeronave com o sistema de propulsão elétrica com zero de emissão de poluentes. O veículo aéreo não tripulado (VANT) do projeto tem como fonte de energia uma bateria que é alimentada principalmente por células de combustível de hidrogênio, mas também recebe energia dos painéis fotovoltaicos posicionados nas asas e fuselagens da aeronave e do motor elétrico do avião quando este funciona como gerador de energia quando a aeronave esta, por exemplo, em decida ou desacelerando. Essa energia gerada também é usada na geração e armazenamento de gás hidrogênio pela eletrolise da água dentro da aeronave. Como metodologia, pretende-se projetar, simular computacionalmente, otimizar sua estrutura e sistema de propulsão, construir e testar um drone com estas características. Uma vez construído fisicamente o VANT, este será instrumentalizado com aparelhos de medições remotas de desempenho elétrico, energético e estrutural. Espera-se medir dentre outras grandezas o consumo de hidrogênio, emissão de vapor de água, a potência do motor elétrico, a quantidade de energia captada pelos painéis fotovoltaicos, a corrente e tensão na bateria, energia gerada na descida e na desaceleração pela hélice, a quantidade de hidrogênio gerado por eletrólise e as forças e tensões suportadas pela aeronave em voo. Foram realizados vários experimentos com capturas das medições do veículo executando voos. Acredita-se que os resultados desse projeto inédito servirão de base e subsidio para futuros projetos de grandes aviões elétricos comerciais tripulados desenvolvidos.

3 METODOLOGIA



Figura 1: Metodologia usada na pesquisa.

4 SISTEMA DE ENERGIA DA AERONAVE

O sistema proposto segue o princípio do diagrama apresentado abaixo.

