



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GET/09
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - XIV

**GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA
EDUCAÇÃO – GET**

A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO NA USINA DE ITAIPU

Marcelo Miguel (*)
ITAIPU BINACIONAL

Janine Padilha Botton
UNILA – UNIV. FED. DA
INTEGRAÇÃO LATINOAMERICANA

Ricardo José Ferracin
PTI – FUNDAÇÃO PARQUE

TECNOLÓGICO ITAIPU

Roque Martins Duarte Júnior
UNILA – UNIV. FED. DA INTEGRAÇÃO LATINOAMERICANA

Nelinho Davi Graef
PTI – FUND. PARQUE TECN. ITAIPU

RESUMO

Visando uma maior sustentabilidade no futuro próximo, o planeta necessita de combustíveis que não emitam gases poluentes e causadores do efeito estufa. Das alternativas, existe o hidrogênio que tem sido estudado como um substituinte dos combustíveis fósseis por ter qualidade e quantidade suficiente de energia armazenada. No entanto, apesar de ser o elemento mais abundante no universo, necessita de uma fonte de energia para ser extraído dos compostos químicos aos quais está associado na natureza.

O Paraguai e o Brasil são países com matrizes energéticas predominantemente hidráulicas, com mais de mil usinas hidrelétricas instaladas na região. Como estas usinas não armazenam energia, apenas água, todos os anos se repetem períodos hidrológicos onde o excedente de água nas barragens necessita ser liberado pelos vertedouros. Quantidades significativas destas águas poderiam ser turbinadas para produção de energia elétrica a ser utilizada na produção de hidrogênio, o qual pode ser armazenado em cilindros e/ou utilizado em células a combustível para produção de energia elétrica. O aproveitamento desta energia vertida pode aumentar a eficiência energética das usinas, combatendo o desperdício de água e energia, além de viabilizar a introdução na matriz energética de um combustível totalmente limpo, contribuindo para a segurança energética e para o meio ambiente.

Este trabalho mostra o projeto da planta experimental de produção de hidrogênio da usina de Itaipu, assim como o potencial de produção de hidrogênio que a usina poderá alcançar quando houver demanda de mercado.

PALAVRAS-CHAVE

Produção de hidrogênio, usinas hidrelétricas, eficiência energética, desenvolvimento sustentável.

1.0 - INTRODUÇÃO

Num mercado cada vez mais competitivo, as empresas buscam incessantemente melhorar a eficiência energética. Nas usinas hidrelétricas, existe uma busca contínua para otimizar a produção, a manutenção, a operação e a atualização tecnológica dos sistemas. No aspecto econômico, significa reduzir os custos de operação e/ou

(*) Av. Tancredo Neves, nº 6731 – sala ENEE.DT no 1º andar do Edifício da Produção – CEP 85.866-900
Foz do Iguaçu, PR, – Brasil Tel: (+55 45) 3520-3090 – Fax: (+55 45) 3520-3656 – Email:
marcelom@itaipu.gov.br

umentar a receita com a venda adicional dos ganhos de produção [1]. No aspecto técnico, significa minimizar os desperdícios e perdas técnicas promovendo melhoria na eficiência dos sistemas [2].

A busca não só pela redução das perdas, mas também pelo melhor aproveitamento dos processos produtivos tem sido objeto de grande esforço científico desde que o homem se deu conta que os recursos disponíveis são finitos. Esses também podem cada vez mais se tornarem escassos e impactantes ao meio ambiente, devidas às crescentes necessidades de demandas energéticas da sociedade [3].

Neste contexto, este trabalho busca uma melhora no aproveitamento produtivo das perdas hidroenergéticas em usinas hidrelétricas, com aplicação na usina de Itaipu [4]. No Brasil, foi criado o Programa Nacional de Conservação de Energia – PROCEL em 1985. No Paraguai, foi criada a Comissão Nacional de Eficiência Energética – CNEE em 2011.

