

tecnologias alternativas de armazenamento de energia têm sido realizados ao redor do mundo [3][4]. Dentre estas tecnologias, as mais promissoras atualmente são: bombeamento de água, armazenamento térmico com sais fundidos em plantas termo-solares, ar comprimido, volantes de inércia (*flywheels*), eletromagnetos supercondutores, supercapacitores e hidrogênio [5][6]. Particularmente, o armazenamento de energia na forma de hidrogênio vem ganhando destaque em um cenário mundial que tem priorizado a instalação massiva de plantas baseadas em energias renováveis e recursos energéticos ambientalmente sustentáveis [7][8]. O hidrogênio, produzido localmente via eletrólise da água, pode proporcionar um ganho na eficiência energética da planta de geração, conforme demonstrado em estudos relacionados ao aproveitamento da energia vertida turbinável em hidrelétricas [1][2]. Em tais casos, o hidrogênio pode ainda ser utilizado para alimentar veículos elétricos híbridos. A FIGURA 1 mostra um esquema de conversão, armazenamento e uso final de energia envolvendo o hidrogênio como mediador energético, incluindo a possibilidade de comercialização de seu excedente (“transporte” de energia). Em especial, o armazenamento químico de hidrogênio na forma de hidretos metálicos (HMs) passou do estágio de desenvolvimento científico-acadêmico para um estágio comercial incipiente nos últimos anos. Hoje encontram-se disponíveis comercialmente tanques de HMs com densidade de energia ( $\text{kWh/m}^3$ ) e energia específica ( $\text{kWh/kg}$ ) superior a de baterias convencionais, sendo este o seu grande atrativo.



FIGURA 1 – Esquema de conversão, armazenamento e uso final de energia envolvendo o hidrogênio.

Este trabalho apresenta as principais características técnicas, configurações e tipos de HMs disponíveis atualmente, descrevendo suas propriedades e estágios de desenvolvimento. Em seguida, o uso de HMs no armazenamento energético é analisado em um sistema fotovoltaico-hidrogênio em substituição às baterias estacionárias convencionais, tendo em vista a implementação e validação experimental futura do sistema de armazenamento, uma vez que, no Brasil, há pouca experiência com a utilização de HMs em aplicações práticas. O sistema, composto de painéis fotovoltaicos, eletrolisador, tanque de HM e unidade de células a combustível é dimensionado para atender um perfil de demanda residencial baseado na Resolução ANEEL Nº 493/2012 [9] (sistemas SIGFI/MIGDI). Os estudos de simulação, dimensionamento e otimização do sistema de armazenamento e demais recursos energéticos são realizados com o auxílio do aplicativo HOMER 2 (*Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources*) desenvolvido pela HOMER Energy LLC. Os resultados são comparados com um sistema empregando somente baterias e as perspectivas de aplicação dos HMs em sistemas de maior porte são discutidas ao final do trabalho.

## 2.0 - ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM HIDRETOS METÁLICOS

É bastante vasta a gama de materiais e técnicas para armazenamento de hidrogênio por processos de absorção, adsorção e imobilização reacional. Dentre os materiais mais promissores estão os hidretos metálicos a base de magnésio (como  $\text{MgH}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{NiH}_4$ ,  $\text{Mg}_2\text{FeH}_6$ ), alguns capazes de absorver cerca de 5-10% em massa de hidrogênio armazenado [10]-[12] e os de lantânio-níquel ( $\text{LaNi}_5\text{H}_6$ ), que tem a vantagem de operar em torno da temperatura ambiente. De fato, o  $\text{MgH}_2$  e o  $\text{LaNi}_5\text{H}_6$  tem sido os principais hidretos atualmente envolvidos nos projetos de demonstração de sistemas de armazenamento de hidrogênio em baixas pressões [12][13] e se encontram em estágios comerciais [13][14].

Os HMs possuem como principal vantagem em relação ao hidrogênio comprimido uma maior relação kWh por volume e o fato do hidrogênio permanecer inerte quando combinado a um metal na forma de hidreto, garantindo uma maior segurança às instalações. Além disso, os tanques de HM funcionam a baixa pressão, o que lhes

confere segurança adicional em relação aos tanques com hidrogênio comprimido. Em termos de capacidade volumétrica de armazenagem, os tanques de HMs se comparam ao hidrogênio líquido, podendo chegar a cerca de 60 kg de  $H_2$  por  $m^3$  (no caso dos hidretos metálicos a base de magnésio), com a vantagem de não necessitarem de gastos energéticos elevados para liquefazer o hidrogênio. A FIGURA 2 apresenta uma comparação entre a densidade de energia do hidrogênio no estado gasoso (a 1 atm e pressurizado a 150 bar), do hidrogênio sob a forma de hidreto metálico e de uma bateria estacionária de 105 Ah.

