



ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UM SISTEMA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO USO DE RECURSOS SOLAR, EÓLICO E HIDRÁULICO PARA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO

Ennio Peres da Silva¹ (lh2ennio@ifi.unicamp.br),
Fernando Rezende Apolinário² (rezende@ifi.unicamp.br)
André Luís Furlan² (andrelf@fem.unicamp.br)
Daniel Gabriel Lopes² (danielg@fem.unicamp.br)
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella² (fkv@fem.unicamp.br)
Ana Maria Resende Santos² (aresende@fem.unicamp.br)
Paula Duarte Araujo² (paulaart@fem.unicamp.br)
Antonio José Marin Neto³ (antonio@hytron.com.br)
João Carlos Camargo³ (joao.carlos@hytron.com.br)
Cristiano da Silva Pinto¹ (cspinto@ifi.unicamp.br)
Alexandre Sordi² (asordi@fem.unicamp.br)
Davi Gabriel Lopes² (davig@fem.unicamp.br)

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de uma análise da viabilidade técnica de se implementar um sistema híbrido de fornecimento de eletricidade a partir dos recursos solar, eólico e hidráulico para a produção de hidrogênio através da eletrólise da água. O estudo é fundamentado nos potenciais energéticos dos recursos solar e eólico, nas características técnicas dos painéis fotovoltaicos e dos aerogeradores, na disponibilidade de hidreletricidade fora do pico de consumo do sistema interligado nacional e nas características de funcionamento de eletrolisadores bipolares. Foi elaborado um modelo matemático que considera os parâmetros que descrevem as

1 Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Instituto de Física 'Gleb Wataghin' - IFGW, Departamento de Física Aplicada, Laboratório de Hidrogênio - LH2. Rua Lev Landau, 381; Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas - SP - CEP: 13083-970. Cx Postal: 6039.

2 Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM, Pós Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos - PSE.

3 Hytron - Tecnologia em Hidrogênio. Rua Lauro Vannucci 1020; Jd. Sta. Cândida, Campinas - SP - CEP: 13087-410 Tel.: (19) 3032-2522.



transformações energéticas envolvidas no sistema analisado e que permite a simulação da produção de hidrogênio em diferentes situações de disponibilidade de recursos e de configuração de máquinas, podendo ser aplicado para se estimar o custo do hidrogênio gerado para a situação escolhida.

Palavras-chave: Hidrogênio, Eletrólise, Energia Solar, Energia Eólica, Energia Hidráulica.

ABSTRACT

This paper presents the results of a technical feasibility analysis of a hybrid system implementation to supply electricity from solar, wind and hydro resources, producing hydrogen through water electrolysis. The study relies upon the energy potentials of wind and solar resources, on the technical characteristics of solar panels and wind generators, on the hydro power availability out of the peak of the integrated Brazilian national power grid and on the operating characteristics of bipolar electrolyzers. A mathematical model was developed to take into account the parameters that describe the internal energy transformations of the studied system, allowing for the simulation of hydrogen production, making possible to estimate the cost of the generated hydrogen for the chosen situation.

Keywords: Hydrogen, electrolyze, solar energy, wind energy, hydro energy.

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio (H_2) é considerado por muitos especialistas como um possível substituto aos atuais combustíveis fósseis, seja em sistemas estacionários ou em aplicações veiculares. Gerado através da eletrólise da água, uma das mais bem conhecidas e desenvolvidas formas de obtenção, ele pode funcionar como um vetor energético renovável e com baixíssimos impactos ambientais, desde que obtido a partir de fontes de energia renováveis.

A demanda sempre crescente de energia elétrica no Brasil (renovável em sua grande maioria) tem sido historicamente atendida com a expansão da base hidrelétrica de geração. Estratégias de fornecimento a médio e

longo prazo têm levado a inclusão de novas formas de geração de energia que já apresentam certo grau de viabilidade e com um grande potencial no país.

Este imenso potencial ainda não aproveitado poderia fornecer uma quantidade de eletricidade adicional necessárias para a produção de hidrogênio via eletrólise da água, desde que as condições apresentadas demonstrem a sua viabilidade neste cenário hipotético futuro.

