

## ANÁLISE ENERGÉTICA DO PROJETO DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-FOTOVOLTAICO COM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DO HIDROGÊNIO E BANCO DE BATERIAS

Maiana Brito de Matos

Ennio Peres da Silva

Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

### RESUMO

Este trabalho realiza uma análise conceitual (teórica) da geração de energia elétrica através de um sistema híbrido eólico-solar com armazenamento por banco de baterias ou hidrogênio na cidade de Fortaleza-CE. Este é um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), elaborado pelo Laboratório de Hidrogênio (LH2) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC), aprovado pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) e ANEEL. Foi realizado um estudo de caso para um sistema de potência fotovoltaica instalada de 5 kWp, potência instalada eólica de 6 kW e célula a combustível de 5 kW, tendo-se estimada a energia elétrica média diária disponibilizada com armazenamento por banco de baterias de 36,4 kWh (131,0 MJ) e para o sistema de hidrogênio de 22,7 kWh (81,7MJ). Deste modo, pôde-se estimar que aproximadamente 17 famílias poderiam ser atendidas pelo sistema com armazenamento por banco de baterias e 11 famílias com armazenamento pelo sistema de hidrogênio. Por fim, também foi possível calcular que emissões de até 19 toneladas anuais de CO<sub>2</sub> poderiam ser evitadas pela substituição dos bancos geradores a diesel pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento por banco de baterias e 12 toneladas no caso da produção hidrogênio e sua reconversão em energia elétrica.

**Palavras-chave:** Sistemas híbridos, armazenamento hidrogênio, emissões de gás carbônico.

### ABSTRACT

This work realize the conceptual analysis (theoretical) of power generation through a hybrid wind-solar system with storage in battery bank or hydrogen in Fortaleza-CE is an R&D project established by the Hydrogen Laboratory at UNICAMP in partnership with the Federal University of Ceará, approved by CHESF and ANEEL. We conducted a case study for a power system composed of 5kWp of PV, 6 kW of wind power and a 5 kW fuel cell. It was estimated that the average daily electricity supplied with a storage battery bank is 36.4 kWh (131.0 MJ) and for the hydrogen system 22.7 kWh (81.7 MJ). Thus, it could be estimated that approximately 17 families could be supplied by the

system for storage battery bank and 11 families with storage system for hydrogen. Finally, it was also possible to calculate emissions of up to 19 tons of CO<sub>2</sub> could be avoided by replacing the generators sets with wind-solar hybrid system and storage battery bank and by 12 tons in the case of hydrogen production and its conversion into electrical energy.

**Keywords:** Hybrid system, hydrogen storage, carbon dioxide emissions.

## 1. INTRODUÇÃO

Normalmente, a geração de energia elétrica em pequenas comunidades isoladas no país é feita a partir da utilização de óleo diesel em motores de combustão interna, apesar de existirem algumas comunidades isoladas que são assistidas pela energia solar fotovoltaica e/ou eólica.

O aproveitamento de forma isolada em pequena escala da energia elétrica produzida por geradores eólicos e fotovoltaicos, que operam a partir de fontes intermitentes de energia, implica no uso de bancos de baterias para o armazenamento de eletricidade, de forma a se ajustar a demanda e a geração de eletricidade. Hoje em dia, com o desenvolvimento da tecnologia das células a combustível, existe a possibilidade de utilizar o hidrogênio como vetor energético. O hidrogênio é gerado através da eletrólise da água nos períodos em que há disponibilidade excedente de energia elétrica (demanda menor que a produção), e reconvertido em eletricidade, utilizando células a combustível, nos períodos em que a demanda ultrapassa a produção, constituindo um sistema autônomo completo.

O sistema alternativo proposto neste trabalho utiliza o hidrogênio como meio armazenador da energia elétrica, comparando-o com o sistema de bancos de baterias equivalente. Essa comparação foi feita levando-se em conta a análise técnica, envolvendo a eficiência e as perdas em cada caso. A análise econômica não é objeto deste estudo.

## 2. SISTEMA HÍBRIDO UTILIZANDO CÉLULA A COMBUSTÍVEL

O sistema proposto é composto por um aerogerador e um arranjo fotovoltaico, responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica às cargas e também a um subsistema de eletrólise, que fornece hidrogênio a um reservatório acoplado a uma célula a combustível, que irá reverter o hidrogênio armazenado em eletricidade. Esse subsistema substitui o banco de baterias. A operação integrada das fontes é feita por um sistema eletrônico de controle. Nestes sistemas, os principais componentes tecnológicos são o eletrolisador e a

célula a combustível. De acordo com Pinto (2013) os principais fabricantes de eletrolisadores no mundo estão descritos Avalence, Proton Energy, NEL, Teledyne, Hydrogenics, H2Nitidor, Ener Blue AS, McPhy, IHT e ITM Power. Já o eletrolisador, foi utilizado da *Nitidor* por ser o único que possui representação no Brasil. Segundo a Nitidor (2012), o eletrolisador escolhido necessita de 5,3 kW para produzir 1 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio.

De acordo com Fuel Cells (2012) os principais fabricantes de célula a combustível são *Versa Power Systems, UTC Power, Tropical S.A, Topsoe Fuel Cell A/S, SOFCpower Spa, SFC Energy AG, SerEnergy A/S, ReilOn, PowerCell Sweden AB, Plug Power Inc, Palcan Energy Corp, Oorja Protonics Inc., Nuvera Fuel Cells, Nedstack PEM Fuel Cells, Microcell Corporation, MES as e M-FIELD Energy LTD.*

No Brasil, existem dois fabricantes nacionais: a Electrocell e a Novocell, ambas localizadas no Estado de São Paulo. Entretanto, estas empresas não possuem uma linha de produção e seus equipamentos estão num estágio pré-comercial e só podem ser adquiridas por encomenda.

No mercado brasileiro, a empresa Battistella é a revendedora das células a combustível do tipo de *Proton Exchange Membrane* (PEM) da marca *PlugPower*. Para este trabalho foi escolhida a célula de 5 kW desta empresa, pois a mesma já é comercializada no país e não necessita de importação. Além disto, o LH2 da Unicamp já utilizou esta célula em vários dos seus projetos e obteve resultados satisfatórios.

De acordo com os testes realizados no LH2 da Unicamp, a célula a combustível de 5kW da Battistella possui uma eficiência de 48% e necessita de 0,80 m<sup>3</sup> de hidrogênio para produzir 1 kWh de energia elétrica.

As baterias normalmente estabilizam as flutuações de corrente oriundas dos arranjos fotovoltaicos e/ou eólicos, assegurando assim uma faixa de corrente mais adequada para a operação dos componentes do sistema a serem alimentados. Além disso, o armazenamento por bateria apresenta uma eficiência de aproximadamente 85% (CEPEL-CRESESB, 2004).

Na análise técnica, deve ser considerada a eficiência de cada um dos componentes que constituem os dois subsistemas solar e eólico. No sistema de armazenando por banco de baterias, a eficiência apenas para armazenar energia elétrica ( $\eta_g$ ) é de 78%, pois considera as eficiências do *Sunny Boy* de 97%, *Sunny Island* de 95% (SMA, 2012) e do banco de baterias de 85%. Para a eficiência no processo de utilização da energia armazenada ( $\eta_c$ ) é considerada apenas a eficiência de 95% do *Sunny Island* (SMA, 2012). Deste modo, a eficiência total do sistema armazenamento do banco de baterias ( $\eta_T$ ) e sua posterior utilização é igual a multiplicação de  $\eta_g$  por  $\eta_c$  que corresponde aproximadamente 74%. A eficiência apenas para produzir e armazenar o hidrogênio ( $\eta_g$ )

é de aproximadamente 60%, já que considera a eficiência de 97% do *Sunny Boy* também da SMA (2012), a eficiência de 67% do eletrolisador (de acordo com a tensão elétrica de operação e o consumo de energia) e a perda de armazenamento no tanque de 7% (SOUZA, 1998). Para a eficiência no processo de utilização da energia armazenada na forma de hidrogênio ( $\eta_c$ ) é cerca de 46%, uma vez que considerada a eficiência da CaC de 48% e do inversor de 95% (SCHNEIDER, 2012).

