



Grupo de Estudo de Geração Eólica, Solar e Armazenamento-GES

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA PLANTA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO COM ELETROLISADOR ALCALINO DE ÁGUA INSTALADO NO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU

RICARDO JOSÉ FERRACIN(1); VICTOR A. RIVAROLA BALBUENA(1); MARCELO MIGUEL(2); ANGEL AMBROCIO QUISPE(1); CARINA BONAVIGO JAKUBIU(1); ISNEL UBAQUE DIAZ(1); FPTI(1);IB(2);

RESUMO

O objetivo desse trabalho é avaliar o potencial de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável por regiões do Brasil, cujos dados são disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema, e dados de eficiência elétrica de célula de combustível e de eletrolisador alcalino, ambos instalados no Parque Tecnológico Itaipu. De acordo com esses resultados, a eficiência global obtida foi de 32,1%. Considerando-se a energia vertida turbinável por regiões do Brasil, a produção de hidrogênio estimada é da ordem de 10^9 Nm³ por ano. Desse modo, o Brasil apresenta condições técnicas para implementar com sucesso uma Economia baseada no Hidrogênio.

PALAVRAS-CHAVE

Hidrogênio, energia vertida turbinável, eletrólise alcalina, célula a combustível, aproveitamento.

1.0 - INTRODUÇÃO

O uso intensivo de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) tem causado impactos ambientais consideráveis, como, por exemplo, o aumento do efeito estufa e, conseqüentemente, alterações no clima. Além disso, as reservas de combustíveis fósseis são limitadas impondo um novo desafio em termos energéticos, que se traduz por uma transição para fontes de energia renováveis e menos poluentes. Neste cenário o hidrogênio (H₂) representa uma alternativa promissória na busca da diversificação da matriz energética brasileira, tornando ela predominantemente renovável, tanto por sua disponibilidade como por seu conteúdo energético e capacidade para diminuir emissões [CITATION Sil17 \l 1046].

O H₂ é o elemento mais simples e abundante do universo e possui a maior quantidade de energia por unidade de massa que qualquer outro combustível conhecido (120,7 kJ/g), porém, não se encontra disponível na sua forma pura, necessitando de uma fonte de energia para ser extraído dos compostos químicos aos quais está associado na natureza (água, metano e materiais orgânicos), sendo assim, o H₂ é um vetor energético, ou seja, não constitui uma forma primária de energia. As tecnologias de produção de H₂ necessitam de energia na forma de eletricidade, luz ou calor, para que o processo se inicie. A escolha do método de produção depende da quantidade e grau de pureza requeridos.

Atualmente o H₂ é produzido principalmente a partir de fontes fósseis em processos termoquímicos como a reforma a vapor do gás natural e do metano, oxidação parcial e gaseificação do carvão; nos Estados Unidos por exemplo 95% da produção anual de H₂ é feita por reforma a gás natural em grandes centrais [CITATION OFF19 \l 1046]. Em uma menor escala o H₂ é produzido por eletrólise da água utilizando energia elétrica proveniente de

fontes renováveis (hidráulica, eólica e solar fotovoltaica). A eletrólise consiste na quebra da molécula da água em dois gases, hidrogênio e oxigênio, ao ser passada uma corrente elétrica no sistema.

O Brasil e o Paraguai são países com matrizes energéticas predominantemente hidráulicas, segundo dados do Operador Nacional do Sistema (ONS) só no Brasil a geração hidrelétrica representa 67,5% da capacidade instalada [CITATION Ope19 \l 1046]. Junto às usinas hidrelétricas pode existir um excedente de energia quando a usina ainda apresentar capacidade de turbinamento mas a demanda já tiver sido atendida, diz-se que ocorreu um vertimento turbinável. Dado este panorama, este informe direciona o estudo da produção do H₂ a partir da eletrólise da água, considerando a utilização da energia vertida turbinável (EVT) ou excedente, pois aumenta a perspectiva de se obter H₂ viável economicamente, por um sistema limpo e onde o gás produzido é de elevada pureza.

O gás hidrogênio produzido pode ser armazenado em cilindros de alta pressão para posterior uso. As principais aplicações do H₂ encontram-se na indústria química e petroquímica; porém, recentemente, existe um maior interesse em aplicações energéticas tais como geração de eletricidade a partir de células a combustível, motores de combustão interna ou turbinas a gás, estações de abastecimento veicular, alimentação de sistemas de distribuição de gás natural, e produção de combustíveis sintéticos como metano [CITATION Gah13 \l 1046]. O uso de H₂ em células a combustível para geração de eletricidade tanto em aplicações estacionárias quanto veiculares, apresenta a vantagem de ser um processo eficiente e sustentável uma vez que os únicos subprodutos obtidos são eletricidade água e calor, evitando assim emissões de CO₂.