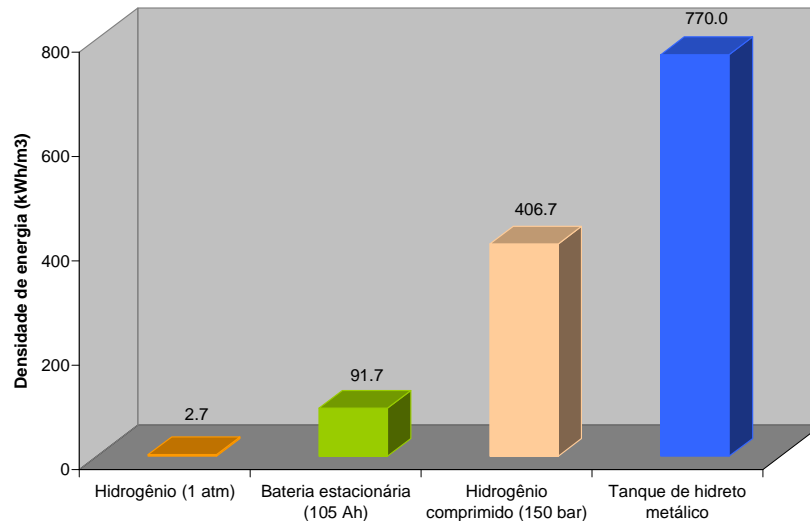


FIGURA 2 – Densidade de energia do hidrogênio em diferentes condições e de uma bateria estacionária.

A Tabela 1 apresenta as características técnicas de dois tanques de hidretos metálicos comerciais de baixa temperatura (tipo  $LaNi_5H_6$ ) quanto à capacidade de armazenamento em kWh, densidade de energia (kWh/L) e energia específica (kWh/kg).

Tabela 1 – Características técnicas de dois tanques de hidretos metálicos comerciais.

	Tanque A <sup>1</sup>	Tanque B <sup>2</sup>
Volume equivalente de hidrogênio armazenado em litros normais (NL)	1500	7000
Capacidade nominal (kWh) <sup>3</sup>	4,49	20,98
Volume (L)	5,78	32,75
Densidade de energia	(kWh/L)	0,77
	(kWh/m³)	0,64
	770	640
Massa (kg)	14,00	90,00
Energia específica (kWh/kg)	0,32	0,23

1. Referência: Tanque Labtech HBond-1500 L [14].
2. Referência: Tanque Labtech HBond-7000 L [14].
3. Capacidade nominal calculada com base no Poder Calorífico Inferior (PCI) do hidrogênio nas condições normais (0 °C e 1 atm), igual a 0,0029967 kWh/L.

As principais vantagens dos HMs em relação às baterias estacionárias convencionais são: maior relação kWh por massa e volume (alguns materiais são capazes de absorver de 5 a 7% do peso do tanque em hidrogênio), modularidade e escalabilidade, capacidade de armazenamento por longos períodos de tempo (os HMs não apresentam o efeito de auto-descarga das baterias), capacidade de operar com profundidade de carga e descarga em torno de 100% (em geral, a profundidade de descarga das baterias convencionais é de, no máximo, 50%), são ambientalmente amigáveis (não apresentam os problemas de descarte e contaminação do meio ambiente das baterias) e durabilidade (tempo e ciclos de uso) superior a das baterias convencionais. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre uma bateria estacionária e um tanque de HM de volume físico semelhante. Observa-se que a capacidade de armazenamento de energia do tanque de HM é cerca de 7,5 maior do que a da bateria estacionária convencional. Nesta comparação, não está sendo levado em consideração o fato de que em uma aplicação real, a profundidade de descarga dos tanques de HM é aproximadamente o dobro da profundidade de descarga das baterias. Por outro lado, para o caso do tanque de HM, a densidade de energia calculada corresponde à exergia química do hidrogênio (aproximadamente igual ao PCI) por unidade de volume.

Em uma aplicação real de uso de eletricidade, uma parcela considerável da exergia química do hidrogênio é destruída (em função da ineficiência do equipamento de conversão para energia elétrica). Estima-se que a destruição de exergia seja de 45%, uma vez que a eficiência da célula combustível, considerada no processo de conversão em eletricidade, é de 55%.

Definindo-se o índice densidade de energia efetiva (relação entre energia elétrica disponibilizada pelo sistema de armazenagem em uma aplicação e seu volume) observa-se que, no caso dos tanques de HMs, a densidade de energia efetiva (kWh/L) estimada é cerca de 55% da densidade de energia “bruta”. No caso das baterias

convencionais, a densidade de energia efetiva estimada é metade da apresentada na Tabela 2, em função do fato que a profundidade de descarga máxima nas aplicações ser de aproximadamente 50%.

Tabela 2 – Comparação entre um tanque de hidreto metálico e uma bateria estacionária convencional típica.

	Tanque A <sup>4</sup>	Bateria estacionária <sup>5</sup>
Capacidade nominal (kWh) <sup>6</sup>	4,49	0,60 (@ 20h)
Volume (L)	5,78	6,28
Densidade de energia (kWh/L)	0,77	0,10
Densidade de energia efetiva estimada (kWh/L)	0,42	0,05
Massa (kg)	14,00	11,6
Energia específica (kWh/kg)	0,32	0,05

4. Referência: Tanque Labtech HBond-1500 L [14].

5. Referência: Bateria estacionária Tudor 12TE45 [15].

6. Capacidade nominal do tanque calculada com base no PCI do hidrogênio nas condições normais (0 °C e 1 atm), igual a 0,0029967 kWh/L. Capacidade nominal da bateria calculada com base na sua tensão de flutuação (13,4 V) e capacidade em Ah (45 Ah @ 20h).