Por fim, a eficiência total do sistema de produção e armazenamento do hidrogênio ( $\eta_T$ ) e sua reconversão em eletricidade através de CaC está por volta de 27% da energia disponível no barramento CA, pois corresponde  $\eta_g$  multiplicado por  $\eta_c$ .

### 2.1. Dados Eólicos Fortaleza

Primeiramente foram consultadas as velocidades médias do vento a 50 metros (m) de altura apresentadas no Atlas do Potencial Eólico do Ceará, disponível a partir da página da internet da Secretária de Infraestrutura (SEINFRA) do Estado do Ceará (SEINFRA, 2011), no Atlas Eólico Brasileiro disponibilizado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) (CRESESB, 2012) e o banco de dados da National Aeronautics and Space Administration (NASA) (SWERA, 2012). Os dados de velocidade média do vento na altura de 10m foram obtidos através da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (EMBRAPA, 2004) e da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2012).

Por fim, para decidir quais dados seriam utilizados neste trabalho foi necessário colocar as velocidades médias numa mesma base, ou seja, numa mesma altura, a qual foi definida como sendo 30 metros (m). Grande parte das torres dos aerogeradores dos sistemas híbridos instalados pelo grupo de pesquisa Grupos de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA) foi colocada entre 24 e 30 m de altura, de forma que neste trabalho resolveu-se adotar a torre do aerogerador com 30 m de altura (PINHO, 2008).

Segundo o estudo realizado por WOOD (2010) que considera fatores como os custos da torre, o tempo de retorno do investimento e o lucro efetivamente gerado, a altura ótima para torre de aerogeradores de pequeno porte é de 21 m. Entretanto, áreas com mais obstáculos, como por exemplo, zonas urbanas podem ter a altura ótima da torre maior.

Os dados da FUNCEME foram descartados deste trabalho por estarem incompletos para diversos meses do ano e por possuir valores bem diferentes das demais fontes, principalmente para o ano de 2009.

Analisando-se as médias anuais, optou-se pela escolha dos dados da EMBRAPA para dar continuidade aos cálculos deste trabalho, pois apresentam um valor da velocidade média anual de 4,6 m/s, que está de acordo com a faixa de velocidade obtida a partir do Atlas de Eólico do Ceará, enquanto o valor médio anual da NASA está fora desta faixa.

Para este trabalho foi adotado o aerogerador da empresa Enersud (GRW555) para realizar os cálculos da energia elétrica gerada pelo vento. Esta escolha deveu-se ao fato de estar indicado no projeto da P&D ANEEL preferencialmente um equipamento nacional. Apesar de nacional, o aerogerador da empresa Satrix não foi utilizado neste trabalho, pois o fabricante informou que seu equipamento estava em fase de testes e, por este motivo, não havia como informar as especificações técnicas nem orçamento da sua turbina de 6 kW.

## **2.2.Dados Solarimétricos de Fortaleza**

Em relação aos dados relativos à energia solar, primeiro foi consultado o programa Sundata, através da inserção da latitude e longitude da cidade de Fortaleza na página do CRESESB (CRESESB, 2012). Foram obtidos os dados da irradiação diária média mensal no plano horizontal, ângulo igual à latitude, maior média anual e maior mínimo mensal. Em seguida, foram consultados os Atlas Solarimétricos do Ceará (Martins et al, 2010), Atlas Solarimétricos do Brasil (TIBA et al, 2000), Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA et al, 2006) e Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2008). Além destas fontes, também foi consultado a PCD da FUNCEME, mas estes dados não foram utilizados por apresentar radiação diária igual a zero em vários momentos próximo ao meio-dia.

Fez-se a opção de utilizar os dados da CRESESB para realizar os cálculos, pois os mesmos estavam mais detalhados que as demais fontes consultadas e foram obtidos a partir da latitude e longitude da cidade de Fortaleza no site na CRESESB.

Para os cálculos da energia gerada pela parte solar do sistema híbrido proposto neste trabalho foi adotado o painel fotovoltaico Yingli de 260Wp (eficiência de 15,9%), o mesmo do trabalho de Strangueto (2012), pelo fato de possuir maior eficiência do que os outros modelos, como por exemplo, da Suntech de 245Wp (eficiência de 14,8%) e Solar World de 85 Wp (eficiência de 12,5%), que também são comercializados no Brasil. Ainda de acordo com os critérios de Strangueto (2012), o painel de 230 Wp da Tecnometal, atualmente única empresa nacional fabricante de painéis, não foi escolhido para realização dos cálculos, pois, além de uma potência nominal inferior ao da Yingli, é encontrado a preços superiores.

A partir da incidência da radiação total no local de instalação do sistema, das características técnicas do painel, como eficiência e área, pode-se determinar a potência elétrica obtida por um painel fotovoltaico e calcular a energia elétrica média diária e mensal gerada no mês pelo painel na cidade de Fortaleza.

### **2.3 Perfil de Carga de Consumo e Emissões de Sistemas de Banco de Geradores**

Segundo a concessionária de energia do Estado do Ceará (COELCE, apud Polito, 2011), no Ceará até outubro de 2010 foram feitas 152 mil ligações no programa Luz para Todos (LPT) e beneficiou aproximadamente 760 mil pessoas, que equivale a 8,5% da população do estado, sendo que a maior parte dos novos clientes do programa LPT no Ceará se enquadram na classe de baixa renda e possuem um consumo médio mensal de 60 kWh. Para este trabalho resolveu-se adotar o este consumo, uma vez que, conforme previsto no projeto de P&D ANEEL, o sistema deverá ser instalado neste estado.

De acordo com dados da United Nations Environment Programme (UNEP), a taxa de emissão de toneladas de gás carbônico (tCO<sub>2</sub>) por óleo diesel é 0,0002667 tCO<sub>2</sub>/kWh (UNEP,2000). Além disso, as emissões evitadas também foram calculadas através da metodologia Methodological standards for small-scale CDM project activities ou as normas metodológicas para projetos de MDL de pequena escala AMS-I.L versão 01: Electrification of rural communities using renewable energy ou Eletrificação de comunidades rurais usando fontes renováveis de energia descrita no Anexo 53 do Executive Board (EB) da Meeting 66 (CDM, 2012a).

### **3. METODOLOGIA**

A energia elétrica produzida mensalmente pelo conjunto eólico-fotovoltaico foi obtida pela soma da energia elétrica gerada pela parte eólica mais a energia elétrica gerada pela parte solar em cada mês do ano. Evidentemente que os valores obtidos variam ao longo do tempo, sendo necessário se estabelecer qual a carga que efetivamente pode ser atendida continuamente. O valor mínimo obtido (mês de menor produção) seria uma solução, mas uma grande quantidade de energia seria desperdiçada. O uso de um sistema de armazenamento da eletricidade permite o atendimento de uma carga maior.

Para o cálculo da energia elétrica disponibilizada para uso pelo sistema híbrido eólico-fotovoltaico com armazenamento de energia, foi necessário analisar o comportamento diário do sistema, adotou-se um dia típico (médio) para cada mês do ano, ou seja, como se todos os dias de cada mês fossem iguais ao respectivo dia típico. Utilizou-se o programa computacional Homer do National Renewable Energy

Laboratory (NREL) que calcula a irradiação solar por hora de um dia médio de cada mês a partir de parâmetros como latitude, longitude, dados de irradiação média diária mensal e a taxa de não nebulosidade ou clearness. Em relação ao cálculo da velocidade do vento por hora num dia médio, são considerados parâmetros como velocidade média mensal do vento a 30 metros, altitude, altura do anemômetro, fator weibull e hora de pico da velocidade do vento (HOMER, 2013). A partir dos dados por hora, com auxílio de planilhas eletrônicas do Microsoft Excel, foi possível calcular a energia elétrica gerada pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos num dia típico de cada mês.

Em seguida, ainda com auxílio do Excel para análise do sistema com armazenamento, foram construídos os gráficos de Potência x Tempo de cada dia típico de cada mês do ano. O Gráfico 1 mostra um dia típico do mês Janeiro.