Neste contexto inserem-se as fontes renováveis alternativas de energia tais como a solar e eólica, com imenso potencial disponível. Avaliar o potencial de geração das fontes mencionadas, visando o fornecimento desta energia elétrica adicional necessária para a produção de hidrogênio, é um dos primeiros trabalhos para a análise da viabilidade destes novos sistemas.

Este trabalho apresenta um estudo realizado no sentido de estimar a participação no fornecimento elétrico de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico para a produção eletrolítica de hidrogênio.

O procedimento é fundamentado em parâmetros médios mensais que definem a disponibilidade dos recursos solar e eólico e nas características técnicas dos equipamentos envolvidos. O objetivo é desenvolver um modelo matemático que possibilite que se simule o funcionamento de um dado sistema hipotético, permitindo que se varie a participação de cada fonte, e que possibilite uma estimativa da quantidade de hidrogênio produzido.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA HIPOTÉTICO

O sistema hipotético proposto e analisado consiste de um sub-sistema composto por painéis fotovoltaicos, um sub-sistema composto por aerogeradores e um sub-sistema de eletrólise. A figura 1 apresenta um diagrama esquemático simplificado do sistema.

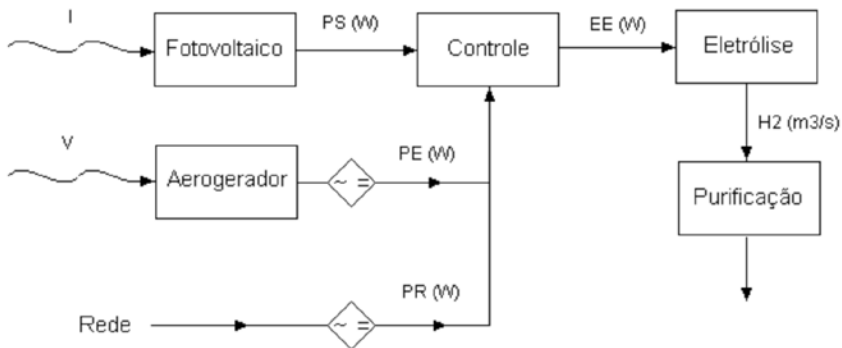


Figura 1: Esquema do sistema de eletrólise analisado.

A avaliação será realizada através da simulação do fornecimento de eletricidade mensal dos sub-sistemas.

3. DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo proposto para a análise considera as ocorrências passadas dos valores que determinam os potenciais de aproveitamento dos recursos energéticos considerados, nas características técnicas dos painéis fotovoltaicos, dos aerogeradores e dos eletrolisadores utilizados.

3.1. Modelo para a energia eólica

A distribuição das ocorrências dos valores da velocidade do vento (v) para o local selecionado e as características de fornecimento elétrico do aerogerador considerado são utilizados para a estimativa da energia fornecida.

Os dados registrados com informações sobre a velocidade do vento normalmente trazem arquivos com valores médios por um período de tempo (dia, mês, ano). Estes valores médios na verdade não revelam como as velocidades ocorrem ao longo do período, mascarando os momentos de calmaria, situação em que o aerogerador nem fornece energia.

A maneira mais apropriada de se avaliar as condições de vento para análise do fornecimento de aerogeradores é através da distribuição estatística destes números. A frequência com a qual um dado valor de velocidade ocorre neste período é descrita por uma função $f(v)$ que representa a distribuição de frequência destes valores.

Este procedimento é capaz de representar como os diferentes valores de v se distribuem estatisticamente em um determinado período de tempo. Na maioria dos casos, na inexistência de dados referentes à ocorrência e velocidade dos ventos é assumida a distribuição de *Rayleigh* (Johansson, 1993), um caso especial da distribuição de *Weibull*. A distribuição de *Rayleigh* é dada pela seguinte função de densidade de probabilidade

$$f(v) = \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot (v_M)^2} \cdot e^{\left(-0.25\pi \cdot \left(\frac{v}{v_M}\right)^2\right)} \quad (1)$$

onde v_M é definida como a velocidade média do período analisado, sendo possível se determinar os valores de $f(v)$ conhecendo-se unicamente este parâmetro médio representativo do período analisado.

Portanto, para a análise aqui realizada foi necessário conhecer, para um dado mês m ($m=1,2\dots 12$), o valor que corresponde à velocidade média do vento no local escolhido para a implementação de uma usina eólica.