### 3.0 - SISTEMA PROPOSTO

Para a realização do estudo e análise dos hidretos metálicos como armazenadores de energia, é empregado o sistema fotovoltaico-hidrogênio (PV-hidrogênio) apresentado na FIGURA 3. Trata-se de um sistema fotovoltaico de pequeno porte, isolado da rede elétrica, que se propõe atender uma carga local com consumo mensal de 30 kWh. Além dos painéis fotovoltaicos, o sistema é composto de um eletrolisador, uma unidade de célula a combustível PEM e tanques de HMs, que são empregados em substituição às baterias convencionais. Optou-se por demonstrar o uso dos HMs em um sistema PV isolado de pequeno porte (e não em um sistema hidroelétrico ou eólico) devido à facilidade em reproduzir tal arranjo posteriormente nas instalações do Cepel e realizar sua validação experimental, dada a disponibilidade de recursos e equipamentos no local (como espaço físico, painéis fotovoltaicos, CaCs etc). Além disso, o fato de se ter acesso aos dados reais de irradiação solar medidos nas proximidades favorece ainda mais a escolha de um sistema PV-hidrogênio para a demonstração da tecnologia dos HMs, tendo em vista sua implementação para confrontação dos resultados simulados com os experimentais.

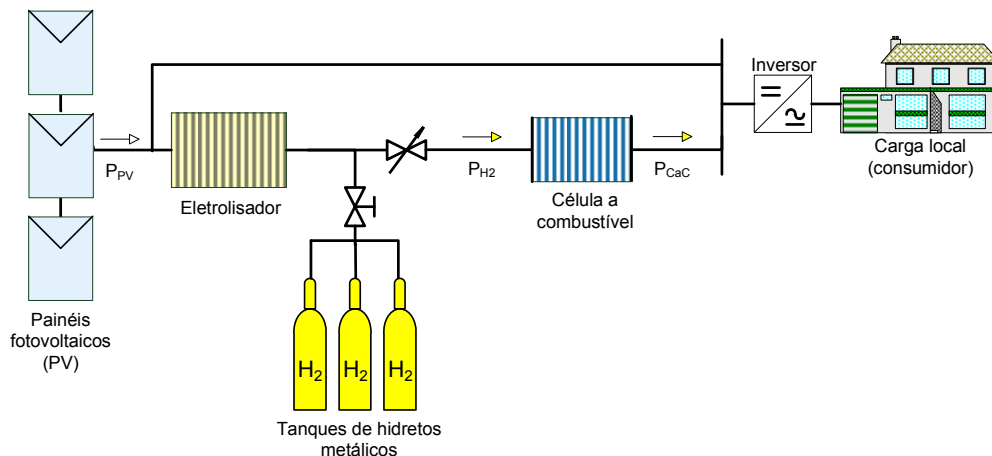


FIGURA 3 – Sistema com armazenamento de energia com hidrogênio proposto.

O sistema fotovoltaico-hidrogênio é dimensionado de modo a atender às condições de fornecimento de energia estabelecidas na Resolução Normativa ANEEL 493/2012 [9] para uma unidade consumidora com consumo mensal de 30 kWh (SIGFI 30), o que equivale aproximadamente a 1 kWh por dia. A Resolução ANEEL estabelece ainda que o sistema de geração SIGFI 30 deve ser capaz de fornecer um pico de potência de 0,5 kW. Deste modo, foi escolhido o perfil de demanda mostrado na FIGURA 4 para ser utilizado nas simulações. Tal perfil é baseado no padrão de uma unidade consumidora rural isolada típica, conforme apresentado em [16].

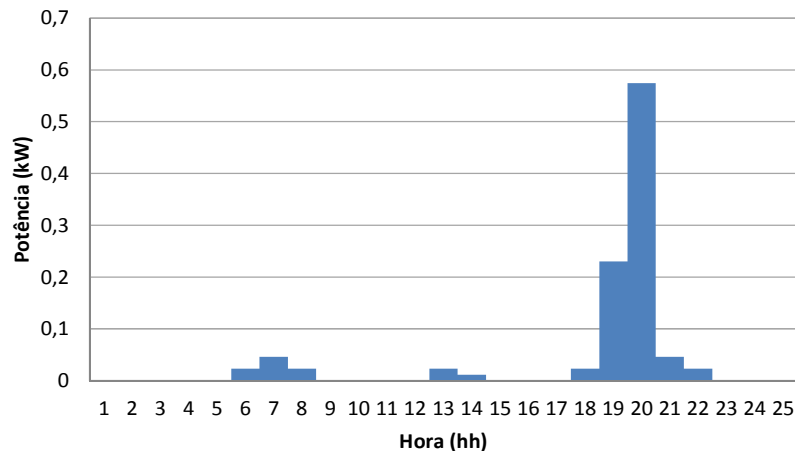


FIGURA 4 – Perfil de demanda para o padrão SIGFI 30 kWh/mês baseado em [16].

Foi verificado em cálculos preliminares envolvendo as eficiências dos equipamentos do sistema PV-hidrogênio que a potência mínima dos painéis fotovoltaicos necessária para atender, com segurança, a um padrão de carga SIGFI 30 é de 1,25 kW. Por esta razão, foram considerados nas simulações do sistema PV-hidrogênio e PV-bateria dois conjuntos de painéis fotovoltaicos, um de 1,25 kW (5 painéis de 250 W) e outro de 1,5 kW (6 painéis de 250 W).