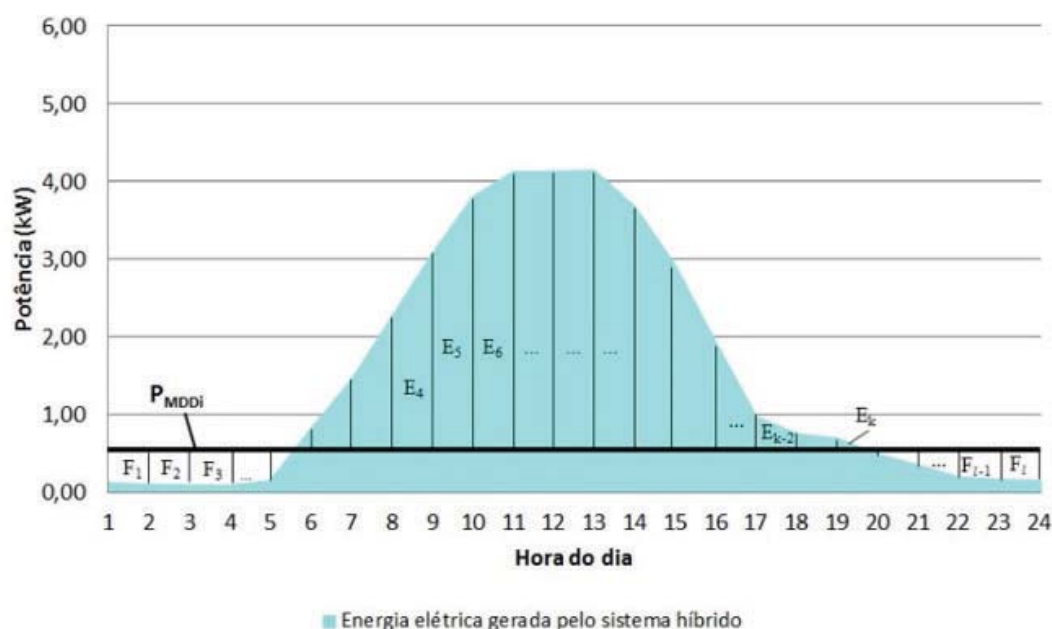


Gráfico 1 - Energia elétrica excedente ( $E_k$ ) e a faltando no sistema ( $F_i$ ).

Fonte: MATOS, 2013.

De acordo com o Gráfico 1, a área abaixo da reta PMDD (potência média diária disponibilizada para uso) que está em branco corresponde à energia elétrica média que deverá ser complementada pelo sistema de armazenamento, pois no período aproximado das 18 horas às 06 horas da manhã do dia seguinte os painéis fotovoltaicos e o aerogerador não geram o suficiente para atender as cargas. A área acima da reta PMDD corresponde à energia elétrica gerada pelo painel fotovoltaico e pelo aerogerador que não está sendo utilizada logo esta é uma energia excedente que será armazenada.

Ainda a partir do Gráfico 1, pode-se observar que os

valores das potências (eixo das ordenadas) são em valores absolutos iguais as energias produzidas no mesmo intervalo de tempo, neste caso de 1 hora, expressas em unidades de kWh.

O procedimento descrito a seguir é válido tanto para o sistema com armazenamento por banco de baterias quanto para o hidrogênio. Entretanto, vale ressaltar que os cálculos foram feitos em separado para cada tipo de armazenamento, pois os mesmos possuem eficiências diferentes consequentemente as potências médias diárias disponibilizadas para uso também são diferentes.

Primeiro, foi calculado um valor da PMDDi para cada mês do ano de modo que a energia elétrica excedente seria armazenada num dia e seria toda utilizada neste mesmo dia, ou seja, o balanço energético diário seria igual à zero. A Equação 1 apresenta o cálculo da PMDDi.

$$P_{MDDi} = \frac{\eta_T \cdot [E_1 + E_2 + \dots + E_k] + [F_1 + F_2 + \dots + F_l]}{(\eta_T \cdot k + l)} \quad (1)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 e corresponde aos meses do ano,  $\eta_T$  é a eficiência global do sistema de armazenamento,  $E$  valor da energia excedente nas horas acima da reta  $P_{MDD}$ ,  $F$  valor da energia que está faltando e será complementada pelo sistema de armazenamento nas horas abaixo da reta  $P_{MDD}$ ,  $k$  é quantidade de horas do dia que o sistema está com energia excedente,  $l$  é quantidade de horas do dia que o sistema necessita utilizar a energia armazenada, sendo a soma destes dois últimos iguais a 24.

Ainda considerando que toda a energia armazenada num dia típico seria utilizada no mesmo dia que foi armazenada, foi calculada energia elétrica média anual (EMA) disponibilizada para uso pelo sistema híbrido através da Equação 2.

$$E_{MA} = \sum_{i=1}^{12} (P_{MDDi} \cdot 24 \cdot Di) \quad (2)$$

Onde  $i = 1$  a 12, 24 horas do dia,  $D$  é quantidade de dias do mês

Em seguida, através da Equação 3 foi estabelecida a potência média diária disponibilizada para uso que deve ser igual para todos os dias do ano para que deste modo o balanço de energia elétrica não zere mais diariamente e sim anualmente.

$$P_{MDD} = \frac{E_{MA}}{(365 \cdot 24)} \quad (3)$$

A etapa seguinte consiste em refazer todos os cálculos diários



para cada dia típico, utilizando a  $P_{MDD}$  fixa para todos os dias do ano, para verificar se o balanço entre a energia excedente armazenada diariamente e a energia fornecida pelo sistema de armazenamento diariamente zerava anualmente.

Entretanto, notou-se que devido às aproximações nos cálculos ao final de um ano faltava uma pequena quantidade de energia elétrica. Sendo assim, o valor de  $P_{MDD}$  foi manualmente ajustado até que fosse zerado o balanço anual entre a energia armazenada e a fornecida pelo sistema de armazenamento para uso.

Para realizar os cálculos, neste trabalho não foi considerado o número de dias de autonomia, ou seja, que o sistema de armazenamento pode alimentar as cargas sem receber energia do sistema híbrido tanto por falta de luz solar como por falta de vento. Entretanto, estudos futuros poderão tratar do dimensionamento de banco de baterias e do tanque de hidrogênio.

Sendo a energia elétrica média diária disponibilizada para uso ( $E_{MDD}$ ) com o sistema de armazenamento igual a  $P_{MDD}$  multiplicada por 24 que são as horas do dia. Obteve-se um valor de  $P_{MDD}$  para armazenamento por banco de baterias e outro para o sistema de hidrogênio.

Para calcular a energia elétrica armazenada  $E_{ADi}$  num dia típico foi utilizada a Equação 4.

$$E_{ADi} = \eta_g \cdot [(E_1 - P_{MDD}) + (E_2 - P_{MDD}) + \dots + (E_k - P_{MDD})] \quad (4)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 (corresponde aos meses do ano) e  $\eta_g$  é a eficiência para armazenar energia.

Em seguida, para calcular a energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento  $E_{FSAi}$  num dia típico foi utilizada a Equação 5.

$$E_{FSAi} = \frac{[(F_1 - P_{MDD}) + (F_2 - P_{MDD}) + \dots + (F_l - P_{MDD})]}{\eta_c} \quad (5)$$

Onde  $i$  varia de 1 a 12 (corresponde aos meses do ano) e  $\eta_c$  é a eficiência na utilização da energia armazenada.