O aproveitamento do H₂ como sistema de armazenamento energético pode aumentar o fator de capacidade das usinas, fomentar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação, assim como o desenvolvimento regional com a criação de novas unidades de negócio, contribuindo para a segurança energética, a universalização da energia em comunidades isoladas, além de viabilizar a introdução na matriz energética de um combustível totalmente descarbonizado para o desenvolvimento sustentável.

Com base na experiência e conhecimentos adquiridos, a Planta de Produção de Hidrogênio – PPH, instalada no Parque Tecnológico de Itaipu – PTI, é uma unidade de demonstração dessa tecnologia de armazenamento de energia e sua utilização no setor elétrico, visando promover a sua utilização futura em várias concessionárias de energia do setor elétrico e também em outras áreas produtivas.

Neste informe é proposta uma discussão metodológica do potencial de produção de hidrogênio por eletrólise, aproveitando a EVT das principais usinas hidrelétricas brasileiras conforme dados disponibilizados pelo ONS agrupados por regiões. e tomando como referência os dados obtidos na PPH referentes à eficiência dos processos de produção de hidrogênio em eletrolisador alcalino e a reconversão em energia elétrica em uma célula a combustível de membrana polimérica (PEM). Deste modo o trabalho está dividido em quatro seções: na seção 2 é apresentado o delineamento metodológico e os dados usados, na seção 3 são apresentados os resultados e por fim na seção 4 são apresentadas as conclusões, seguidas pelas referências bibliográficas consultadas.

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

A planta de produção de hidrogênio instalada no PTI, consiste num eletrolisador alcalino e uma célula a combustível tipo *Proton Exchange Membrane* (PEM). A capacidade de produção do eletrolisador é de 10 Nm³/h para um armazenamento de 2,3 m³ a 350 bar e a potência de geração da célula a combustível é de 6 kW.

Os dados de eficiência do eletrolisador foram tomados do trabalho “*Evaluation and calculation of the Energy Efficiency of the alkaline water electrolyser installed at Hydrogen Production Plant in Itaipu Technological Park*”, o qual consistiu em testes experimentais de operação no eletrolisador alcalino obtendo como resultado a eficiência no ponto ótimo de operação de 76,2% em produção a 70% da capacidade nominal [CITATION Fer \l 1046]. A eficiência elétrica da célula a combustível foi determinada no trabalho “*Evaluation and calculation on the Global Energy Efficiency of the Hydrogen Experimental Power Plant installed in Itaipu Technological Park*”, no qual foi realizado a avaliação de desempenho da célula a combustível (CaC), a partir de testes experimentais utilizando resistências como carga durante determinados períodos de tempo e determinação do consumo de hidrogênio a partir de medições de variação de pressão nos cilindros de armazenamento. Assim, para a CaC foi calculada

uma eficiência de 42,1%. De acordo com esses resultados, a eficiência global do sistema é 32,1% [CITATION Fer18 \l 1046].

A partir dos dados de energia vertida turbinável fornecidos pelo ONS, é possível estimar o conteúdo energético do Hidrogênio produzido considerando a eficiência do eletrolisador (η_{Ele}) e a capacidade de produção no ponto ótimo de operação (β) como descrito na equação 1:

$$\text{Conteúdo energético do hidrogênio} \left(\frac{GWh}{ano} \right) = \text{Energia Vertida turbinável} (GWh) * \eta_E \quad (1)$$

onde $\eta_{Ele} = 76,2\%$.

A eficiência do eletrolisador é calculado considerando o poder calorífico superior (PCS) do gás produzido por unidade de volume. Assim, a produção de Hidrogênio em volume é calculada a partir da equação 2:

$$\text{Volume de } H_2 \left(\frac{Nm^3}{ano} \right) = \frac{\text{Conteúdo energético do hidrogênio} \left(\frac{GWh}{ano} \right)}{PCS \left(\frac{GWh}{Nm^3} \right)} \quad (2)$$

onde $PCS = 3,54 \cdot 10^{-6} \frac{GWh}{kg}$.