No âmbito mundial, a crise do petróleo de 1973/1974 deu origem à geração dos primeiros programas mundiais estruturados na Inglaterra e nos Estados Unidos para melhorar a eficiência energética. Desde então, a preservação deste insumo estratégico da matriz energética mundial se tornou primordial.

Existe uma relação direta entre a energia e o meio ambiente. Atualmente, o desafio da expansão passa pela busca de alternativas energéticas, pois os recursos não renováveis são limitados e estão caminhando para seu esgotamento a nível mundial [5]. Sendo assim, a procura de fontes renováveis caracteriza as atuais prioridades energéticas. Quanto ao meio ambiente, sabemos do grande impacto ambiental causado pela indústria energética mundial, e da emissão de gases de efeito estufa dos combustíveis fósseis, além de uma dependência cada vez maior do homem pela energia elétrica, assim como a preocupação com a sustentabilidade do planeta.

Conforme Rifkin[6], precisamos “repensar” a Terra e a energia precisa ser “descarbonizada”, o que levaria inevitavelmente ao futuro com hidrogênio, o que proporcionaria e democratizaria a energia evitando conflitos entre as nações pela posse das reservas energéticas mundiais.

2.0 - OBJETIVO

Avaliar as oportunidades de produção de hidrogênio na usina de Itaipu, particularmente no contexto do aproveitamento da energia vertida turbinável, contribuindo para a redução de desperdícios hidroenergéticos de centrais hidrelétricas, assim como o seu impacto e sua contribuição para a melhoria da eficiência energética.

3.0 - METODOLOGIA

A eletrólise, que é a quebra da molécula de água, se apresenta atualmente como o processo mais adaptável às usinas hidrelétricas [7], por várias razões:

- Matéria prima: a água, é matéria prima para a produção de hidrogênio por eletrólise, é também a utilizada nas usinas hidrelétricas para a produção de energia;
- Estoque: as usinas hidrelétricas possuem, em sua maioria, reservatórios de acumulação de água. Mesmo as usinas a fio d'água, como Itaipu, possuem uma margem de utilização, mesmo que pequena [8];
- Energia: as usinas hidrelétricas possuem energia que não é aproveitada, chamada de energia vertida turbinável, que poderia ser usada sem prejuízo da geração de energia para o sistema elétrico;
- Logística: no caso de Brasil e Paraguai, temos usinas hidrelétricas espalhadas por todas as regiões, o que torna esta geração distribuída, facilitando a logística de distribuição [9];
- Custo: a utilização de uma energia que seria desperdiçada, ou energia secundária, de menor custo, e os menores custos de distribuição devida à logística privilegiada, reduzem os custos para dar competitividade ao produto;
- Tecnologia: a tecnologia da eletrólise está consolidada pelos fabricantes e em estágio operacional comprovado, o que consolida sua utilização [10];
- Armazenamento: as usinas hidrelétricas possuem vastas áreas que podem ser aproveitadas para alocação dos tanques de armazenamento do hidrogênio.

Com vistas à utilização da energia vertida turbinável (EVT) por uma usina hidrelétrica, a Figura 1 mostra um diagrama sobre a metodologia utilizada nesse trabalho. Esta consiste na obtenção dos dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), da Itaipu Binacional e da Administração Nacional de Energia do Paraguai (Ande), processamento das informações obtidas, posteriormente uma programação de operação que consiste no balanço da produção de hidrogênio com a geração de energia elétrica pela usina do qual se obtém o relatório de programação. Desse relatório é pode-se avaliar a possibilidade de haver energia elétrica turbinável ou não. Caso

haja o excedente de energia, esta pode ser utilizada para a produção de hidrogênio, o que elevaria a capacidade de produção da Usina. Esse ciclo pode ser aplicado constantemente.