Em seguida, para calcular o saldo mensal de energia ( $S_{MEi}$ ) foi utilizada a Equação 6.

$$S_{MEi} = (E_{ADi} - E_{FSAi}) \cdot Di \quad (6)$$

Por fim o balanço energético anual foi igual à Equação 7.

$$\sum_{i=1}^{12} S_{MEi} = 0 \quad (7)$$

Para obtenção dos valores em mássicos do hidrogênio produzido e consumido foi realizada a transformação da  $E_{ADi}$  e da  $E_{FSAi}$  de Em seguida, foi utilizado o poder calorífico superior (PCS) do hidrogênio que é 141,88 MJ/kg de acordo com U.S DOE (2013). Deste modo, é possível calcular o hidrogênio produzido num dia típico em gramas através da Equação 8.

$$H_2 \text{ produzido } i = \frac{(E_{ADi} \cdot 3,6 \cdot 1000)}{141,88} \quad (8)$$

Para o cálculo da quantidade mássica do hidrogênio diário utilizada para alimentar a CaC e produzir energia utilizou-se a Equação 9.

$$H_2 \text{ utilizado } i = \frac{(E_{FSAi} \cdot 3,6 \cdot 1000)}{141,88} \quad (9)$$

Em seguida, para calcular o saldo mensal de hidrogênio ( $S_{MHi}$ ) foi utilizada a Equação 10

$$S_{MHi} = (H_2 \text{ produzido } i - H_2 \text{ utilizado } i) \cdot Di \quad (10)$$

Já o balanço anual de hidrogênio foi calculado pela Equação 11.

$$\sum_{i=1}^{12} S_{MHi} \quad (11)$$

Também foi realizado o cálculo da quantidade de famílias a ser atendida pelo sistema, com os dois tipos de armazenamento, dividindo-se a energia elétrica média disponibilizada no mês de menor número de dias (fevereiro com 28 dias) pelo consumo médio mensal de famílias atendidas pelo programa LPT no Estado do Ceará.

Por fim, as emissões evitadas pelo uso do sistema híbrido foram calculadas a partir da consideração de um sistema equivalente (mesma quantidade diária de energia) operando com óleo Diesel, cujo fator de emissão é 0,0002667 tCO<sub>2</sub> por kWh produzido, segundo dados fornecidos pela UNEP (UNEP,2000).

Além disso, as emissões evitadas também foram calculadas através da metodologia AMS-I.L versão 01: Electrification of rural communities using renewable energy ou Eletrificação de comunidades rurais usando fontes renováveis de energia descrita no Anexo 53 do EB da Meeting 66 (CDM, 2012a). Ainda de acordo com a metodologia CDM (2012a) para os primeiros 55 kWh de energia elétrica proveniente de fonte renovável consumidos por unidade consumidora o fator de emissão é 6.8 tCO<sub>2</sub>/ MWh, para consumo maior que 55 kWh e menor que 250 kWh o fator de emissão é 1.3 tCO<sub>2</sub>/ MWh e para consumo maior que 250 kWh o fator de emissão é 1.0 tCO<sub>2</sub>/ MWh. Para o cálculo

lo da baseline emissions ou emissão de base de todo o projeto de MDL é utilizado a Equação 12 (CDM, 2012a).

$$BE_a = BE_{55,a} + BE_{250,a} + BE_{maior\ 250,a} \quad (12)$$

Onde  $BE_a$  são as emissões de base num ano a em tCO<sub>2</sub>,  $BE_{55,a}$  emissões de base das unidades consumidoras com consumo igual ou inferior a 55 kWh do projeto de MDL no ano a,  $BE_{250,a}$  são as emissões de base das unidades consumidoras com consumo maior 55 kWh e menor do que 250 kWh do projeto de MDL no ano a,  $BE_{maior\ 250,a}$  são as emissões de base das unidades consumidoras com consumo maior do que 250 kWh do projeto de MDL no ano a.

No caso deste trabalho, como todas as unidades consumidoras possuem o consumo médio mensal igual a 60 kWh, ou seja, 720 kWh anual. Sendo assim,  $BE_{55,a}=0$  e  $BE_{250,a}=0$ .

Para instalações com consumo anual maior do que 250 kWh a baseline emissions ou emissão de base é calculada pela Equação 13 (CDM, 2012a).

$$BE_{maior\ 250,a} = \sum_w^p ((EG_{w,a} - 0.250) \cdot EF_{CO2,maior\ 250} + C) \quad (13)$$

Onde  $EG_{w,a}$  (MWh) é a eletricidade entregue pelo projeto de energia renovável por unidade de consumidora w em um ano a na qual a eletricidade entregue é maior do que 250 kWh no ano,  $EF_{CO2,maior\ 250}$  é o fator de emissão de 1.0 tCO<sub>2</sub>/ MWh, w é a unidade consumidora com consumo maior que 250 kWh por ano, C é 0.6275 que a constante calculada por (0.055 MWh x 6.8 tCO<sub>2</sub>/MWh + 0.195 MWh x 1.3 tCO<sub>2</sub>/MWh) e p é o número de unidades consumidoras.

Como todas as unidades consumidoras possuem o mesmo consumo médio anual igual a 0.720 MWh a equação 13 poderá ser escrita conforme a Equação 14.

$$BE_{maior\ 250,a} = Qtd\ famílias \cdot ((EG_{w,a} - 0.250) \cdot EF_{CO2,maior\ 250} + C) \quad (14)$$

As emissões reduzidas na base anual podem ser calculadas através da Equação de 15

$$ER_a = BE_a - PE_a - LE_a \quad (15)$$

Onde  $PE_a$  são as emissões do projeto num ano em tCO<sub>2</sub>/a e  $LE_a$  são as emissões fugitivas em tCO<sub>2</sub>/a.  $PE_a$  são consideradas iguais a zero exceto quando envolvem plantas geotermiais e reservatório de água de micro, mini ou pequenas centrais hidrelétricas (CDM, 2012a).

Além disso, como a energia gerada pelo projeto de energia renováveis não é transferida para outra atividade que tenha fuga do carbono, o valor de  $LE_a$  também foi considerada igual a zero. Deste modo, as emissões reduzidas são iguais às emissões de base (CDM, 2012a).

O projeto de MDL Programático denominado Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power Systems também utilizou a metodologia AMS-I.L versão 01 e estima-se que o mesmo irá evitar 215 tCO<sub>2</sub> por ano sendo 10 anos o período de obtenção de créditos. Este projeto é composto por 500 unidades com consumo entre 55 e 250 kWh por ano (CDM, 2012b).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os painéis fotovoltaicos geram mais energia que o aerogerador (2,3 vezes mais na média mensal), além de que Abril é o mês no qual o sistema gera menos energia elétrica e Outubro é o mês de maior produção, com 793,2 kWh e 1.698,0 kWh respectivamente.

Não é adequado considerar que o sistema híbrido aqui estudado pode operar sem um sistema de armazenamento de energia fornecendo a mínima energia disponível, a saber, aquela referente ao mês de Abril (793,2 kWh). Sem o armazenamento, a energia mensal firme seria a mínima do sistema eólico, ou seja, 78,7 kWh (média diária de 2,6 kWh e anual de 1 MWh), uma vez que os painéis fotovoltaicos não estariam fornecendo energia à noite. Mesmo assim, noites sem vento acarretariam a interrupção do suprimento de eletricidade. Portanto, a presença do sistema de armazenamento é essencial ao funcionamento adequado do sistema.

##### 4.1. Energia Elétrica Diária Produzida Pelo Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico Com os Dois Tipos de Armazenamento

Deste modo, a energia elétrica média anual disponibilizada pelo sistema com armazenamento por banco de baterias é de aproximadamente 13,3 MWh e armazenamento de hidrogênio é de 8,3 MWh, valores inferiores aos 15,1 MWh que corresponde à energia total gerada por ano pelo aerogerador e pelos painéis fotovoltaicos, porém superior à 1 MWh que seria possível disponibilizar sem o sistema de armazenamento. O Gráfico 2 apresenta o comportamento de um dia típico do mês de Abril com armazenamento pelo sistema de hidrogênio.