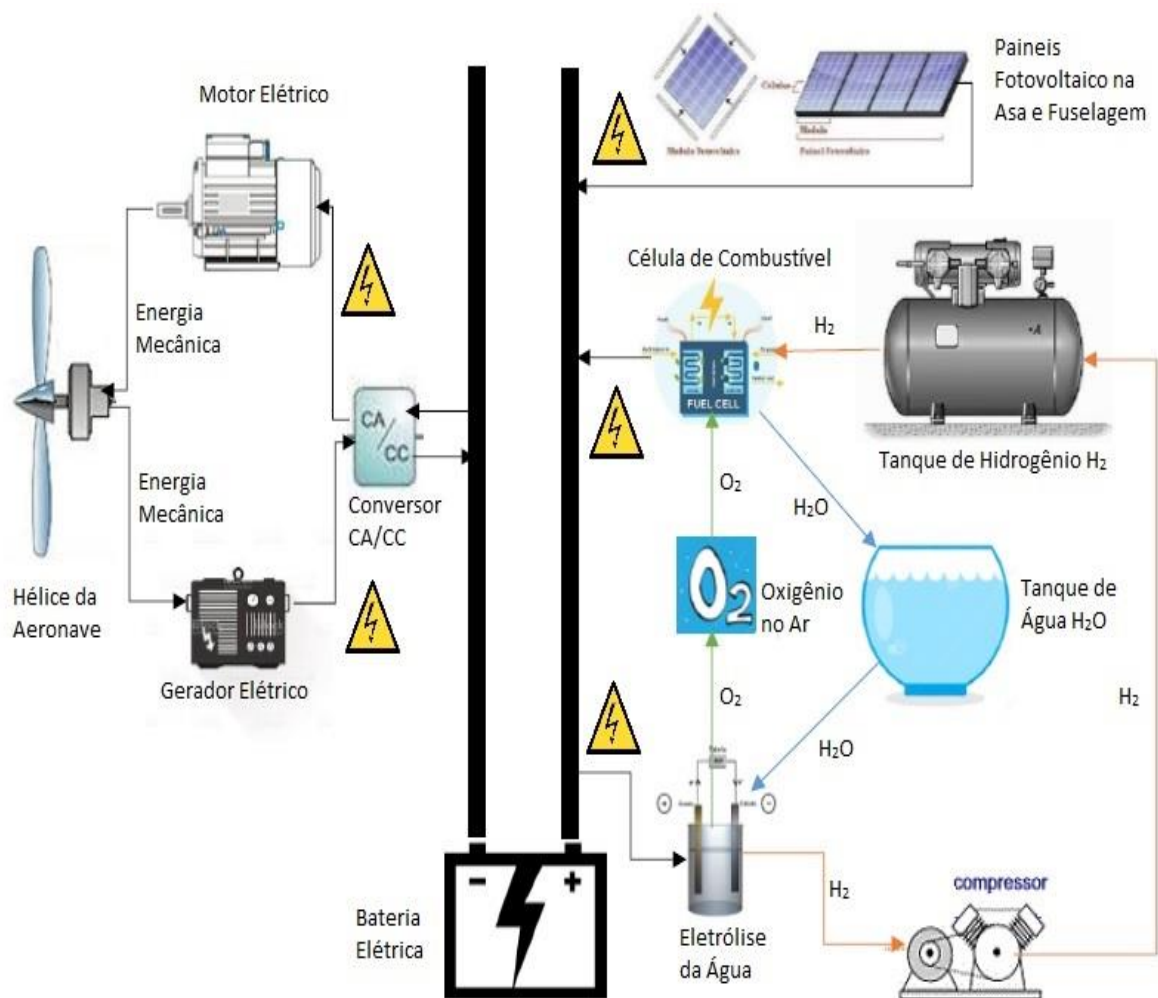


Figura 2: Diagrama proposto do projeto da aeronave.

No diagrama, as setas pretas indicam o fluxo e sentido da energia, as setas azuis indicam o fluxo e sentido da água, as setas verdes indicam o fluxo e sentido do gás oxigênio e as setas laranjas indicam o fluxo e o sentido do gás hidrogênio. A bateria elétrica é alimentada principalmente pela célula de combustível de hidrogênio, mas ainda recebe energia dos painéis fotovoltaicos posicionados nas asas e fuselagens da aeronave e do motor elétrico do avião quando este funciona como gerador de energia quanto a aeronave esta, por exemplo, em decida ou desacelerando.

O principal consumo de energia é para alimentar o motor elétrico que move as hélices da aeronave. Estando a bateria elétrica em plena carga e ainda sobrando energia, esta é utilizada no sistema de eletrolise da água para gerar gás hidrogênio e no compressor para armazenar o H_2 no tanque de hidrogênio da aeronave.

O motor elétrico transforma a energia elétrica em energia mecânica para a hélice da aeronave. Mas este motor elétrico pode virar um gerador de energia elétrica quando o avião está descendo ou desacelerando. No diagrama simplificado este único aparelho é mostrado como dois dispositivos, o motor elétrico e o gerador elétrico, isso é feito para indicar que está previsto um sistema inteligente que altera os parâmetros de funcionamento do motor elétrico para que este passe a funcionar de maneira eficiente como gerador. O motor elétrico se comunica com a bateria elétrica por meio de conversor de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC).

A aeronave utiliza o gás oxigênio presente no ar, não sendo necessário um tanque de oxigênio específico. O grande tanque de combustível do avião é o tanque de hidrogênio que alimenta a célula de combustível. Existe também um tanque água que é usado no sistema de eletrólise para gerar gás hidrogênio e aproveitar a energia que sobra quando a bateria está completamente carregada. Este gás hidrogênio gerado na eletrólise da água é usado para encher o tanque de hidrogênio. O tanque de água pode receber tanto água gerada pela célula de combustível quanto de outras fontes externas como, por exemplo, da chuva no exterior do avião. Toda água deve ser filtrada antes de entrar no tanque para eliminar impurezas.

Assim em teoria, se a aeronave ficar parada no sol, no vento e na chuva, ela carrega tanto o tanque de água como o tanque de hidrogênio usando a energia solar dos painéis fotovoltaicos. Mas a ideia principal da aeronave é sempre ser reabastecida externamente de combustível de gás de hidrogênio. O objetivo é ter um avião ecológico ou “verde” com zero de emissão de poluentes no ar. E o gás hidrogênio pode ser produzido externamente por fontes renováveis de energia com a solar e a eólica. Este é um grande ponto de inovação do projeto de pesquisa, pois a aeronave já faz isso internamente com os painéis fotovoltaicos (solar) e com a reversão motor/gerador elétrico da hélice (eólica). Ou seja, o vento na hélice também poderia a princípio, gerar energia e alimentar o tanque de hidrogênio. Isso torna o projeto bem inovador e inédito.

5 AERONAVE PROJETADA

A figura 3 abaixo mostra o projeto da aeronave, que é revestida de painéis fotovoltaicos que capta energia solar e transforma em energia elétrica na Figura 4. A aeronave tem uma massa estrutural de 6,5 kg, com peso máximo de decolagem 130N, envergadura da asa de 2,95m e um comprimento de 1,95m. A aeronave é feita basicamente de madeira tipo balsa e alumínio.