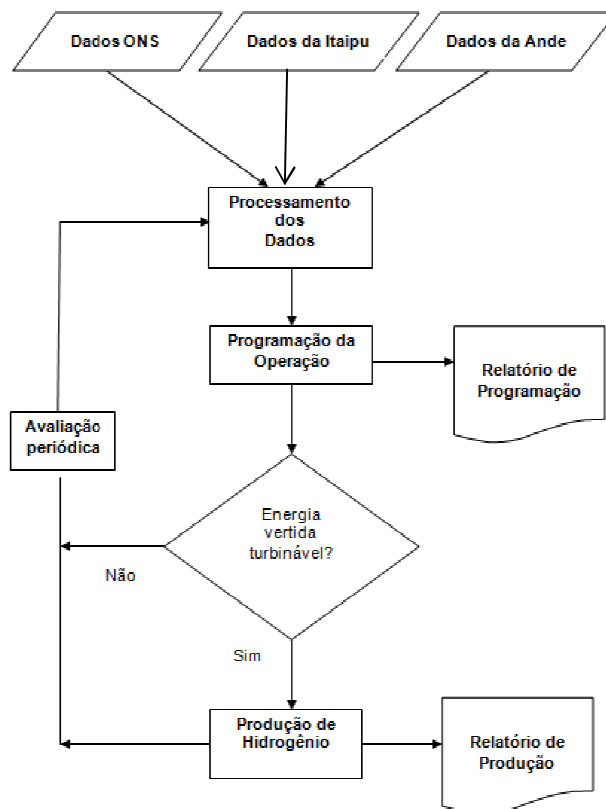


FIGURA 1 – Fluxograma do modelo de produção.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A usina de Itaipu entrou em operação comercial no ano de 1984. A partir deste ano, os mercados brasileiro e paraguaio foram consumindo sua energia de forma crescente, como mostra a Figura 2 abaixo. Analisando esta, pode-se perceber que nos últimos vinte anos, o consumo de energia elétrica passou de 60.000 para 100.000 GWh equivalente a um aumento de 67%. Esse aumento no consumo não acompanhou o crescimento populacional, isso quer dizer que as pessoas estão consumindo mais energia.

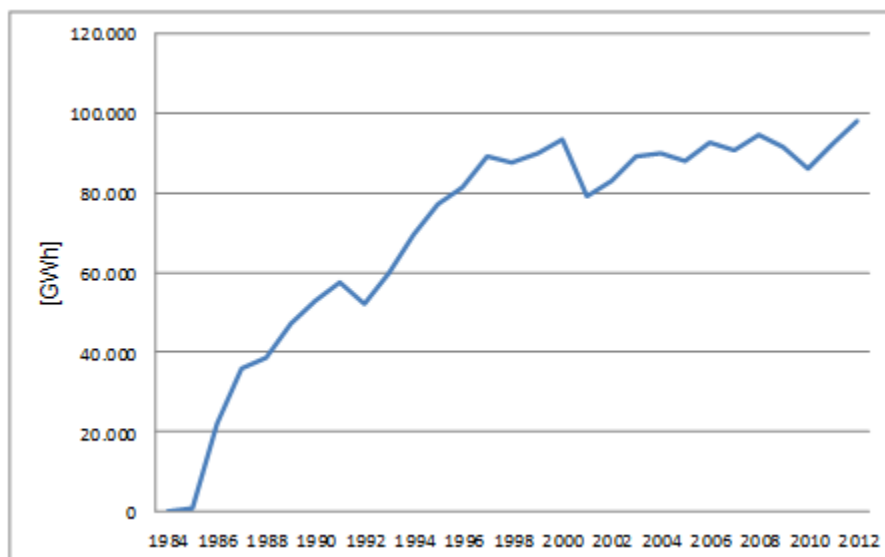


FIGURA 2 –Energia disponível anual. Fonte: OPSP.DT, Itaipu Binacional.

A partir do ano de 2000, a usina de Itaipu passa a operar em regime permanente, sofrendo apenas variações por conta de condições operativas do mercado brasileiro e paraguaio.