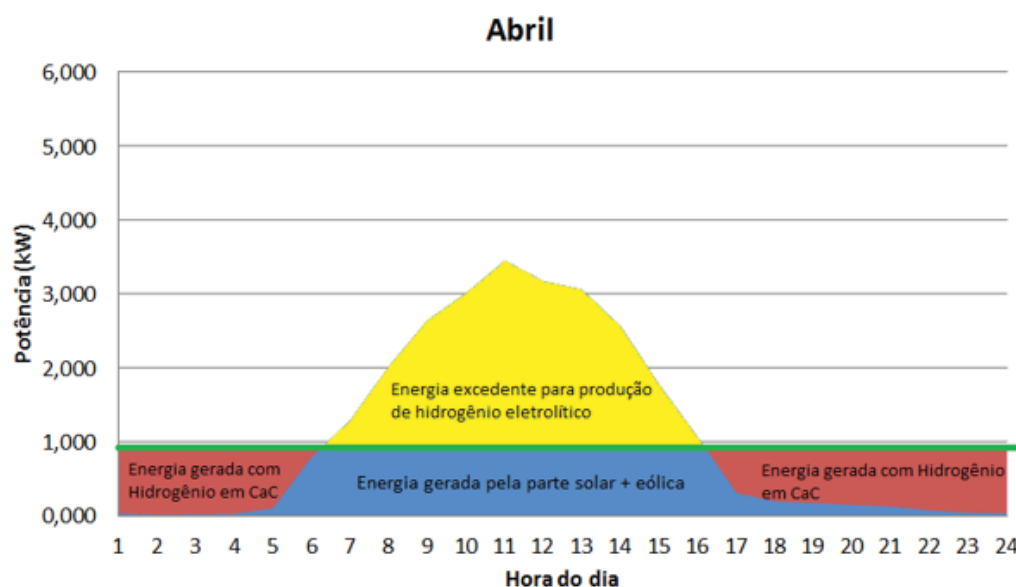
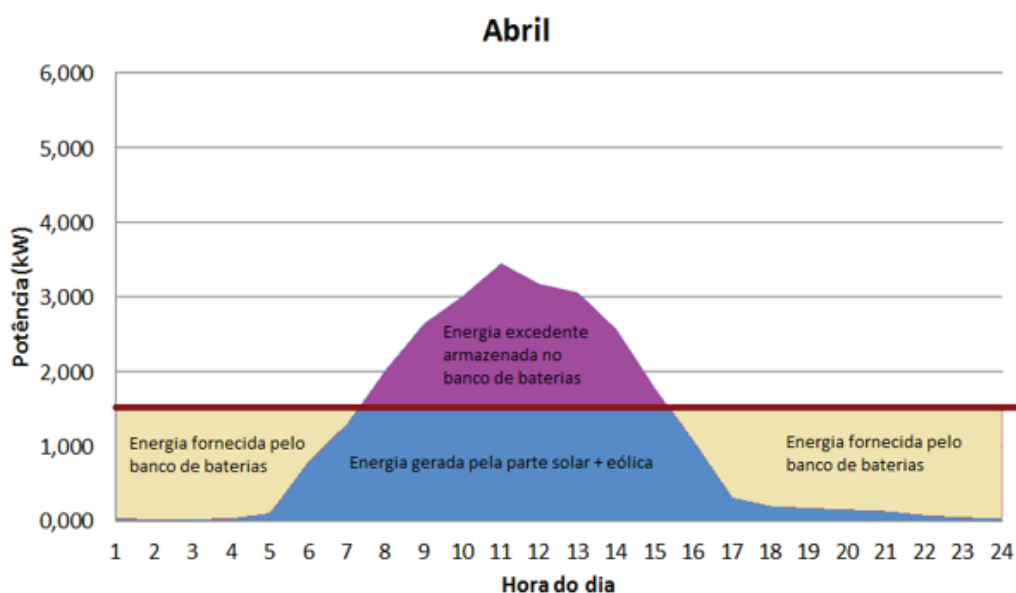


Gráfico 2 -Comportamento do sistema com armazenamento por banco de baterias e do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Abril.

Fonte: MATOS, 2013.

Abril é o mês no qual os painéis fotovoltaicos e o aerogerador produzem a menor quantidade de energia elétrica, necessitando utilizar mais a energia armazenada. Em Abril ocorre armazenamento da energia excedente durante o dia e que durante a noite a geração híbrida não é suficiente de modo que necessita ser complementada pelo sistema de armazenamento.

o Gráfico 3 apresenta o comportamento do sistema para armazenamento de eletricidade por banco de baterias e do sistema para armazenamento de eletricidade pelo vetor energético hidrogênio para o mês de Outubro.

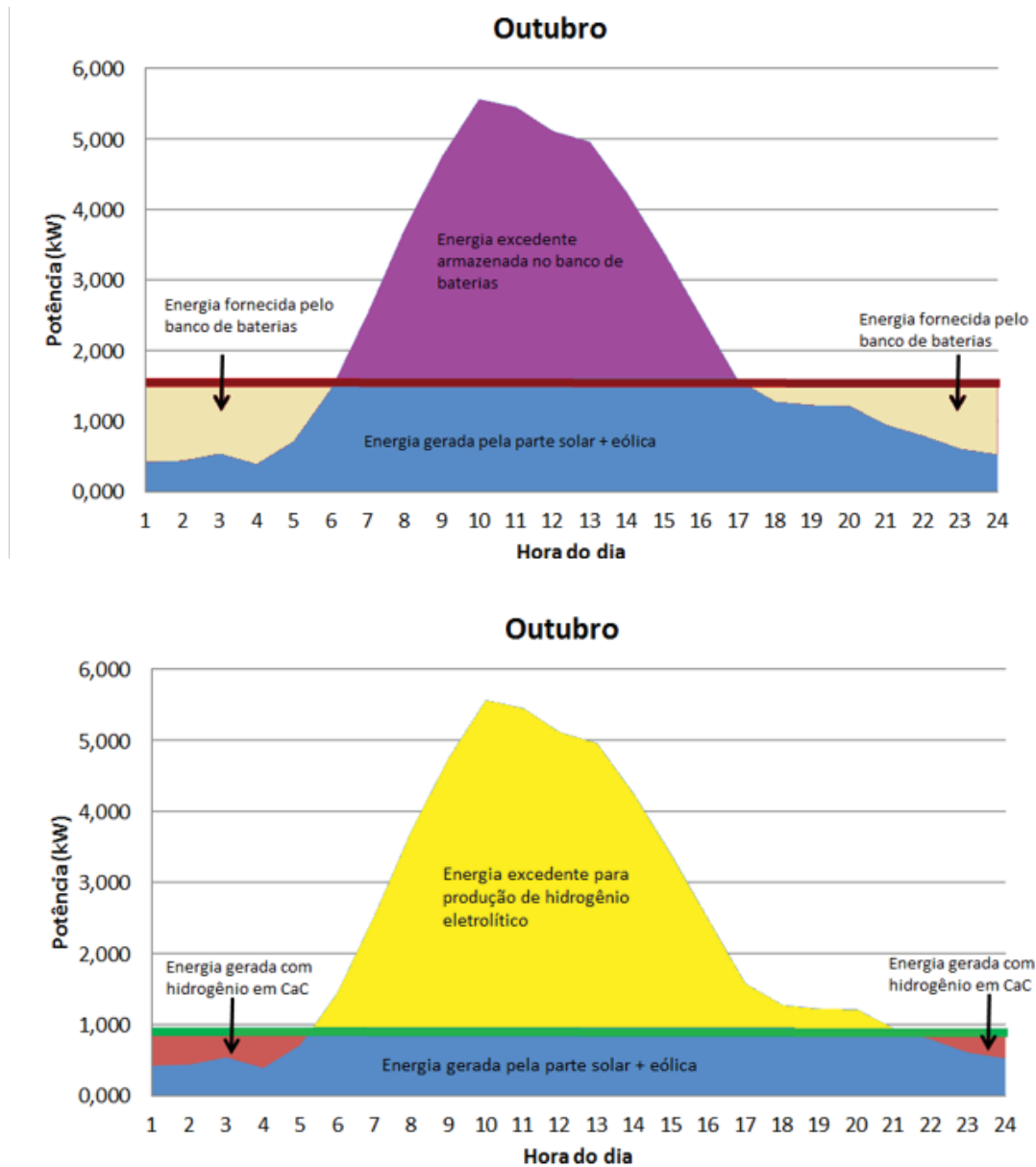


Gráfico 3 - Comportamento do sistema com armazenamento por banco de baterias e do sistema com produção de hidrogênio eletrolítico e sua reconversão em eletricidade no mês de Outubro.