Foi considerado para o sistema PV-hidrogênio da FIGURA 3 um eletrolisador comercial do fabricante H2Planet com capacidade de produção de hidrogênio de 0,65 m<sup>3</sup>/h. A Tabela 3 apresenta as características técnicas deste eletrolisador, incluindo sua eficiência, calculada com base nos dados informados pelo fabricante.

Tabela 3 – Características técnicas do eletrolisador <sup>7</sup>.

Eletrólito	Alcalino
Produção de hidrogênio (m <sup>3</sup> /h)	0,65
(L/min)	10,8
Pressão de saída (bar)	12
Consumo de EE (kWh/m <sup>3</sup> )	5,54 (na pot. máx.)
Consumo de água (L/h)	N.I.
Eficiência (%)	54,1

7. Referência: Eletrolisador H2planet modelo Hy-Flow 050HP [17].

N.I.: não informado.

Uma unidade comercial de células a combustível (CaCs) de 1 kW do fabricante Horizon Fuel Cell Technologies [18] foi escolhida para o sistema fotovoltaico-hidrogênio da FIGURA 3. As características técnicas desta unidade são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características técnicas do empilhamento de células a combustível.

Potência nominal	1 kW
Eletrólito	PEM
Número de CaCs individuais	48
Consumo de hidrogênio (m <sup>3</sup> /h)	0,84 (@ 1 kW)
(L/h)	14 (@ 1 kW)
Pressão de entrada (bar)	0,45-0,55
Eficiência (%) <sup>10</sup>	55

8. Referência: Empilhamento de CaCs Horizon modelo H-1000 [18].

9. Eficiência experimental obtida de [19].

#### 4.0 - SIMULAÇÃO DO SISTEMA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

##### 4.1 Dados de irradiação solar e potência disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos

Os dados de irradiação solar utilizados nas simulações foram obtidos do *síte* do CRESESB [20] e se referem às medições da irradiação global diária média no plano horizontal (médias históricas) realizadas no bairro da Penha no Rio de Janeiro, local onde se encontra a estação de medição mais próxima das coordenadas do Cepel (22°51' S, 43°14' O). Tais dados são exibidos na FIGURA 5.

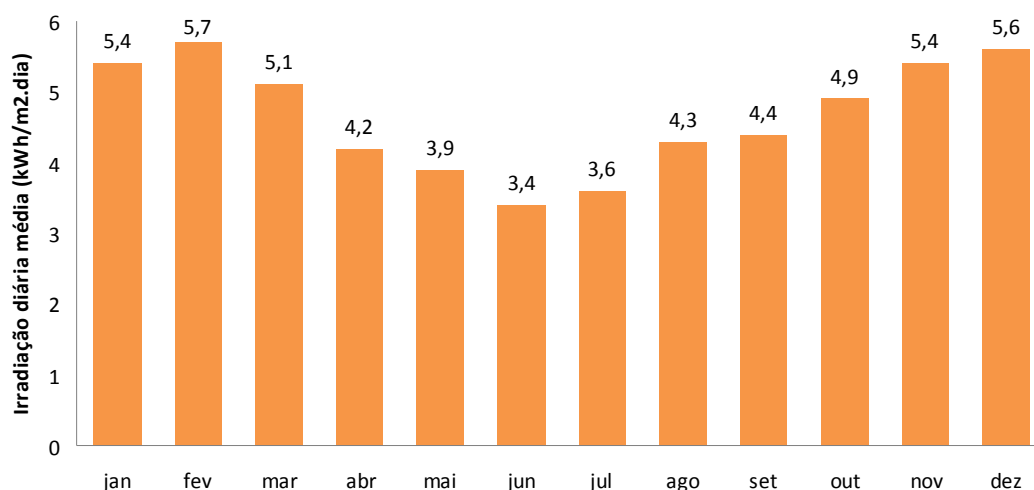


FIGURA 5 – Irradiação solar diária média medida (referência: 22°51' S, 43°14' O).

Os parâmetros dos painéis fotovoltaicos utilizados na simulação no HOMER são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros dos painéis fotovoltaicos adotados na simulação no HOMER.

Potências de pico (kW)	1,25 e 1,5
Inclinação do painel ( <i>slope</i> ) (graus decimais)	22,85
Fator de atenuação ( <i>derating factor</i> ) (%)	72
Azimute ( <i>Azimuth</i> ) (%)	180 (Norte)
Refletância do solo ( <i>ground reflectance</i> ) (%)	20

Os dados de irradiação solar da FIGURA 5 foram fornecidos ao HOMER para o cálculo da geração da potência horária disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos para cada dia do ano, levando em conta os parâmetros mostrados na Tabela 5 e as variações meteorológicas locais (cobertura de nuvens, por exemplo) que podem atenuar a potência nos terminais dos painéis. As potências elétricas disponibilizadas pelos painéis fotovoltaicos no mês de maior insolação (janeiro) e menor insolação (junho) são mostradas na FIGURA 6.