A estratégia experimental é construir realmente uma aeronave não tripulada movida por um motor elétrico alimentado por células de combustíveis de hidrogênio e painéis solares fotovoltaicos com zero de emissão de poluentes. Uma vez construída fisicamente o avião, este será colocado em teste operacional de voo. A aeronave será então instrumentalizada com aparelhos de medições remotas de desempenho energético e estrutural. E será feita medições do desempenho da aeronave em voo reais. A equipe tem uma vasta experiência em competições SAE BRASIL, AeroDesign e de veículos aéreos não tripulados. Espera-se medir dentre outras grandezas o consumo de hidrogênio, emissão de vapor de água, a potência do motor elétrico, a quantidade de energia captada pelos painéis solares fotovoltaicos, a corrente e tensão na bateria ao longo do tempo, energia gerada na descida e na desaceleração pela hélice e as forças e tensões suportadas pela aeronave em voo. Serão realizados vários experimentos com captura

de medições da aeronave efetuando pequenos voos com duração de alguns minutos e de curtas distâncias com decolagens e aterrissagens. Destaca-se ainda que antes da construção física do veículo aéreo não tripulado, o projeto será todo simulado em computadores usando o método dos elementos finitos (simulação estrutural-mecânica, fluídoaerodinâmica, eletroeletrônica e termoquímica) e será usado algoritmos de otimização estrutural, elétrica e energética, para se obter uma aeronave com estrutura mais leve possível e com a maior eficiência e eficácia no sistema de propulsão. Com base nos resultados deste projeto, pode-se extrapolar e partir para o projeto de uma aeronave elétrica maior, tripulada sem emissão de poluente movida à hidrogênio e painéis fotovoltaicos.

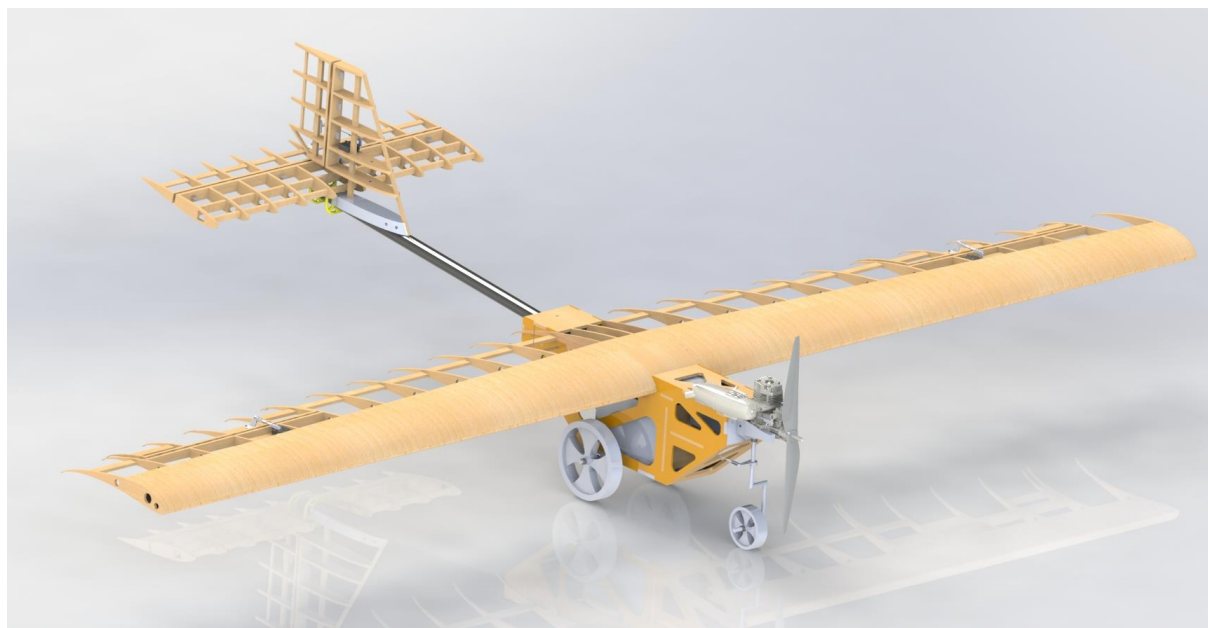


Figura 3: Projeto conceitual da aeronave não tripulada.



Figura 4 : Painéis fotovoltaicos que reveste a aeronave.