Fonte: MATOS, 2013.

De acordo com o Gráfico 3 pode-se observar que de fato outubro é o melhor mês de geração de energia elétrica pela parte solar e eólica do sistema e que, sendo assim, possui a maior quantidade de energia excedente. Por consequência, neste mês se armazena a maior quantidade de energia. Entretanto, mesmo neste mês pode-se observar que de 22h a 06h é necessário recorrer à energia armazenada.

Conforme o Gráfico 3 pode-se notar que a produção de hidrogênio ou o armazenamento de energia no banco de baterias ocorre todos os dias e não apenas em alguns meses do ano. Nos meses de maior geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos e pelo aerogerador haverá um maior excedente de energia e,

consequentemente, no banco de baterias. Sendo assim, nestes meses também irá utilizar menos energia armazenada. A Tabela 1 apresenta o saldo diário, mensal e anual de energia elétrica do sistema de armazenamento por banco de baterias. Pode-se observar na Tabela 1, que de julho a dezembro o saldo diário de energia é positivo, consequentemente o mensal também. Ao final de um ano, o balanço entre a energia elétrica armazenada e fornecida pelo banco de baterias é igual à zero.

Tabela 1 - Saldo entre a energia armazenada e energia fornecida pelo banco de baterias por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza. \*E<sub>ADi</sub> é energia elétrica armazenada num dia típico \*\*E<sub>FSAi</sub> é energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento num dia típico.

<b>Energia (kWh)- Banco de Baterias</b>					
<b>Mês</b>	<b>E<sub>ADi</sub>*</b>	<b>E<sub>FSAi</sub>**</b>	<b>E<sub>ADi</sub> - E<sub>FSAi</sub></b>	<b>Dias do mês</b>	<b>Saldo</b>
Jan	13,0	17,1	-4,0	31	-124,7
Fev	11,7	17,5	-5,8	28	-162,4
Mar	8,0	20,7	-12,7	31	-392,5
Abril	7,7	20,8	-13,1	30	-394,2
Mai	11,1	18,6	-7,5	31	-233,4
Jun	12,1	18,0	-5,9	30	-176,4
Jul	16,7	16,6	0,1	31	4,5
Ago	20,9	12,5	8,5	31	262,0
Set	22,0	9,1	13,0	30	389,0
Out	21,6	9,7	11,9	31	369,1
Nov	21,0	10,0	11,0	30	330,0
Dez	17,7	13,5	4,2	31	129,1
				365	0,0

Fonte: MATOS, 2013.

Já na Tabela 2, nota-se que de agosto a dezembro o saldo diário de energia é positivo. O balanço anual entre a energia elétrica armazenada na forma de hidrogênio e a energia elétrica gerada pelo hidrogênio é igual à zero.

Tabela 2 - Saldo entre a energia armazenada e da energia fornecida pelo Sistema de Armazenamento de hidrogênio por dia típico de cada mês na cidade de Fortaleza. \*EADi é energia elétrica armazenada num dia típico \*\*EFSAi é energia elétrica fornecida pelo sistema de armazenamento num dia típico.

<b>Energia (kWh)- H<sub>2</sub></b>					
<b>Mês</b>	<b>E<sub>ADi</sub>*</b>	<b>E<sub>FSAi</sub>**</b>	<b>E<sub>ADi</sub> - E<sub>FSAi</sub></b>	<b>Dias do mês</b>	<b>Saldo</b>
Jan	13,4	17,9	-4,5	31	-140,4
Fev	12,3	18,6	-6,3	28	-175,4
Mar	9,2	24,0	-14,9	31	-461,0
Abril	8,9	24,5	-15,5	30	-465,8
Maio	11,9	21,0	-9,2	31	-284,2
Jun	12,7	19,9	-7,2	30	-216,7
Jul	16,2	17,0	-0,7	31	-22,9
Ago	19,8	9,8	10,1	31	312,2
Set	21,6	6,0	15,6	30	466,8
Out	21,1	6,9	14,2	31	440,9
Nov	21,0	8,6	12,4	30	371,0
Dez	17,2	11,6	5,7	31	175,7
				365	0,0

Fonte: MATOS, 2013.

Novamente, pode-se notar na Tabela 1 e Tabela 2 que o armazenamento de energia e a utilização da energia armazenada ocorrem todos os dias do ano. Entretanto, de janeiro a junho utiliza-se mais a energia fornecida pelo sistema de armazenamento do que se armazena energia no banco de baterias. No armazenamento por hidrogênio, o sistema possui comportamento semelhante de janeiro a julho.

A Tabela 3 apresenta os valores da energia elétrica em kWh disponibilizada, excedente, armazenada, faltando e a fornecida pelo sistema de armazenamento para complementar e disponibilizar a energia média diária de 36,41kWh com armazenamento pelo banco de baterias. A partir da Tabela 3 pode-se observar que ao final de um ano o saldo entre a energia elétrica armazenada e fornecida pelo banco de baterias é igual a zero.



Tabela 3 - Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento com banco de baterias na cidade de Fortaleza. \*D é o número de dias do mês \*\*A é energia armazenada \*\*\*FSA é energia fornecida pelo sistema de armazenamento.

Banco de Baterias							
Mês	D*	Disponibilizada	Excedente	A**	Complementada	F <sub>SA</sub> ***	A-F <sub>SA</sub>
Jan	31	1128,7	515,8	404,0	502,3	528,7	-124,7
Fev	28	1019,5	419,8	328,8	466,7	491,3	-162,4
Mar	31	1128,7	318,5	249,5	609,9	642,0	-392,5
Abril	30	1092,3	294,9	231,0	594,0	625,2	-394,2
Mai	31	1128,7	439,4	344,2	548,7	577,6	-233,4
Jun	30	1092,3	463,2	362,8	512,3	539,2	-176,4
Jul	31	1128,7	661,1	517,8	487,6	513,3	4,5
Ago	31	1128,7	828,4	648,9	367,6	386,9	262,0
Set	30	1092,3	844,1	661,2	258,6	272,2	389,0
Out	31	1128,7	854,3	669,1	285,0	300,0	369,1
Nov	30	1092,3	802,6	628,7	283,7	298,7	330,0
Dez	31	1128,7	700,9	549,0	398,8	419,8	129,2
							0,0

Fonte: MATOS, 2013.

A energia excedente é destinada ao armazenamento. Entretanto, devido à eficiência do processo de armazenamento, a energia efetivamente armazenada é menor. Já a energia fornecida pelo sistema de armazenamento (FSA) é o maior do que a energia complementada também devido a eficiência dos equipamentos envolvidos na utilização da energia armazenada.

De acordo com a Tabela 4, pode-se observar que a energia excedente para produção de hidrogênio é maior do que a energia armazenada no banco de baterias todos os meses. Isto se deve à menor eficiência global de conversão ( $\eta_T$ ) pela alternativa do uso do hidrogênio, que exige um maior gasto de energia elétrica.

Tabela 4 - Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento através do hidrogênio na cidade de Fortaleza. \*D é o números de dia do mês \*\*A é energia armazenada \*\*\*FSA é energia fornecida pelo sistema de armazenamento.

H <sub>2</sub>							
Mês	D*	Disponibilizada	Excedente	A**	Complementada	F <sub>SA</sub> ***	A-F <sub>SA</sub>
Jan	31	704,0	691,6	415,3	253,4	555,7	-140,4
Fev	28	635,9	573,8	344,5	237,1	520,0	-175,4
Mar	31	704,0	473,0	284,0	339,7	745,0	-461,0
Abril	30	681,3	446,6	268,2	334,7	734,0	-465,8
Mai	31	704,0	612,8	367,9	297,4	652,2	-284,2
Jun	30	681,3	634,4	380,9	272,5	597,7	-216,7
Jul	31	704,0	838,0	503,2	239,9	526,1	-23,0
Ago	31	704,0	1023,4	614,5	137,8	302,3	312,2
Set	30	681,3	1079,1	647,9	82,6	181,1	466,8
Out	31	704,0	1091,9	655,6	97,9	214,7	440,9
Nov	30	681,3	1047,4	628,9	117,6	257,9	371,0
Dez	31	704,0	890,4	534,6	163,7	358,9	175,7
							0,0

Fonte: MATOS, 2013.