Sendo assim e, para uma melhor noção a longo prazo, foram levantados os dados dos últimos 12 anos, conforme Tabela 1, já que nos anos anteriores o mercado ainda não exigia produção em regime permanente como está atualmente, por isso não são considerados como típicos.

Tabela 1 – Totais anuais de energia disponível ou vertida turbinável anual, em GWh

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
968	1.854	5.167	4.113	3.969	5.319	3.637	4.135	2.316	6.426	13.210	1.152	1.156

Fonte: Itaipu IMAT: Informe Mensal da Área Técnica, janeiro 2013.

À semelhança do cálculo de capacidade das usinas hidrelétricas, para este trabalho é calculada pela média histórica do período considerado, neste caso de 1997 a 2009.

Para evitar que esta energia seja desperdiçada, um convênio entre Itaipu Binacional, Parque Tecnológico Itaipu e Eletrobrás vem desenvolvendo pesquisas no sentido de aproveitar esta energia, produzindo hidrogênio. O projeto visa além da produção, a constituição de uma cadeia que disponibilize este hidrogênio ao consumidor final. Nesse sentido, calculou-se primeiramente a energia vertida turbinável (EVT) ao longo dos últimos anos que dá um indicativo do que seria o potencial de produção de hidrogênio. Para isso, fez-se o seguinte cálculo.

$$EVT_M = \sum_{1997}^{2009} \frac{EVT_n}{n} \quad (1)$$

sendo EVT_M a energia turbinável média, EVT_n a energia turbinável no período e n é o período. Conforme a fórmula (1) aplicada na tabela 1:

$$EVT_{Manual} = 4.109 \text{ GWh}$$

$$EVT_{Mmensal} = 342 \text{ GWh}$$

O valor obtido para a EVT_M anual é equivalente a 4,26% da produção total de Itaipu, o que é uma quantidade considerável e que não deve ser desperdiçada.

Segundo Miguel et al. (2013) transformando esta energia vertida turbinável em hidrogênio por meio do processo de eletrólise tem-se um potencial de produção entre 49 milhões e 124 milhões de kg de hidrogênio. Este valor varia de acordo com o consumo de energia elétrica do eletrolisador. Neste estudo, considera-se uma produção média anual de 63 milhões de kg de hidrogênio, a partir de um eletrolisador de desempenho médio e que foi testado em escala industrial.

No sentido de verificar o potencial de produção de hidrogênio, levantou-se o consumo de energia (CE) destes eletrolisadores, dados que são apresentados na tabela 2, que contempla resultados obtidos em diferentes estudos. Cabe destacar que alguns destes dados não apontam a marca e modelo, mas foram considerados a título de comparação.

Tabela 2 – Consumo de energia elétrica por eletrolisadores (kWh) durante a produção de hidrogênio

Origem da descrição do eletrolisador analisado	kWh.kg ⁻¹	kWh.Nm ⁻³
Omer (2006)	33,00	2,97
Pinto (2009)	45,60	4,10
Riveros (2008), Gambetta (2010)	47,90	4,31
Eletrolisador adquirido pela Fundação PTI*	52,28	4,70
Carnieletto (2011)	64,62	5,81
Pinto (2009)	71,19	6,40
Gambetta (2010)	82,31	7,40

* Valores informados pelo fornecedor

Os dados da Tabela 2 serviram de base para o dimensionamento da capacidade de produção (CP) de hidrogênio, considerando a média de energia vertida turbinável de Itaipu dos últimos 13 anos (4.109.384.615 kWh). De tal forma, fez-se o seguinte cálculo para cada eletrolisador:

Os resultados desta equação 2 são apresentados na Tabela 3, na qual pode-se observar uma diferença significativa na produção de hidrogênio, dado o desempenho de cada eletrolisador. Nota-se que a diferença entre o eletrolisador de maior e menor consumo de energia existe uma diferença de 149%. Ou seja, este último consome quase três vezes mais energia. Isto traz consequências importantes, considerando que o potencial de produção de hidrogênio é a EVT das usinas hidrelétricas então o potencial de produção seria reduzido em quase três vezes, se for utilizado o eletrolisador referenciado por Gambetta (2010). Da mesma forma, o custo do hidrogênio será maior, pois a energia é um dos principais insumos na composição dos custos de produção.