Quanto maior a quantidade de energia liberada por um combustível pela mesma massa, mais eficiente ele é considerado, pois oferece mais energia para ser convertida em energia mecânica, no caso de aeronaves, para sua locomoção e funcionamento da parte elétrica. O calor liberado pela combustão do hidrogênio por unidade de massa é maior que o de qualquer outro

combustível ($141,9 \text{ kJ g}^{-1}$), ou seja, uma aeronave movida a hidrogênio tem uma maior potência do que as aeronaves movidas a combustíveis fósseis. Hoje, estão em andamento diversas pesquisas sobre a produção de hidrogênio (principalmente por meio biológico) e várias abordagens têm sido propostas para se maximizar a produção de hidrogênio, possibilitando o uso deste como um combustível renovável alternativo. [12]

Quadro 1: Comparação do calor liberado durante a combustão de diversos combustíveis

Combustível	Calor liberado* (kJ g^{-1})
Hidrogênio	141,9
Metano	55,5
Propano	50,4
Gasolina	40,5
Diesel	44,8
Metanol	20,0

*Indica o máximo de calor que pode ser liberado por um determinado combustível

6 CONCLUSÃO

Os resultados das simulações computacionais mostraram a viabilidade técnicas da aeronave. Com um tempo de voo da ordem de 30 minutos e uma autonomia de pelo menos 15 Km. O uso dos painéis fotovoltaicos melhoram o desempenho energético da aeronave em 30% e o reaproveitamento da energia da hélice na descida e na desaceleração proporcionou um ganho de 4%.

O projeto citado é importante para abranger o conhecimento e avançar em pesquisas relacionadas a energias sustentáveis e/ou não poluentes, assim impactando diretamente no meio ambiente por não dispensar detritos poluentes no ar. Com o avanço do projeto, o uso de hidrogênio juntamente ao oxigênio fazendo combustão em motores híbridos substituindo as energias fósseis, trarão benefícios ambientais e econômicos, pois como é de conhecimento, os combustíveis fósseis são altamente tóxicos e de grande taxa de poluição sendo também de alto custo. Já os recursos naturais utilizados, são zero poluentes e de baixo custo, pois os mesmos serão provenientes de células de água. Acredita-se que os resultados desse projeto inédito servirão de base e subsídio para futuros projetos de grandes aviões elétricos comerciais

tripulados. O projeto continua em andamento na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais –PUCMINAS em Belo Horizonte.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] GADALLA, Mohamed; ZAFAR, Sayem. Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV. *International Journal of Hydrogen Energy*, [S.L], v. 41, n. 15, p. 6422-6432, abr. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.129>>. Acesso em: 12 abr. 2017.
- [2] SCIENCE DIRECT. Pem unitised reversible/regenerative hydrogen fuel cell systems: state of the art and technical challenges. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.112>>. Acesso em: 04 abr. 2017.
- [3] ZHU, Xiongfeng; , Zheng Guo.Zhongxi Hou.. Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Elsevier*, [S.L], v. 71, p. 36-53, nov. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.06.003>>. Acesso em: 18 abr. 2017.
- [4] IEA, Key World Energy Statics, 2012.
- [5] NAULT, R. Basic Research Needs for Solar Energy Utilization, Argonne National Laboratory, 2005.
- [6] EPIA, Unlocking the sunbelt potential photovoltaics, no. March, 2010.
- [7] THE FREEDOMCAR AND FUEL PARTNERSHIP, Hydrogen Production - Overview of Technology Options, 2009.
- [8] BARKER, T. Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, no. November, pp. 12–17, 2007.

- [9] IEA, Redrawing the Energy Climate Map, World Energy Outlook Special Report, 2012
- [10] IPCC, Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- [11] IPCC, Renewable energy sources and climate change mitigation - special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, vol. 49, no. 11. 2012.
- [12] MASSON, G., LATOUR, M. e BIANCARDI, D. Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2016, European Photovoltaic Industry Association, no. Maio, 2012.
- [13] EPIA, Solar Photovoltaics Competing in the energy sector - On the road to competitiveness, 2011.
- [14] EPIA, Connecting the Sun - Solar photovoltaics on the road for large-scale, no. Setembro, 2012.
- [15] EPIA, Solar generation 6 - Solar photovoltaic electricity empowering the world, Retrieved February, 2011.
- [16] CRABTREE, G. e DRESSELHAUS, M. The hydrogen fuel alternative, Mrs Bulletin, vol. 33, no. Abril, pp. 421–429, 2008.
- [17] HYWAYS, The European Hydrogen Energy Roadmap, 2010.
- [18] DRESSELHAUS, M, Basic Research Needs for the Hydrogen Economy - REPORTS OF THE PANELS ON BASIC RESEARCH NEEDS FOR THE HYDROGEN ECONOMY Fuel Cells, vol. 21, no. 50, 2004
- [19] BOCKRIS, J. O'.M. Energy: The Solar Hydrogen Alternative, 1975.