Ainda de acordo com a Tabela 3 e a Tabela 4, também fica notório que outubro é o mês no qual mais se poupa energia, seja na forma de energia propriamente dita ou pelo vetor energético hidrogênio, e que menos se utiliza esta energia para complementar a energia média disponibilizada pelo sistema. E Abril e Março são os meses nos quais menos se armazena energia e mais se utiliza a energia armazenada para disponibilizar a energia média ao sistema.

#### 4.2 Hidrogênio Produzido e Consumido Pelo Sistema

A Tabela 5 apresenta o saldo entre os valores mensais em gramas do hidrogênio produzido com a energia elétrica excedente e o utilizado para alimentar a CaC que permitirá disponibilizar todos os dias do ano a mesma quantidade de energia elétrica as famílias.

Tabela 5 - Hidrogênio em gramas produzido e utilizado pelo sistema mensalmente

Mês	H <sub>2</sub> por dia médio (g)			H <sub>2</sub> por mês (g)
	Produzido	Utilizado	Saldo	Saldo
Jan	339,9	-454,8	-114,9	-3563,3
Fev	312,2	-471,2	-159,0	-4451,6
Mar	232,5	-609,8	-377,3	-11696,9
Abril	226,8	-620,8	-394,0	-11820,1
Mai	301,2	-533,8	-232,6	-7211,4
Jun	322,2	-505,5	-183,3	-5499,0
Julho	411,8	-430,6	-18,8	-582,3
Ago	503,0	-247,4	255,5	7921,8
Set	548,0	-153,2	394,8	11844,6
Out	536,6	-175,8	360,8	11186,2
Nov	531,9	-218,1	313,8	9414,3
Dez	437,6	-293,8	143,8	4457,7
Total				0,0

Fonte: MATOS, 2013.

A partir da Tabela 5 pode-se observar que de Janeiro a Julho o saldo de hidrogênio é negativo, significando que durante os dias destes meses se utiliza mais do que se produz hidrogênio. Por outro lado, de Agosto a Dezembro o saldo de hidrogênio é positivo, ou seja, em média se produz mais do que se consome deste gás. Além disso, ao final de um ano a soma dos saldos resultou em 0,0 g excedente de hidrogênio.

Com essas quantidades mensais de hidrogênio produzido é possível dimensionar o reservatório deste gás, o que não faz parte dos objetivos deste trabalho, pois envolve uma série de hipóteses como a pressão do gás, o uso ou não de compressores, etc., que não influem na análise técnica aqui realizada, apesar de impactar de forma importante a análise dos custos do sistema que também não faz parte do escopo deste artigo.

#### 4.3 Quantidade de Famílias Atendidas Pelo Sistema nos Dois Tipos de Armazenamento

Para a realização do cálculo das quantidades de famílias atendidas nos dois tipos de armazenamento foram considerados os seguintes parâmetros: a energia média diária disponibilizada em cada tipo de armazenamento, o número de dias do menor mês do ano que é fevereiro, com 28 dias e consumo médio mensal de 60 kWh, que de acordo com

a COELCE (2013) corresponde ao consumo médio das novas ligações feitas pela concessionária no Programa LPT no Estado do Ceará.

Deste modo, estima-se que o sistema com armazenamento de eletricidade a partir do banco de baterias pode atender cerca de 17 famílias que vivem em comunidade isoladas e o sistema com produção de hidrogênio e posterior reconversão em energia elétrica pode atender aproximadamente 11 famílias, uma vez que a energia disponibilizada em cada caso foram respectivamente 1.019,5 kWh e 635,9 kWh para o mês de fevereiro.

#### 4.4 Emissões de CO<sub>2</sub> Evitadas

Para estimar as emissões evitadas anualmente em tCO<sub>2</sub> foram utilizados o fator de conversão da UNEP de 0,2667 tCO<sub>2</sub> por MWh e a metodologia de MDL para Eletrificação de comunidades rurais usando fontes renováveis de energia (CDM, 2012a). A Tabela 6 mostra os valores de emissões em tCO<sub>2</sub> evitadas ao substituir gerador a diesel (que disponibilizaria a mesma quantidade de energia) pelo sistema com um dos tipos de armazenamento.

Tabela 6 - Energia disponibilizada, excedente, armazenada, complementada, fornecida pelo sistema de armazenamento e o saldo de energia no armazenamento através do hidrogênio na cidade de Fortaleza.

Forma de armazenamento	Emissões evitadas no ano (tCO <sub>2</sub> ) UNEP	Emissões evitadas no ano (tCO <sub>2</sub> ) MDL
Sistema de hidrogênio	2,2	12,1
Banco de baterias	3,5	18,7

Fonte: MAIANA, 2013.

De acordo com a Tabela 6, pode-se observar que independentemente da metodologia utilizada o sistema com armazenamento por banco de baterias evita mais emissões do que aquele que utiliza o hidrogênio, e isto se deve ao fato do banco de baterias disponibilizar uma maior energia média diária.

Ainda segundo a Tabela 6 é notório que os valores encontrados pela metodologia de projetos de MDL de pequena escala são aproximadamente cinco vezes maiores do que os obtidos com o fator da UNEP.

A diferença entre os valores apresentados na Tabela 6 se deve, principalmente, a cinco pontos. Primeiro, a diferença entre os fatores de conversão já que o da UNEP é 0,2667 tCO<sub>2</sub>/MWh enquanto que o menor fator da metodologia do MDL é 1 tCO<sub>2</sub>/MWh.

Segundo, a provável diferença entre a eficiência dos geradores a Diesel considerada em cada caso. Terceiro ao fator da UNEP não necessariamente considera projetos de pequena escala e de fontes renováveis de energia. Quarto, a metodologia do MDL considera diferentes fatores de emissão para cada faixa de consumo de uma mesma unidade consumidora, como 6,8 tCO<sub>2</sub>/MWh para os primeiros 55 kWh, 1,3 tCO<sub>2</sub>/MWh para consumo entre 55 e 250 kWh e 1 tCO<sub>2</sub>/MWh para consumo superior a 250 kWh. Quinto, o fator da UNEP é um dado do ano de 2000 enquanto a metodologia do MDL é de 2012.

Por fim, as emissões tCO<sub>2</sub> evitadas por ano pelo sistema são baixas quando comparadas a outros projetos de redução de emissões, tanto com o fator da UNEP quanto na metodologia do MDL para projetos de pequena escala, devido ao pequeno porte do sistema em questão. Entretanto, pode-se associá-lo a outros sistemas semelhantes igualmente de pequeno porte, de forma a se propor projetos do tipo MDL Programáticos (ARAÚJO, 2008). Neste caso, a utilização da metodologia do MDL é a mais adequada, pois além de fornecer valores mais favoráveis foi fornecida pelo United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de várias fontes de dados solarimétricos mostrou que os fornecidos pelo CRESESB de radiação solar apresentaram-se mais consistentes que os dos Atlas, pois foram obtidos pela inserção da latitude e longitude exatas da cidade de Fortaleza. A radiação diária solar média mensal na cidade de Fortaleza está na faixa de 4,58 a 6,39 kWh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

Da mesma forma, a análise de dados da velocidade do vento para a cidade de Fortaleza indicou que aqueles disponibilizados pela EMBRAPA apresentaram maior consistência e estavam dentro das faixas de valores apresentadas nos Atlas Eólicos e por isso foram utilizados neste trabalho. A velocidade média mensal do vento na cidade de Fortaleza a 30m de altura encontra-se na faixa de 3,1 a 5,8 m/s.

Pôde-se concluir também que a geração de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos e aerogerador do sistema proposto no projeto de P&D ANEEL e analisado neste trabalho não funcionaram de modo complementar, pois se verificou que a energia elétrica mensal gerada pelos painéis fotovoltaicos foi de 1,4 a 9,1 vezes superior à energia produzida pelo aerogerador, apesar dos valores nominais dos equipamentos escolhidos terem sido similares (respectivamente 5 kWp e 6 kW).