Nestas condições, para um aerogerador genérico os valores da potência elétrica gerada (P_{eol}) dependem dos valores de v . Tipicamente, uma turbina eólica não gera nenhuma energia para uma faixa de baixos valores de v . A partir de um certo valor de corte inferior (v_{cin}), por volta de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a potência gerada se comporta quase linearmente com v até que atinja o valor nominal da potência da turbina (P_N), por volta de $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A partir deste valor, a potência elétrica gerada permanece praticamente constante por uma faixa de v que vai até um valor de corte superior (v_{csu}). Conhecendo-se esta função $P_{eol}(v)$ que representa a curva de potência do aerogerador selecionado e a $f(v)$ que corresponde à ocorrência dos valores de v para o local escolhido para sua instalação, é possível estimar a energia elétrica gerada em um dado período de tempo T da seguinte forma:

$$E_{eol} = \int_{v_{cin}}^{v_{csu}} \int_0^T P_{eol}(v) \cdot f(v) \cdot dt \cdot dv = T \cdot P_N \int_{v_{cin}}^{v_{csu}} g(v) \cdot f(v) \cdot dv \quad (2)$$

Sendo: $P_{eol} = P_N \cdot g(v)$ e $g(v)$ normalizada com a potência nominal do aerogerador.

A Fig.(2) apresenta uma representação da seqüência proposta para esta estimativa. Em 2 (a) aparece uma distribuição de *Rayleigh* para um va-

lor de $v_M = 5,0 \text{ m.s}^{-1}$. A figura 2 (b) apresenta uma curva de potência típica de um aerogerador de 1 kW.

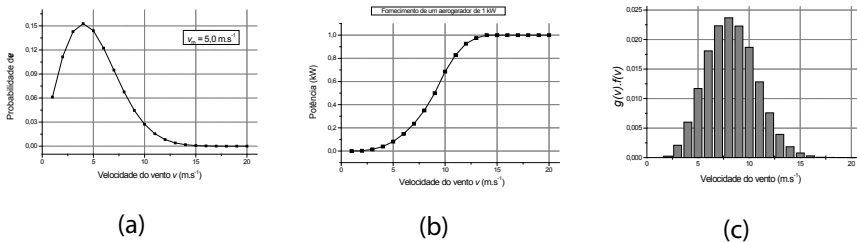


Figura 2 (a) Distribuição de *Rayleigh* ($v_M = 5,0 \text{ m.s}^{-1}$). (b) Curva de potência típica de um aerogerador ($P_N = 1 \text{ kW}$). (c) Resultado numérico intermediário da integral representada na equação 2.

A figura 2 (c) apresenta o resultado parcial do procedimento numérico aplicado na resolução da integral que aparece na equação 2. A soma dos valores representados pelas barras sobre todos os valores de v considerados será igual ao valor do fator de capacidade (FC_{eol}) associado à instalação eólica. Este parâmetro é muito útil no cálculo do custo da energia elétrica fornecida e é definido entre 0 e 1. No caso do exemplo mostrado na figura 2 o valor de FC_{eol} foi calculado em 0,15, o que revela um local pouco favorável para aproveitamento eólico.

3.2. Modelo para a energia solar fotovoltaica

O modelo desenvolvido para estimar a quantidade de energia elétrica fornecida por um dado sistema fotovoltaico é fundamentado no comportamento de parâmetros que descrevem a melhor forma de aproveitamento solar e nas características da transformação fotovoltaica.

A base de dados para a análise do potencial solar-fotovoltaico de uma determinada região será fundamentada nos valores disponíveis no Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2000), que fornece a média mensal da radiação solar incidente por metro quadrado em superfícies horizontais. Com o intuito de se obter um máximo de aproveitamento solar, uma correção deve ser feita, que consiste em inclinar o painel fotovoltaico em um ângulo ótimo β , que está relacionado com a latitude da região estudada.

Dessa forma, parâmetros como o índice de claridade (K_T), a quantidade de radiação solar direta, difusa e de albedo são necessárias para que o cálculo da quantidade da radiação solar média total (H_T) que incide na

superfície de um painel fotovoltaico inclinado esteja próximo do seu ótimo (Duffie & Beckman, 1991).