Com o hidrogênio produzido, é possível estimar a geração de energia elétrica que poderia ser retornada à rede a partir da utilização de células a combustível. Para isto, considera-se a eficiência da célula a combustível (η_{CaC}), apresentada na equação (3):

$$\text{Energia elétrica produzida} \left(\frac{GWh}{ano} \right) = \text{Energia Vertida turbinável} (GWh) * \eta_{Ele} * \beta * \eta_C \quad (3)$$

onde $\eta_{CaC} = 42,1\%$.

3.0 - RESULTADOS

Na Tabela 1 Tabela 1. Histórico da energia vertida turbinável no período de 2009 até 2013 (ONS).é apresentado o histórico resumido da ONS referente à energia vertida turbinável no período de 2009 a 2013 nas regiões do Brasil.

Tabela 1. Histórico da energia vertida turbinável no período de 2009 até 2013 (ONS).

Regiões (GWh)	2009	2010	2011	2012	2013
Sudeste/Centro Oeste	1376,00	2074,94	16606,82	4774,30	54662,40
Sul	60,00	5964,55	2605,47	411,40	13087,40
Nordeste	48,00	-	1,60	206,80	1436,60
Norte	1876,00	1517,16	1336,64	1121,00	7016,80
TOTAL	5369,00	11566,65	22561,52	8525,50	78216,20

Fonte: [CITATION Ope18 \l 1046]

Os valores da Tabela 1, estão apresentados na Figura 1, que é a representação da disponibilidade energética para produção de hidrogênio a partir da eletrolise alcalina. É visualizado que as regiões com maior potencial para a produção de hidrogênio são a Sudeste e Centro Oeste, de acordo com a sua energia vertida turbinável.

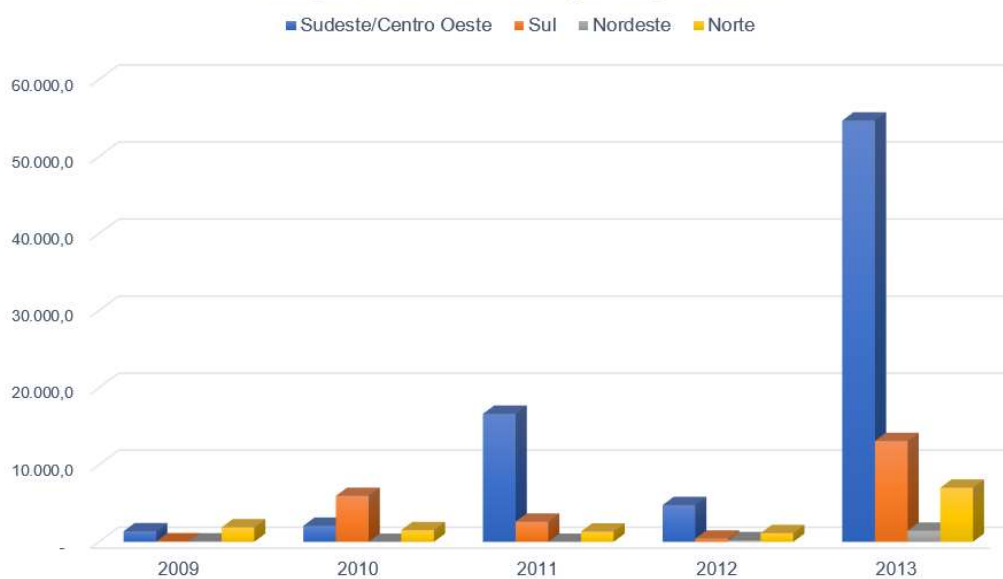


Figura 1: Energia vertida turbinável por regiões (GWh).

O potencial de produção de hidrogênio, em termos de volume, foi obtido utilizando a equação 2 e os resultados são apresentados na Figura 2. Esses resultados demonstram o potencial para produção a partir dados é da ordem de grandeza de 10^9 Nm^3 por ano.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