A partir das análises feitas pode-se também concluir que o sistema sem armazenamento seria praticamente inviável, pois só teria como disponibilizar energia elétrica às famílias quando houvesse luz solar, já que a energia elétrica gerada pelo aerogerador é mínima.

O sistema proposto com armazenamento por banco de baterias consegue atender a 17 famílias enquanto o sistema com armazenamento de hidrogênio 11 famílias, pois a energia diária disponibilizada pelo banco de baterias é de 36,4 kWh e pelo sistema de hidrogênio é 22,7 kWh.

Em todos os dias do ano ocorrem o armazenamento de energia excedente e a utilização da energia armazenada, mesmo em Outubro, que é o melhor mês de geração de energia elétrica pela parte solar e eólica. Portanto, neste mês armazena-se mais energia do que se utiliza da energia armazenada. No mês de Abril, que é o pior mês de geração dos painéis fotovoltaicos e do aerogerador, recorre-se mais à energia armazenada do que se armazena.

No sistema de produção e reconversão de hidrogênio em eletricidade nos meses de Janeiro a Julho, o saldo mensal de hidrogênio é negativo, ou seja, durante os dias destes meses utiliza-se mais do que se produz hidrogênio. Entretanto, de Agosto a Dezembro o saldo de hidrogênio é positivo e deste modo em média produz-se mais do que se utiliza hidrogênio. Sendo assim, ao final de um ano a soma dos saldos de hidrogênio eletrolítico resultou em 0,0 gramas excedentes.

Como era de se esperar, o uso do hidrogênio como meio de armazenamento de energia elétrica é, do ponto de vista da análise de eficiência, menos vantajoso, possuindo um desempenho de aproximadamente três vezes menor daquele obtido com bancos de baterias eletroquímicas. Por outro lado, sabe-se que esses bancos possuem uma vida útil muito menor do que os sistemas baseados no hidrogênio e que, pelo custo das baterias, podem não representar a melhor opção do ponto de vista econômico conforme analisado por Furlan (2008). Entretanto, a análise econômica não foi objetivo deste trabalho.

Por fim, as emissões tCO<sub>2</sub> evitadas por ano pela substituição de gerador a diesel para o sistema com armazenamento de energia elétrica pelo vetor energético hidrogênio foi de 12 tCO<sub>2</sub> e de 19 tCO<sub>2</sub> para armazenamento de eletricidade pelo banco de baterias. Em ambos os tipos de armazenamento as emissões evitadas estão compatíveis com aquelas evitadas com o projeto Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power System, que utilizou a mesma metodologia AMS- I.L versão 01 e que deverá evitar 215 tCO<sub>2</sub> por ano através de 500 unidades consumidoras que estão distribuídas em diferentes comunidades (CDM, 2012b), e isto se deve, principalmente, ao porte do sistema em questão, o que indica como melhor estratégia para este tipo de sistema o uso de projetos de MDL Programático, considerando-se então a substituição de bancos geradores em várias comunidades.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil 3 edição. Brasília. 236p. 2008.

ARAÚJO, P. D. O uso Energético do Hidrogênio produzido por Fontes Renováveis para Aplicação Veicular no Contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Estudo de Caso na Cidade de São Paulo. Trabalho de Doutorado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 2008.

CDM. Clean Development Mechanism. EB Meeting 66 Annex 53. Electrification of rural communities using renewable energy. 27 February - 2 March 2012a. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/EB/index.html>>. Acesso em: Maio 2013.

CDM. Clean Development Mechanism. Sustainable Development Programme of Rural Electrification by Husk Power Systems. 2012b. Disponível em <<http://cdm.unfccc.int/EB/index.html>>. Acesso em: Maio 2013.

CEPEL-CRESESB. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro. 2004.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Potencial Energético Solar – SunData. Disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>>. Acesso em: Fev 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados Climatológicos: Estação Fortaleza, 2003. Ceará. 2004. Disponível em: <[http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/SerDoc/doc\\_86.pdf](http://www.cnpat.embrapa.br/publica/pub/SerDoc/doc_86.pdf)>. Acesso em: Julho 2011.

FUEL CELLS. FUEL CELLS 2000. The Leading Independent Fuel Cell Resource. Disponível em: <<http://www.fuelcells.org/top-200/?country=&state=&ctypedd=1&q=&x=13&y=13>>. Acesso em: Out 2012.

FURLAN, A. L. Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 52p. 2008.

HOMER. Disponível:< <http://homerenergy.com/>>. Acesso em: Mar 2013.

MARTINS et al. Atlas Solarimétrico do Ceará. 2010. 108p. Ceará.

MATOS, M. B. Análise Energética de um Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico com Armazenamento de Energia Elétrica através do Hidrogênio e Banco de Baterias. Tese de Doutorado. Planejamento de Sistemas Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 129 p. 2013.

NITIDOR. Controlli Intelligent per Ambiente Energia e Sicurezza. Disponível em: <<http://www.h2nitidor.it/h2n/category/products/electrolysers>> Acesso em: Junho 2012.

PEREIRA et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2006. 60p. São José dos Campos: INPE. PINHO, J. T. Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia. Barreto, E. J. F. 1ª Edição. Brasília. Ministério de Minas e Energia. 21p. 2008. Disponível em: <[http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes\\_Energeticas\\_para\\_a\\_Amazonia\\_Sintrabalho.pdf](http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Sintrabalho.pdf)>. Acesso em: Maio 2010.

PINTO, S. C. Comunicação via e-mail. Pesquisador do Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio. Agosto 2013.

POLITO, R. Quase R\$1 bilhão no Ceará. Revista Energia Hoje. Editora Brasil Energia. Jan 2011. Disponível em: <<http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2010/12/29/423687/quase-r-1-bilhao-no-ceara.html>> Acesso em: Jun 2011.

SEINFRA Secretaria da Infraestrutura .Atlas Eólico do Potencial Eólico do Ceará. 2011. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/downloads/category/6-energia>>. Acesso em: Jan 2012.

SCHNEIDER. Product Data Sheet Inverter/Charger 865-1000-01. Disponível em <[http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c\\_filepath=/templatedata/Offer\\_Presentation/3\\_Range](http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/renewable-energies/products-offer/range-presentation.page?c_filepath=/templatedata/Offer_Presentation/3_Range)>. Acesso em: Maio 2012.

SMA Solar Technology. Disponível em: [http://www.sma-america.com/en\\_US/products/](http://www.sma-america.com/en_US/products/) Acesso: Abril 2012.

SOUZA, S.N. M. De. Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundária para Produção de Hidrogênio Eletrolítico. Trabalho de Doutorado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 211p. 1998.

STRANGUETO, K. M. Usina Fotovoltaica de 1MWp para Suprimento de Veículos Elétricos: Estimativa da Frota Atendida, Logística de Abastecimento e Emissões de CO2 evitadas. Dissertação de Mestrado. Planejamento de Sistemas de Energéticos. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. 2012.



SWERA. Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em: <http://en.openei.org/apps/SWERA/>. Acesso em: Fev 2012.

TIBA, Chigueru, et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Solarimétricos. 2000. 111p. Recife.

UNEP. United Nations Environment Programme. The GHG Indicator: UNEP Guidelines for Calculating Greenhouse Gas Emissions for Businesses and Non-Commercial Organisations 2000. Disponível em: [http://www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/pdf/GHG\\_Indicator.pdf](http://www.unep.fr/energy/information/tools/ghg/pdf/GHG_Indicator.pdf). Acesso em: out 2012.

U.S. DOE Department of Energy. Hydrogen Analysis Resource Center. Disponível em: [http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/site\\_specific/fuel\\_heating\\_calculator](http://hydrogen.pnl.gov/cocoon/morf/hydrogen/site_specific/fuel_heating_calculator). Acesso em: Junho 2013.

WOOD, D. Small Wind Turbines for Remote Power and Distributed Generation. Wind Engineering volume 34, NO. 3, 241–254 p. 2010.