Tabela 3 – Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio utilizando a EVT de Itaipu

Origem da descrição do eletrolisador analisado	Produção / kg	Produção / Nm ³
Omer (2006)	124.526.806,53	1.385.111.669,00
Pinto (2009)	90.118.083,67	1.002.288.930,58
Riveros (2008), Gambetta (2010)	85.916.466,97	955.670.840,79
Eletrolisador adquirido pela FPTI	78.603.378,26	874.337.152,21
Carnieletto (2011)	63.593.076,68	707.295.114,52
Pinto (2009)	57.726.453,85	642.091.346,15
Gambetta (2010)	49.925.581,71	555.322.245,32

CP= EVT/CE (2)
sendo CP a capacidade de produção e CE o consumo do eletrolisador.

Considerando os eletrolisadores citados nas tabelas 2 e 3 entende-se que o referenciado por Carnieletto (2011) expressa valores reais, pois seu desempenho foi testado em escala de produção. Para confirmar os valores apresentados pelos outros estudos é importante realizar testes em uma planta industrial. Neste sentido o convênio citado anteriormente adquiriu um eletrolisador a fim de estudar o processo de produção via eletrólise, os gastos e desempenho associados ao sistema. Este acompanhamento irá gerar um banco de dados reais para tomadas de decisões futuras na constituição de uma cadeia de produção.

Assim, para a previsão da capacidade de produção de hidrogênio, considerando o índice de consumo energético apresentado por Carnieletto (2011) ter-se-ia uma produção média anual de 707,3 milhões de Nm^3 , o que equivale a 63,6 toneladas de hidrogênio, utilizando o índice 0,0899 kg.Nm^{-3} .

Os cálculos mostrados acima podem ser aplicados a diferentes usinas, podendo-se estimar a quantificação da melhoria da eficiência energética pela contribuição da produção de hidrogênio de acordo com as considerações e características de cada sistema ou tipo da usina considerada que, no caso da Itaipu, é uma usina a fio d'água. Nas de reservatório de acumulação, devemos considerar os parâmetros de acumulação.

5.0 - CONCLUSÕES

O potencial energético associado à energia vertida turbinável, eleva os índices de eficiência alcançados pelas usinas hidrelétricas, gera a necessidade de quebra de paradigmas para aproveitamento das oportunidades de melhorias de eficiência energética pelo aproveitamento desta energia que seria perdida. Esse aproveitamento energético e toma uma dimensão especial neste novo momento global de busca por sustentabilidade, qualidade e quantidade de energia para o futuro.

A produção de hidrogênio, em especial em países como o Brasil que possui elevada parcela da matriz com energia renovável, se bem aproveitada e gerenciada pode ter um potencial encorajador para a inserção desta tecnologia no mercado, integrando a energia do hidrogênio definitivamente na matriz energética brasileira.

Apesar dos benefícios ambientais e técnicos advindos da melhoria da eficiência energética das usinas, o preço do combustível hidrogênio ainda está elevado comparativamente aos outros combustíveis. Assim, além do aproveitamento energético, uma produção de hidrogênio em larga escala reduz seu preço e viabiliza sua utilização para a sociedade em geral.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Às entidades ITAIPU BINACIONAL, Eletrobras, Fundação Parque Tecnológico Itaipu e Universidade Federal da Integração Latino-Americana, bem como seus representantes, pelo apoio e suporte no desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NADEL, S.; GELLER, H. S. Smart energy policies: saving money and reducing pollutant emissions through greater energy efficiency. Washington, D.C.: ACEEE – American Council for na Energy-Efficient Economy, 2001.