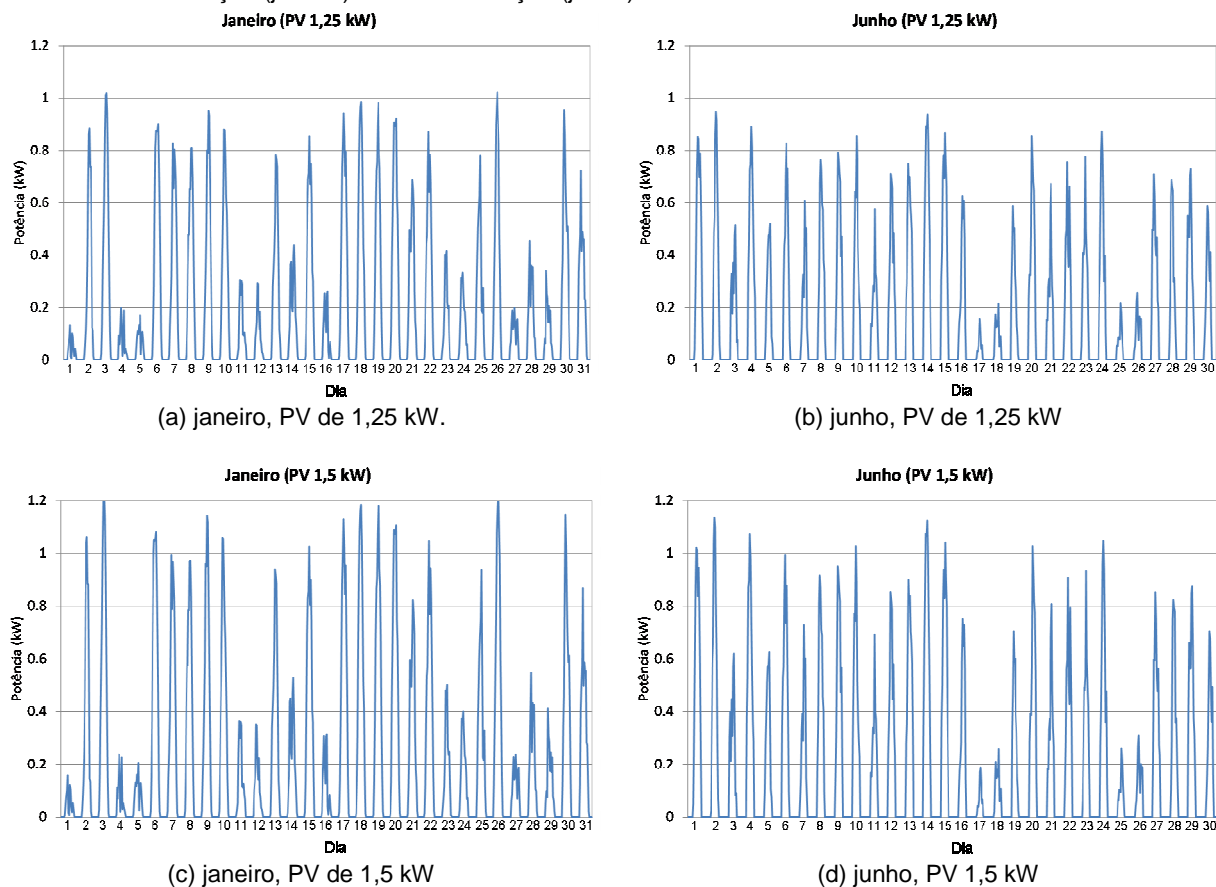


FIGURA 6 – Potência elétrica disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos (dados gerados no HOMER a partir dos dados da FIGURA 5).

#### 4.2 Metodologia de cálculo do estado de carga

A quantidade de energia acumulada no tanque de hidretos metálicos, denominada aqui como “estado de carga” em analogia às baterias estacionárias, é calculada em uma base de tempo diária, utilizando a seguinte formulação:

$$EQ_{Ac(d)} = EQ_{Ac(d-1)} + EE_{Exc.(d)} \eta_{Elet} - C_{n.a.} / \eta_{CaC}, \quad (1)$$

onde:

- $EQ_{Ac(d)}$  é a energia química acumulada no dia (d) no tanque de HM em kWh;
- $EQ_{Ac(d-1)}$  é a energia química residual do dia anterior (d - 1) em kWh;
- $EE_{Exc(d)}$  é a energia elétrica (em kWh) excedente dos painéis fotovoltaicos no dia;
- $\eta_{Elet}$  é a eficiência do eletrolisador, considerada igual a 54,1 % (conferir Tabela 3);
- $C_{n.a.}$  é o valor (em kWh) da carga elétrica não atendida no dia;
- $\eta_{CaC}$  é a eficiência da unidade de células a combustível, considerada igual a 55 % (conferir Tabela 4).

As simulações foram realizadas considerando um tanque de HMs de capacidade de armazenamento de 4,49 kWh (“Tanque A” apresentado na Tabela 1), o valor da eficiência do eletrolisador mostrado na Tabela 3 e da unidade de células a combustível mostrado na Tabela 4. A variação do estado de carga do tanque de HMs, calculado dia a dia utilizando (1), é mostrada na FIGURA 7 (a) para um conjunto PV de 1,25 kW e na FIGURA 7 (b) para um conjunto PV de 1,5 kW, para o período de um ano.