- [20] ANDREWS, J. e SHABANI, B. Re-envisioning the role of hydrogen in a sustainable energy economy, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1184– 1203, Jan. 2008.
- [21] DRESSELHAUS, M, Basic Research Needs for the Hydrogen Economy, *Fuel Cells*, vol. 21, no. 50, 2004.
- [22] MCDOWALL, W. e EAMES, M. Towards a sustainable hydrogen economy - A multi-criteria sustainability appraisal of competing hydrogen futures, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 18, pp. 4611–4626, Dez. 2007.
- [20] MERGEL, J.; CARMO, M. e FRITZ, D. Status on Technologies for Hydrogen Production by Water Electrolysis, *Transition to Renewable Energy Systems*, Eds. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [21] FLYNN, R.; RICCI, M. e BELLABY, P. Deliberation over new hydrogen energy technologies - evidence from two Citizens' Panels in the UK, *Journal of Risk Research*, vol. 16, no. 3–4, pp. 379–391, Abril, 2013.
- [22] SCHAUB, G.; EILERS, H. e GONZÁLEZ, M. I. Chemical Storage of Renewable Electricity via Hydrogen – Principles and Hydrocarbon Fuels as an Example, *Transition to Renewable Energy Systems*, Eds. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.
- [23] PUDLO, D.; GANZER, L.; HENKEL, S.; LIEBSCHER, A.; KÜHN, M.; DE LUCIA, M. PANFILOV, M.; PILZ, P.; REITENBACH, V.; ALBRECHT, D.; WÜRDEMAN, H. e GAUPP, R. Hydrogen underground storage in siliciclastic reservoirs - intention and topics of the H2STORE project, *EGU General Assembly*. EGU General Assembly, Vienna, 2013.
- [24] IEA, *Technology Roadmap - Carbon capture and storage*, 2013.
- [25] DOE, *The Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program Plan - An Integrated Strategic Plan for the Research, Development, and Demonstration of Hydrogen and Fuel Cell Technologies*, 2011.
- [26] IEA, *Hydrogen Production and Storage - R&D Priorities and Gaps*, 2006.

- [27] SANTORO, T. Estudo tecnológico de células a combustível experimentais a membrana polimérica trocadora de prótons, 2004.
- [28] LINARDI, M. Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível. São Paulo: Artliber, 2010.
- [29] PIOVANI, J. T. Dimensionamento de um umidificador para células a combustível em aplicações móveis, Universidade Federal Do ABC, 2011.
- [30] PEREIRA, B. do V. Desenvolvimento de um sistema de controlo de pilha de combustível, 2008.
- [31] KORDESCH, K.; HACKER, V.; REICHMANN, K.; CIFRAIN, M.; HEJZE, T. e ARONSSON, R. R. The Safe and Economic Revival of Alkaline Hydrogen/Air Fuel Cells with Circulating Electrolytes - Recommended for Vehicles Using Battery Hybrid Systems and H₂ from Ammonia Crackers, ECS Transactions, vol. 11, pp. 167–185, 2008.
- [32] NI, M.; LEUNG, M. K. H. e LEUNG, D. Y. C. Technological development and prospect of alkaline fuel cells, no. Jun, pp. 1–7, 2006.
- [33] SOBOTKA, K. A wind-power fuel cell hybrid system study - Model of energy conversion for wind energy system with hydrogen storage, 2009.
- [34] IVY, J. Summary of electrolytic hydrogen production - milestone completion report, no. Setembro, 2004.
- [35] LARMINIE, J.; DICKS, A. e MCDONALD, M. Fuel cell systems explained, 2003
- [36] SALIBA-SILVA, A.; CARVALHO, F. M. S.; BERGAMASCHI, V. S. e LINARDI, M.
Water Electrolysis for Hydrogen Production in Brazilian Perspective, THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE, pp. 1–6, 2009.
- [37] ZOULIAS, E. e VARKARAKI, E. A review on water electrolysis, TCJST, 2004.

[38] BERNARDI, P. J. Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando à geração de energia elétrica distribuída, INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, São Paulo, 2009.

[39] KROPOSKI, B.; SEN, P.; HARRISON, K.; LEVENE, J. e NOVACHEK, F. Electrolysis, Information and Opportunities for Electric Power Utilities, 2006.