O índice de claridade (K_T) descreve a fração do valor médio mensal diário da radiação (H_M) numa superfície horizontal pela média mensal diária da radiação extraterrestre (H_o). Como o valor de H_o varia diariamente, Klein (1977) recomenda um dia médio para cada mês que seja representativo deste período para se calcular os valores de interesse.

Assim, para o cálculo dos 12 valores de K_T utilizou-se os valores de H_M disponíveis no Atlas comparados com os respectivos valores de H_o obtidos através da equação (Duffie & Beckman, 1991):

$$H_o = \frac{24 * 3600 * G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta \sin w_s + \frac{\pi w_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (3)$$

onde, G_{sc} é a constante solar, n é o dia do ano (1 a 365), w_s o ângulo solar, ϕ a latitude local e δ a declinação.

Utilizando uma forma adaptada do modelo de Erbs et al. (1982), é encontrada a relação existente entre a média mensal diária da radiação difusa (H_d) e o índice de claridade, estimando que parcela da radiação diária seja de origem difusa. Já a componente relativa ao albedo está relacionada à radiação solar que é refletida das superfícies próximas aos painéis instalados e a refletividade (ρ) dessas superfícies, bem como ao ângulo de inclinação no qual o painel está submetido.

Uma das maneiras para calcular essa média total (H_T), é utilizando o método adotado por Liu e Jordan (1962) e mais tarde por Klein (1977), que considera a radiação difusa e a de albedo como isotrópica. Dessa forma, o cálculo referente a essa média total pode ser expressa da seguinte forma:

$$H_T = \text{Direta} + \text{Difusa} + \text{Albedo}$$

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

onde R_b , é a razão da média diária da radiação direta em superfícies inclinadas pela radiação direta nas superfícies horizontais, calculado através da equação a seguir:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin w'_s + (\pi/180) w'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin w_s + (\pi/180) w_s \sin \phi \sin \delta} \quad (5)$$

com w'_s o ângulo horário solar para um dia médio do mês em superfícies inclinadas. Para uma análise mais aprofundada e cálculos mais precisos envolvendo todas essas variáveis e outros parâmetros ver (Duffie & Beckman, 1991).

Assim, a partir dos valores mensais relativos à radiação total (H_T) na inclinação desejada para a região escolhida, determinou-se a energia total (ou densidade de energia total, em $W.h/m^2$) para cada mês m fazendo-se a multiplicação de H_T pelos respectivos números de dias no mês.

Este valor final foi então utilizado para se estimar a quantidade de energia elétrica gerada por um dado sistema fotovoltaico. Com base nas características do fornecimento fotovoltaico, a energia elétrica gerada por um sistema previamente dimensionado e instalado nesta região pode ser estimada através da relação:

$$E_{tot} = \eta . A . H_T \quad (6)$$

onde η é a eficiência de conversão do painel fotovoltaico e A (m^2) é a área realmente ocupada pelo material semicondutor.

A eficiência da conversão fotovoltaica pode ser influenciada tanto por fatores físicos (temperatura de operação) como por fatores associados à tecnologia envolvidos na fabricação das células (material), sendo estes últimos melhorados constantemente (Lasnier e Ang, 1990). A área total de fotovoltaico instalado atua linearmente determinando tanto a energia elétrica final gerada pelo sistema quanto o custo total da instalação desejada.

3.3. Estimativa da utilização da energia hidrelétrica

A utilização de energia elétrica proveniente de hidrelétricas é analisada neste contexto apenas em caráter complementar, ocorrendo preferencialmente fora do horário denominado de pico de consumo do sistema elétrico nacional. Tal utilização é entendida como fundamental para se otimizar a utilização da planta de produção de hidrogênio, uma vez que trabalhar com um alto valor para o fator de capacidade da planta de eletrólise acarreta em um menor valor para o custo do hidrogênio gerado.

Para se estimar quanto de energia hidrelétrica será necessária mensalmente é preciso conhecer as quantidades de energia elétrica gerada pelos sistemas eólico e fotovoltaico e consumida pelo sistema de eletrólise durante o mesmo período. Assim, para cada mês estimou-se este valor através da relação.

$$E_{hid} = E_{ele} - E_{eol} - E_{fot} \quad (7)$$

Sendo: E_{eol} e E_{fot} as quantidades de energia eólica e fotovoltaica estimadas através dos procedimentos apresentados anteriormente e E_{ele} a quantidade de energia elétrica necessária mensalmente para a eletrólise da água, valor este que vai depender do tamanho da planta e da quantidade de tempo que se pretende operá-la mensalmente, questões estas que serão discutidas a seguir.