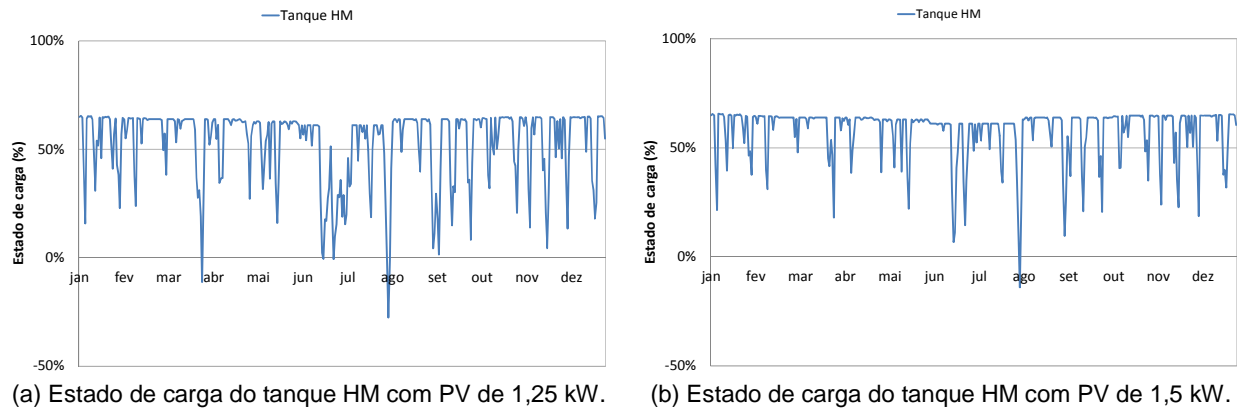


FIGURA 7 – Variação do estado de carga de um tanque de HM de 4,49 kWh no atendimento de um perfil de demanda SIGFI 30.

No caso do sistema com 1,25 kW de painéis fotovoltaicos (FIGURA 7 (a)) verifica-se que há interrupções no fornecimento de energia em dois dias, 27/março e 3/agosto (pontos em que a curva cruza a linha de 0% do estado de carga), com duração de três e quatro horas, respectivamente. No sistema com PV de 1,5 kW (FIGURA 7 (b)) há descontinuidade no fornecimento energia somente no dia 3/agosto, sendo que este evento tem duração de três horas. Em ambos os casos, tais interrupções estão dentro da faixa de tolerância do parâmetro de referência DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) da Resolução ANEEL 493/2012, que é de 216 horas mensais e de 648 horas anuais. Deste modo, verifica-se que os sistemas PV-hidrogênio com 1,25 kW e 1,5 kW de painéis fotovoltaicos atendem de forma satisfatória um perfil de demanda baseado no padrão de carga SIGFI 30 empregando apenas um tanque de HM de 5,78 litros de volume físico e capacidade de armazenamento de 4,49 kWh. Deve-se notar que o fato do tanque de HM poder variar seu estado de carga de zero a quase cem por cento o habilita para aplicações que requerem grandes profundidades de descarga, o que não seria possível com baterias estacionárias convencionais.

De forma análoga, os cálculos do estado de carga foram realizados para bancos de baterias estacionárias convencionais de volume físico semelhante ao do tanque de HMs, utilizando os dados informados na Tabela 2. Foram utilizadas diversas configurações, variando o número de baterias do banco a cada simulação, de modo a se identificar o número mínimo de baterias que atenderia o mesmo perfil de demanda de forma satisfatória. Apresenta-se na FIGURA 9 os resultados com a substituição do tanque de HM, eletrolisador e CaCs por bancos de baterias.

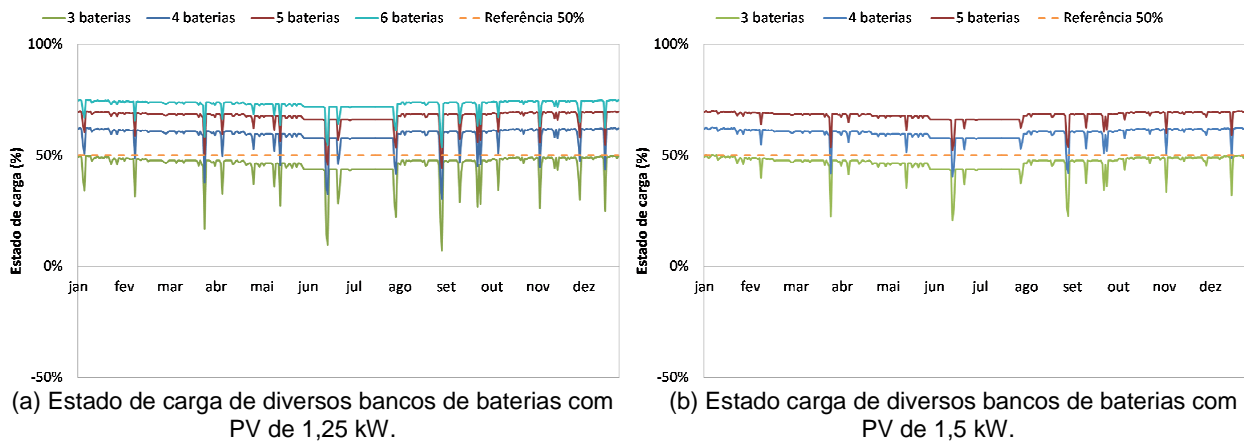


FIGURA 8 – Estado de carga do banco de baterias.

Levando em conta que, em geral, não se permite que a profundidade de descarga de uma bateria ultrapasse 50% de seu estado de carga, verifica-se que o número mínimo de baterias que atenderia a uma carga SIGFI de 30 kWh/mês, mantendo-se os mesmos painéis fotovoltaicos, seria de seis e cinco unidades de 45 Ah para os sistemas PVs de 1,25 kW e 1,5 kW, respectivamente.