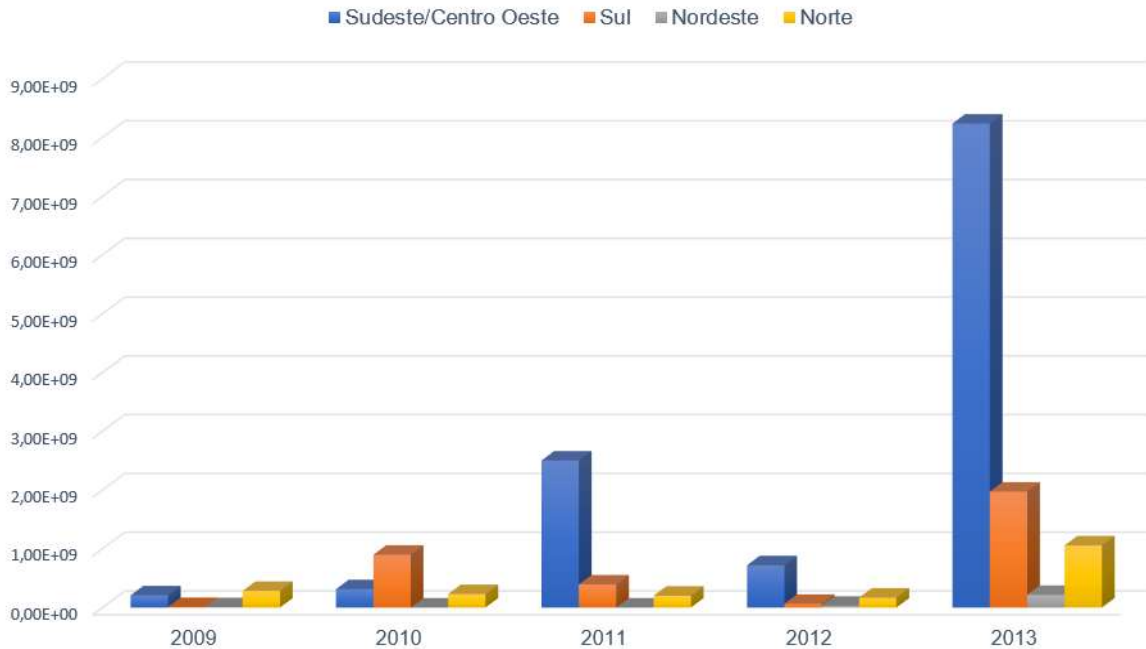


Figura 2: Produção de hidrogênio pela energia vertida turbinável por região (Nm³).

Na Figura 3, considerando uma célula a combustível similar à instalada no PTI, a quantidade de energia elétrica que poderia ter sido produzida e retornada à rede é de 5.000 GWh media por ano, respectivamente.

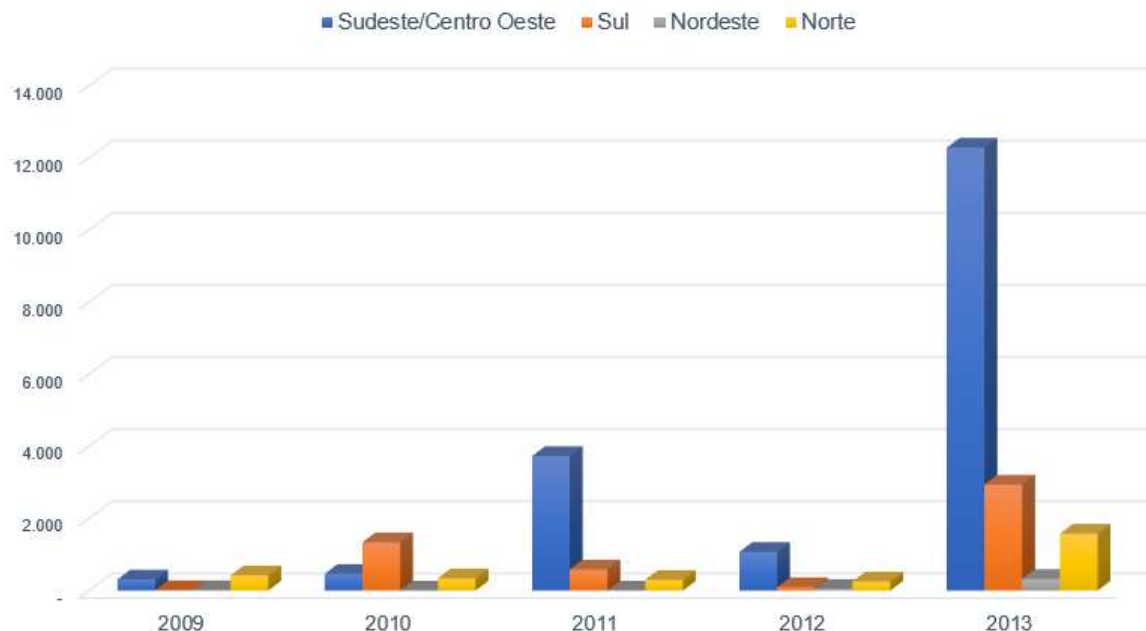


Figura 3: Retorno em energia elétrica a partir da energia vertida turbinável (GWh).