4. A ELETRÓLISE DA ÁGUA

Denomina-se eletrólise da água o processo eletroquímico de dissociação onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares e o balanço mássico destas reações acusam somente a decomposição da água. Para tanto, um sistema eletroquímico deve ser desenvolvido, cuja montagem é composta por no mínimo dois eletrodos condutores (cátodo e ânodo) imersos em um eletrólito (solução aquosa ácida ou básica) capaz de transportar íons. Aplicando-se uma diferença de potencial entre os eletrodos esta decomposição acontece enquanto houver o fornecimento de energia elétrica em corrente contínua (Silva, 1991). Para o caso de um meio condutor básico a reação global apresenta:



Para que a eletrólise da água ocorra num processo adiabático deve-se aplicar uma tensão igual a um determinado potencial mínimo, denominado potencial termoneutro (1,482 V), e havendo passagem de corrente elétrica entre os eletrodos as reações eletroquímicas desencadearão a produção de hidrogênio no cátodo (redução) e oxigênio no anodo (oxidação).

Em condições práticas, o potencial de operação de uma célula eletrolítica é caracterizado por um valor superior ao termoneutro, sendo a



eficiência definida pela razão entre este valor teórico e o valor prático de operação, que está diretamente relacionado ao consumo elétrico do eletrolisador pela quantidade de H_2 produzida.

Nas estimativas aqui realizadas, considerou-se a eletrólise alcalina em equipamentos cujo consumo energético seja de aproximadamente 4,43 kWh por $m^3 H_2$ produzido, ou seja, dispositivos com eficiência de 80%, comercialmente disponíveis.

4.1. Dimensionamento da usina de produção eletrolítica de hidrogênio.

O projeto da usina de eletrólise deve ser determinado com base no perfil de fornecimento instantâneo das fontes renováveis alternativas (solar e eólica), de maneira que a potência elétrica máxima esperada para a soma das potências provenientes destas fontes não ultrapasse o valor nominal do sistema de eletrólise.

Por se tratar de duas fontes intermitentes e com um comportamento de fornecimento aleatório (principalmente o fornecimento eólico), tentar estabelecer os momentos de máximo fornecimento para esta soma é uma tarefa pouco provável. Desta forma, se optou por dimensionar a potência relacionada ao sistema de eletrólise como a soma simples destas duas potências com uma pequena correção para o fornecimento fotovoltaico.

A potência nominal de um sistema fotovoltaico é normalmente estabelecida para condições que são raramente (ou nunca) encontradas: 1.000 W/ m^2 e 25 °C. Na prática, é comum estabelecer que o valor realmente alcançado nos melhores momentos não ultrapassa 70% deste valor nominal, estratégia aqui utilizada para se determinar este valor máximo para o fornecimento fotovoltaico.

Para o caso do fornecimento eólico, sabe-se que a potência vai variar ao longo do dia de zero (para baixos valores de v) até o valor da potência nominal (para valores de v maiores ou iguais à aproximadamente 12 $m.s^{-1}$). Neste caso, é esperado que o valor nominal da potência instalada ocorra em diversas situações, sendo o valor máximo para o fornecimento eólico considerado como este valor nominal.

Assim, se estabeleceu uma relação para a determinação da potência nominal para a instalação da planta de eletrólise como

$$P_{ele} = 0,7.P_{fot} + P_{eol} \quad (9)$$

sendo P_{ele} a potência nominal do sistema de eletrólise, P_{fot} a potência nominal da instalação fotovoltaica e P_{eol} a potência nominal da instalação eólica.

Apesar de garantir desta forma que a soma das potências fornecidas por estas duas fontes não ultrapasse em momento nenhum o valor esperado de acordo com o projeto do sistema de eletrólise, tal estratégia fará com que o valor utilizado de energia hidrelétrica apresente um valor relativamente alto. Tal resultado será avaliado na seqüência, quando um exemplo numérico de todo o modelo é desenvolvido.