Para fins de comparação, mostra-se na FIGURA 9 o resultado obtido com a simulação do sistema fotovoltaico-hidrogênio empregando 1,5 kW de painéis fotovoltaicos e um tanque de HMs de 4,49 kWh e o equivalente em termos de baterias estacionárias convencionais. Os resultados revelam que, mesmo levando em conta as eficiências de cada componente do sistema (eletrolisador e células a combustível), o uso de HMs é ainda vantajoso no que se refere à densidade de energia ou densidade de energia efetiva se comparado com o sistema com baterias, pois, neste último, seriam necessárias cinco baterias de volume físico semelhante ao do tanque de HMs para atender minimamente à um perfil de demanda baseado na Resolução ANEEL 493 (SIGFI/MIGDI), ao passo que, no sistema proposto com HMs, seria necessário apenas um tanque de HM de 5,78 litros/4,49 kWh.

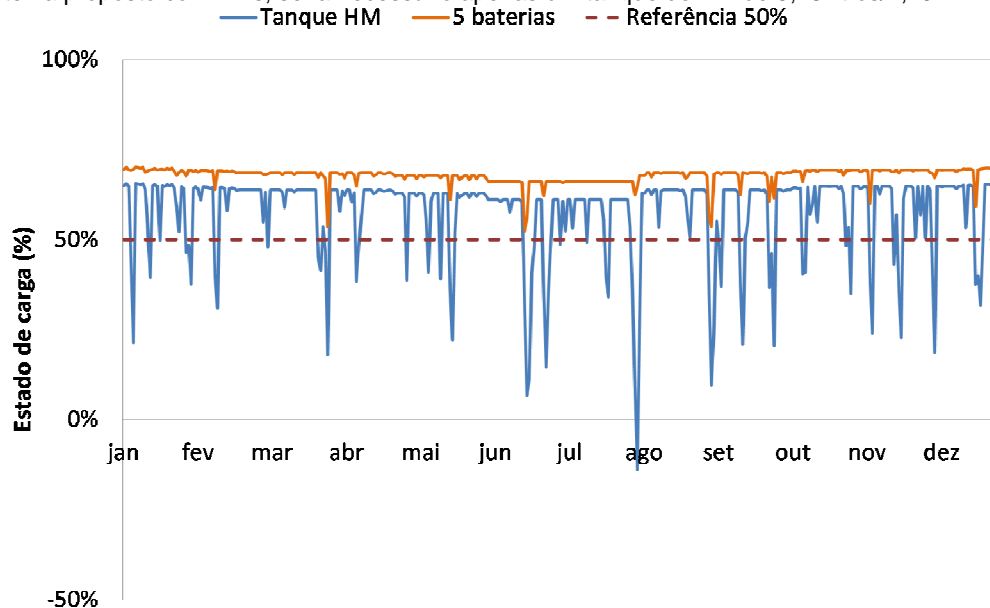


FIGURA 9 – Comparação do sistema fotovoltaico-hidrogênio (1,5 kW de PV) empregando um tanque de HMs de 4,49 kWh com o equivalente fotovoltaico-baterias.

## 5.0 - ANÁLISE DE CUSTOS SIMPLIFICADA

O custo de instalação de um sistema de armazenamento composto por um eletrolisador alcalino com capacidade de produção de 2,66 metros cúbicos de hidrogênio por hora (eletrolisador H2planet modelo Hy-Flow 3HP [17]) e tanques de hidretos metálicos (conferir Tabela 1) é mostrado na Tabela 6 em função da capacidade de armazenamento (volumétrica e energética bruta). Os valores foram tomados diretamente com os fabricantes ou com seus representantes no Brasil. Nesta tabela é mostrado também o tempo de carga de cada conjunto de tanques de HMs para um mesmo eletrolisador com vazão de 2,66 m<sup>3</sup>/h. O custo de investimento é calculado somando-se o custo do eletrolisador com o custo dos tanques. O custo do eletrolisador é fixo, de 87000 euros.

Apesar do elevado custo atual de investimento de um sistema de armazenamento com HMs, verifica-se que, conforme se adicionam mais tanques de HMs ao sistema (significando um aumento na capacidade total de armazenamento de energia), o custo por kWh decresce exponencialmente. De fato, um dos fatores que favorece o uso de HMs é sua escalabilidade, pois, utilizando um mesmo eletrolisador, a capacidade de armazenamento do sistema pode ser aumentada através da adição de mais tanques de HMs, até o limite de tempo de carga máximo admitido para o conjunto de tanques em uma determinada aplicação. Tal observação sugere que a aplicação dos hidretos metálicos no armazenamento de energia em sistemas de grande porte (centenas de kWh ou até mesmo MWh) pode ser mais vantajosa do que em sistemas de menor porte.

Tabela 6 – Custo de investimento do sistema de armazenamento composto por um eletrolisador e tanques de HMs.

Quantidade de tanques	Capacidade volumétrica (litros normais de hidrogênio)	Capacidade de armazenamento bruta <sup>10</sup> (kWh)	R\$/kWh	Tempo de carga utilizando eletrolisador de 2,66 m <sup>3</sup> /h de H <sub>2</sub> (h)
1 x 1500 L	1500	4,49	66.734,68	0,56
2 x 1500 L	3000	8,98	34.016,07	1,13
3 x 1500 L	4500	13,48	23.109,87	1,69
1 x 7000 L	7000	20,96	15.319,72	2,63
2 x 7000 L	14000	41,92	8.308,59	5,26
3 x 7000 L	21000	62,88	5.971,55	7,89

10. Calculada com base no PCI do hidrogênio e desconsiderando as perdas na conversão da energia química do H<sub>2</sub> em energia elétrica.