Na Figura 4 é apresentado o potencial de abastecimento segundo os dados apresentados pela empresa Hydrogenics no WHEC 2018.

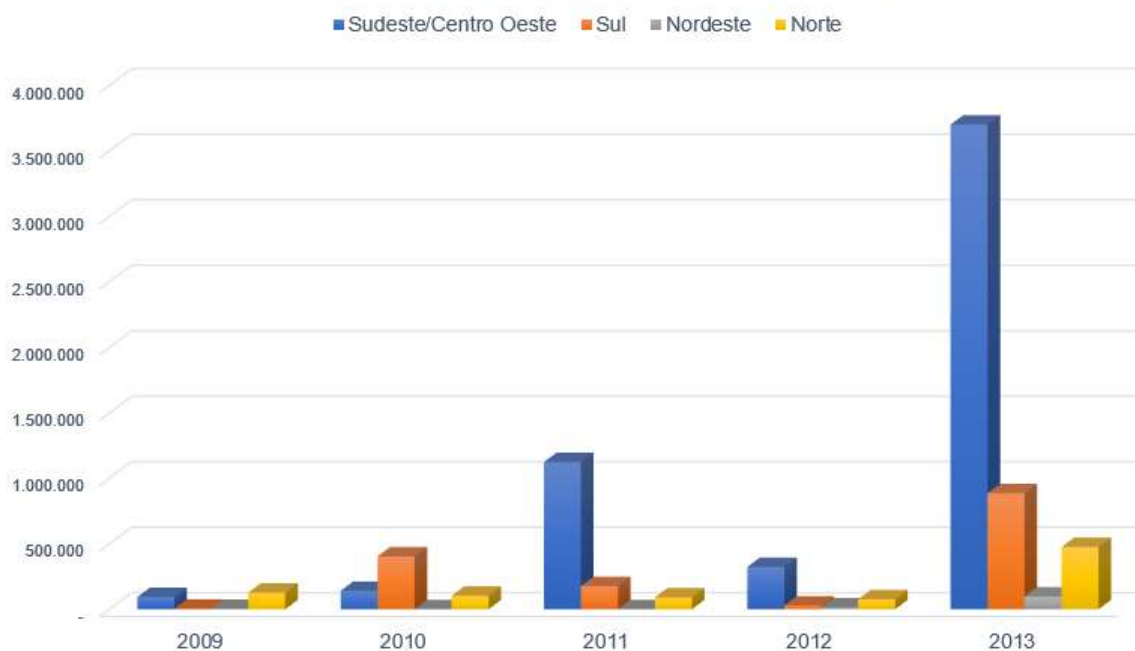


Figura 4. Potencial aproximado de frota de carros abastecidos por ano.

4.0 - CONCLUSÃO

O estudo da eficiência do eletrolisador alcalino instalado no PTI permitiu determinar que o ponto ótimo de operação do mesmo é 70% da capacidade nominal, no qual o consumo energético é menor. Operações com maiores capacidades nominais implicam em um aumento da corrente e tensão elétrica aplicada no eletrolisador alcalino, o qual favorece a cinética das reações e diminui o tempo de pressurização e, conseqüentemente, a taxa de produção de hidrogênio aumenta. Entretanto, o aumento da demanda de energia específica para manter a produção é significativo e torna o balanço desfavorável acima desse ponto ótimo. O incremento da potência de operação provoca excesso na geração de calor, ativando um alarme no sistema quando certa temperatura é atingida e assim, a potência é reduzida por instantes de tempo, o que leva à operação a um maior consumo de energia para a mesma massa produzida a menores potências.

Os valores de eficiência nos processos de conversão energética, tanto no eletrolisador alcalino como na célula a combustível tipo PEM, estão próximos aos observados em equipamentos comerciais e projetos do mesmo tipo. A pureza do H₂ produzido é de 99,997%, que é adequada para o consumo direto em células a combustível de tipo PEM. Finalmente, a introdução do H₂ como forma de armazenamento e posterior uso em células a combustível representa uma alternativa viável no aspecto técnico e ambiental, aumentando o fator de capacidade de uma usina hidrelétrica e sua eficiência, contribuindo para a introdução de um vetor limpo na matriz energética e possibilitando a criação de novas unidades de negócio para empresas do setor elétrico nacional.