5. EXEMPLO NUMÉRICO DE UMA INSTALAÇÃO HIPOTÉTICA

Um exemplo numérico para a análise dos resultados obtidos com o modelo proposto neste trabalho é agora desenvolvido. Trata-se de uma instalação hipotética de 1 kW de potência nominal de painéis fotovoltaicos e de 1 kW potência nominal para o sistema eólico, com características de fornecimento similar ao da figura 2b. Supõe-se que tal instalação se encontre numa região com valores que representam a disponibilidade de recursos resumidos na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1: Dados que representam a disponibilidade de recursos solar e eólico para a região de análise.

Mês	n	H (MJ.m ⁻²)	H ₀ (MJ.m ⁻²)	K _t	v (m.s ⁻¹)
Janeiro	17	22,10	42,22	0,52	5,70
Fevereiro	47	21,70	39,96	0,54	5,40
Março	75	20,50	35,98	0,57	5,70
Abril	105	18,90	30,40	0,62	6,30
Mai	135	15,90	25,33	0,63	5,40
Junho	162	14,30	22,84	0,63	5,10
Julho	198	15,40	23,84	0,65	6,60
Agosto	228	17,70	28,00	0,63	7,50
Setembro	258	18,90	33,53	0,56	9,00
Outubro	288	20,90	38,40	0,54	8,70
Novembro	318	22,60	41,44	0,55	8,10
Dezembro	344	21,60	42,59	0,51	6,90
Média	-	19,21	33,71	0,58	6,70

O valor de H_o é obtido através da Eq.(3) assumindo um valor de $\phi = -22,53^\circ$. Para estas condições, supõe-se uma instalação fotovoltaica com uma inclinação de 23° que, para a proposta anteriormente mencionada de 1 kW de potencia nominal, apresenta um valor para o termo $\eta.A = 1$ (fornece 1 kW quando operando com 1.000 W/m^2 e 25°C).

Utilizando a Eq.(9) define-se a potência da planta de eletrólise como 1,7 kW. Para esta potência e supondo-se que a planta de eletrólise irá operar com fator de capacidade de 100%, é possível determinar a quantidade total de energia elétrica necessária mensalmente relacionando-se esta potência com a quantidade total de horas em cada mês, que corresponde ao valor E_{ele} na Eq.(7). A terceira coluna da Tabela 2 apresenta estes resultados.

Tabela 2: Dados que representam o resultado final dos valores estimados de cada fonte considerada.

Mês	h/ mês	E_{ele} (kWh/mês)	E_{eol} (kWh/mês)	E_{fot} (kWh/mês)	E_{hid} (kWh/mês)	H_2 (m ³ /mês)
Janeiro	744	1264,80	158,28	193,55	912,97	285,51
Fevereiro	672	1142,40	125,36	185,79	831,25	257,88
Março	744	1264,80	158,28	216,03	890,48	285,51
Abril	720	1224,00	191,75	225,03	807,22	276,30
Mai	744	1264,80	138,79	211,85	914,16	285,51
Junho	720	1224,00	116,07	197,13	910,81	276,30
Julho	744	1264,80	218,05	221,23	825,52	285,51
Agosto	744	1264,80	275,44	227,51	761,86	285,51
Setembro	720	1224,00	345,17	196,67	682,16	276,30
Outubro	744	1264,80	342,13	202,45	720,23	285,51
Novembro	720	1224,00	300,42	201,04	722,54	276,30
Dezembro	744	1264,80	237,68	181,56	845,56	285,51

As colunas 3, 4 e 5 apresentam os valores da contribuição mensal de cada fonte. Os valores de E_{eol} e E_{fot} são estimados pelos procedimentos apresentados respectivamente em 3.1 e 3.2 e independem do tamanho e do funcionamento da planta de eletrólise, dependendo unicamente da dimensão destes sistemas e da disponibilidade dos recursos no local escolhido.

Os resultados apresentados mostram que pela estratégia imposta pelo dimensionamento da planta de eletrólise, visando uma utilização ple-

na da mesma, faz com que a utilização de energia hidrelétrica ao longo do ano seja de 9.824 kWh (66%), um valor relativamente alto se comparado ao fornecido pelas fontes alternativas. A Figura 3 apresenta a participação relativa das três fontes consideradas.

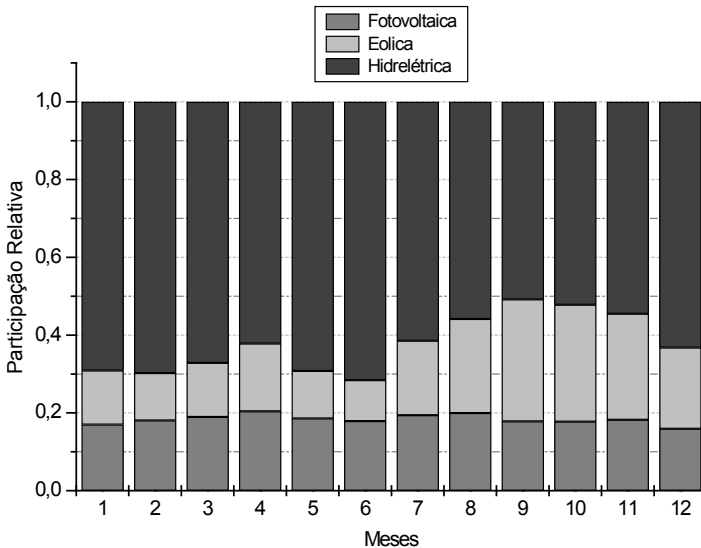


Figura 3: Participação relativa das fontes consideradas no estudo.

Uma estratégia alternativa para este dimensionamento, fazendo variar para baixo os valores que constam na Eq.(9), faria aumentar o risco de se encontrar uma situação em que a potência elétrica fornecida pelas fontes alternativas ultrapasse a potência nominal do sistema de eletrólise mas aumentaria a participação das mesmas. Entretanto, para se confirmar esta possibilidade seria necessário uma avaliação mais refinada sobre o comportamento instantâneo destes sistemas.

A última coluna da Tabela 2 apresenta os valores estimados para a produção mensal de H_2 para este sistema. Estimou-se um total de 3.361 m^3 de H_2 por ano, com uma média de 9,2 m^3 de H_2 por dia de operação. Este valor será importante para se estimar o custo desta produção, um dos objetivos do trabalho apresentado neste artigo.



6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um desenvolvimento matemático realizado para se estimar a participação no fornecimento elétrico de um sistema híbrido fotovoltaico-eólico para a produção eletrolítica de hidrogênio, fornecendo dados intermediários que serão importantes para uma estimativa final do custo do H_2 produzido por uma usina hipotética.

Para se alcançar um aproveitamento pleno da planta de eletrólise foi considerado um fornecimento complementar de energia hidrelétrica. Entretanto, a estratégia utilizada para o dimensionamento da planta de eletrólise levou à uma participação relativamente alta para o fornecimento hidrelétrico ao longo do ano. Tal estratégia é possível de ser revista diminuindo-se os pesos dos termos da Equação (9), mas esta mudança aumentaria os riscos de que a soma do fornecimento instantâneo eólico e fotovoltaico ultrapasse o valor da potência de projeto da planta de eletrólise. Uma análise mais refinada desta possibilidade poderia ser desenvolvida com um estudo do comportamento instantâneo dos dispositivos envolvidos.

O modelo desenvolvido permite que se variem diversos parâmetros como a potência nominal dos geradores eólico, fotovoltaico e da planta de eletrólise, permitindo que se gere diferentes resultados finais para as participações relativas das fontes envolvidas e para a quantidade de H_2 produzida, buscando uma configuração ótima que apresente o menor custo para o H_2 produzido por um sistema híbrido como o aqui estudado.



REFERÊNCIAS

Duffie, J. A. and Beckman, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**, John Wiley & Sons. 1991.

Johansson, T.; Kelly, H.; Reddy, A. K. and Williams, R. H. **Renewable Energy, sources for fuels and electricity**, EarthScan, Londres. 1993.

Lasnier, F. and Ang, T.G. **Photovoltaic engineering handbook**, Adam Hilger, NY. 1990.

Silva, E. P. **Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio**, UNICAMP, Campinas/SP. 1991.

Tiba, C. et AL. **Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres**, UFPE, Recife/PE. 2000.