## 6.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou alguns conceitos fundamentais a respeito do uso do hidrogênio como armazenador de energia, imobilizado em hidretos metálicos. Os dados informados por um dos fabricantes permitem dizer que um tanque de HMs comercial é capaz de armazenar cerca de sete vezes mais energia que uma bateria estacionária de volume semelhante. Porém, em uma aplicação para fornecimento de eletricidade, mostrou-se que o volume ocupado por tanques de HMs é cerca de 5 vezes menor do que o de baterias convencionais. Os resultados foram obtidos através da simulação de um sistema fotovoltaico-hidrogênio e comparados com um sistema fotovoltaico utilizando baterias convencionais com profundidade de descarga máxima de 50%.

De fato, fica evidente que a alta densidade de energia (kWh/L) dos tanques de HMs os tornam convenientes para aplicações que requerem armazenamento de energia em espaços reduzidos (como automóveis, barcos, unidades geradoras em ilhas etc). Sistemas de geração que requerem armazenamento da ordem de centenas de kWh ou até mesmo MWh também são aplicações potenciais para os hidretos metálicos, onde o uso de baterias se torna inviável.

O descarte e a periodicidade de troca das baterias é outro ponto que deve ser levado em conta em um projeto envolvendo armazenamento de energia. Neste sentido, o armazenamento com hidretos metálicos se mostra vantajoso em sistemas de geração em regiões remotas e de difícil acesso, onde o custo de substituição das baterias (levando em conta tempo de viagem, combustível e o custo unitário de uma bateria) é superior ao custo de instalação de um sistema fotovoltaico-hidrogênio como o apresentado neste trabalho, pois estima-se que os tanques de HMs tem vida útil superior a das baterias estacionárias típicas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Padilha, L. G. da Trindade, R. F. de Souza, M. Miguel, "An evaluation of the potential of the use of wasted hydroelectric capacity to produce hydrogen to be used in fuel cells in order to decrease CO<sub>2</sub> emissions in Brazil," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, is. 19, pp. 7898–7902, out. 2009.
- [2] M. Rivarolo, J. Bogarin, L. Magistri, A. F. Massardo, "Time-dependent optimization of a large size hydrogen generation plant using "spilled" water at Itaipu 14 GW hydraulic plant," *Int. Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, is. 6, pp. 5434–5443, mar. 2012.
- [3] K. W. Harrison *et al.*, "The wind-to-hydrogen project: operational experience, performance testing, and systems integration," National Renewable Energy Lab. - NREL, Golden-CO, Tech. Rep. NREL/TP-550-44082, mar. 2009.
- [4] L. Valverde, F. Rosa, C. Bordons, "Design, Planning and Management of a Hydrogen-Based Microgrid," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1398–1404, ago. 2013.
- [5] H. Chen *et al.*, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, is. 3, pp. 291–312, mar. 2009.
- [6] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renewable Sustain. Energy Reviews*, vol. 13, is. 6-7, pp. 1513–1522, ago-set. 2009.
- [7] R. Takahashi *et al.*, "Output power smoothing and hydrogen production by using variable speed wind generators," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 2, pp. 485–493, fev. 2010.
- [8] M. Trifkovic, M. Sheikzadeh, K. Nigim, P. Daoutidis, "Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage," *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 169–179, jan. 2014.

- [9] ANEEL, *Resolução Normativa Nº 493/2012*. [online]: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012493.pdf>.
- [10] Hidrogênio energético no Brasil - Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025. Série Documentos Técnicos, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília, ago. 2010.
- [11] A. Züttel, "Hydrogen in Solids and the Materials Challenge for Hydrogen Storage", *Mater. Scien. Mainz*, 2009.
- [12] M., Lototsky, V. Yartys, "Comparative analysis of the efficiencies of hydrogen storage systems utilising solid state H storage materials," In Press, *Journal of Alloys and Compounds*, dez. 2015.
- [13] Sítio do fabricante McPhy Energy [online]: <http://www.mcphy.com/en/>.
- [14] Sítio do fabricante Labtech [online]: <http://www.labtech-hydrogen.com/>.
- [15] Sítio do fabricante Tudor [online]: [http://tudor.com.br/pt\\_br/produtos/estacionaria](http://tudor.com.br/pt_br/produtos/estacionaria).
- [16] G. F. W. Soares, L. S. R. Vieira, F. C. Lopes, "Sistemas mistos constituídos de geradores diesel e baterias para a eletrificação de pequenas comunidades rurais isoladas," In: *Anais do XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XX SNPTTE*, Recife-PE, Brasil, nov. 2009.
- [17] Sítio do fabricante H2planet [online]: <http://www.h2planet.eu/en/products/professional/Electrolysers>.
- [18] Sítio do fabricante Horizon Fuel Cell Technologies: <http://www.horizonfuelcell.com/#!h-series-stacks/c52t>.
- [19] F. C. Lopes, E. H. Watanabe, L. G. B. Rolim, "A Control-oriented Model of a PEM Fuel Cell Stack based on NARX and NOE Neural Networks," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. PP, mar. 2015.
- [20] Sítio do CRESESB [online]: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>.