Por fim, como pode ser observado pelos cálculos realizados com os dados de Energia Vertida Turbinável, disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) até o ano de 2013 e por regiões do Brasil, a produção de hidrogênio estimada é da ordem de 10⁹ Nm³ por ano. Desse modo, o Brasil apresenta excelentes condições técnicas para implementar com sucesso uma Economia baseada no Hidrogênio, pois o potencial de utilização do hidrogênio para movimentar uma frota de automóveis é promissora, em torno de 1,6 milhões por ano.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Silveira, José Luz. Green Energy and Technology, Sustainable Hydrogen Production Processes, Energy, Economic and Ecological Issues. Guaratinguetá : Springer, 2017.
- (2) Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. [Online] 2019. [Citado em: 15 de Março de 2019.] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>.
- (3) Operador Nacional do Sistema Eletrico - ONS. Sobre o SIN o Sistema em Números. [Online] 2019. [Citado em: 15 de Março de 2019.] <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- (4) Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. Gahleitner, Gerda. 2013, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 2039-2061.
- (5) Evaluation and calculation of the Energy Efficiency of the alkaline water electrolyser installed at Hydrogen Production Plant in Itaipu Technological Park. Ferracin, Ricardo José, et al., et al. 2018. WHEC.
- (6) Evaluation and calculation on the Global Energy Efficiency of the Hydrogen Experimental Power Plant installed in Itaipu Technological Park. Ferracin, Ricardo José, et al., et al. 2018. WHEC.
- (7) Operador Nacional do Sistema - ONS. Resultados da Operação, Historico da Operação. [Online] 2013. http://ons.org.br/sites/multimedia/Documentos%20Compartilhados/dados/dados_relevantes_2013/HTML/05-04-04-Regiao-Norte.html?expanddiv=05,05sub03.
- (8) Caus, Tuane Regina e Michels, Ademar. Energia Hidrelétrica: Eficiência na Geração. 2014.
- (9) Souza, Zulcy de, Santos, Afonso H. M. e Bortoni, Edson da C. Centrais Hidrelétricas, Estudos Para Implantação. Rio de Janeiro : Eletrobras, 1999.



6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ricardo José Ferracin nascido em Cerqueira César – SP em 1968, possui bacharelado em Química (1989), Mestrado em Química (1992) e Doutorado em Ciências (1996) pela Universidade Federal de São Carlos. Especialização em Gestão de Projetos e Pessoas pela PUC/PR (1999). Atua como Gerente do Projeto de P&D&I - Hidrogênio Itaipu/Eletrobras - da Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI). Também é Professor da Universidade do Oeste do Paraná (UNIOESTE - Campus Foz do Iguaçu) e Professor do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia pela UFPR. Possui experiência na área de Química e Materiais, atuando como gestor e pesquisador em projetos de P&D&I.

Victor Alejandro Rivarola Balbuena nascido em Assunção – Paraguai em 1990 é engenheiro pesquisador no projeto hidrogênio pela Fundação Parque Tecnológico Itaipu (2017-presente), responsável pela operação e manutenção da Planta de Produção de Hidrogênio. Formado no curso de Engenharia de Energias na Universidade Federal de Integração Latino Americana – UNILA (2016-Brasil), atualmente é mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual do Oeste de Paraná – UNIOESTE.

Marcelo Miguel nascido em Cachoeiro de Itapemirim – ES em 1959, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1985) e mestrado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003). Atualmente é engenheiro sênior - Itaipu Binacional. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: projetos elétricos, conservação de energia, pesquisa e desenvolvimento.



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

3615
GES/06

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Angel Ambrocio Quispe nascido em Arequipa – Peru em 1987, é mestrando em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Controle, Automação e Sistemas Industriais, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2017-atual), graduado em Engenharia de Energias na Universidade Federal de Integração Latino-americana - UNILA (conclusão em 2016), Tecnólogo em Electrónica no Instituto Superior Tecnológico Público Andrés Avelino Cáceres Dorregaray (conclusão em 2008). Atual engenheiro pesquisador no projeto hidrogênio pela Fundação Parque Tecnológico Itaipu.

Carina Bonavigo Jakubiu, nascida em Cascavel – PR em 1987, é Responsável pelo laboratório de hidrogênio do Núcleo de Pesquisa de Hidrogênio – NUPHI - PTI, graduada em Tecnologia em Controle de Processos Químicos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR (conclusão em 2009).

Isnel Ubaque Diaz, nascido em Falan – Colômbia em 1991, é Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual do Oeste de Paraná – UNIOESTE e Bolsista do Núcleo de Pesquisa de Hidrogênio – NUPHI - PTI, graduado em Engenharia de Energia pela Universidade Federal da Integração Latino americana - UNILA (conclusão em 2017).