[2] GELLER, H. S. O Uso eficiente da eletricidade: uma estratégia de desenvolvimento para o Brasil. Rio de Janeiro: INEE, 1994.

[3] WORLD ENERGY COUNCIL. Energy for Tomorrow's World – Acting Now!. World Energy Council. Londres: 2000.

[4] GARCIA, J. L. A. Produção de Hidrogênio Eletrolítico Utilizando Energia Secundária e seu uso como Vetor Energético. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia, XV, 1999, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu, 1999

[5] PADILHA, J. C. et al. Na evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO₂ emissions in Brazil. Elsevier: International Journal of Hydrogen Energy 34, 2009.

[6] RIFKIN, J.. A Economia do Hidrogênio: a criação de uma nova fonte de energia e a redistribuição do poder na Terra. 300p. São Paulo, SP: M. Books do Brasil LTDA, 2003.

- [7] GOMES NETO, E. H.. Hidrogênio, evoluir sem poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível. 240p. Curitiba, PR: Brasil H2 FuelCell Energy, 2005.
- [8] SÓRIA, M. A. Z. et al. Dams & The World's Water. CIGB – Commission Internationale des Grands Barrages. Paris, 2008.
- [9] SOUTO, J. J. de N. Estruturação da economia do hidrogênio no Brasil In: Brasil FuelCell Expo/Seminar 2007: Curitiba, 2007.
- [10] SOUZA, S. N. M. de Aproveitamento da Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico. 1998. 192p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.
- [11] SANTOS JÚNIOR, A. C. F.. Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio: estudo de caso na Itaipu. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [12] PINTO, C. da S. et al. Itaipu hydroelectric power plant and its experimental hydrogen production unit. 69p. (Especificação técnica: esp-002/07) Foz do Iguaçu, PR: International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems - 22ND ECOS, 2009.
- [13] JARDINI, J. A. et al. Alternativas não convencionais para transmissão de energia elétrica: estado da arte. 447p. ISBN.978-85-85041-04-2, pg284. Brasília, 2011.
- [14] OMER, A. M. Green energies and the environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1789–1821.
- [15] RIVEROS, G. Aproveitamento da energia vertida turbinável da Itaipu para uso em ônibus a hidrogênio: estudo de caso em Foz do Iguaçu. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, Brasil, 2008. 123 p.
- [16] GAMBETTA, F. Análise técnica e econômica de retificadores de corrente para produção de hidrogênio eletrolítico: estudo de caso aproveitando a EVT da UHE de Itaipu. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, Brasil, 2010, 143 p.
- [17] CARNIELETTO, R. Aproveitamento de energia vertida turbinável para produção de hidrogênio e geração distribuída. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria. Energia Elétrica. Santa Maria, RS, Brasil, 2011, 156 p.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Miguel é engenheiro sênior da Itaipu Binacional, graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, mestre em engenharia de produção pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, especialista em eficiência energética pela Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e em gestão da qualidade e produtividade pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE.

Janine Padilha Botton é professora na Dra Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA. Graduada em Química pela Universidade Federal de Santa Maria, Doutora em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Doutora em Química pela Université de Rennes 1 da França, Pós-doutora em Planejamento de Sistemas Energéticos pela Universidade de Campinas – Unicamp, e Pós-doutora em Ciência dos Materiais pela UFRGS.

Ricardo José Ferracin é Gerente do Projeto Hidrogênio Itaipu/Eletronbras e Professor na Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Bacharel, Mestre e Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar e Especialista em Gestão de Projetos e Pessoas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/PR.

Nelinho Davi Graef, Mestre em Desenvolvimento Regional e Agronegócio pela UNIOESTE, PR. Administrador pela Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ, RS. Bolsista de Pesquisa na Fundação Parque Tecnológico Itaipu.

Roque Martins Duarte Júnior, aluno de graduação do curso de Engenharia de Energias Renováveis da Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA.