



# ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

## TECHNICAL AND ECONOMICAL ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY

A. P. M. de OLIVEIRA<sup>1</sup>, N. S. FUGANHOLI<sup>1</sup>, P. H. S. CUNHA<sup>1</sup>, V. A. BARELLI<sup>1</sup>, M. P. M. BUNEL<sup>2</sup> e L. F. NOVAZZI<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, Brasil (estudante de graduação)

<sup>2</sup> Institut Catholique d'Arts e Métiers, Toulouse, França (estudante de graduação)

<sup>3</sup> Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia Química, São Paulo, Brasil

\*Autor para correspondência. Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia Química, São Bernardo do Campo, São Paulo, Brasil, Fone: +55 11 4353-2900, ramal 2169

e-mail: [lnovazzi@fei.edu.br](mailto:lnovazzi@fei.edu.br) (L. F. Novazzi).

### ARTICLE INFO

Article history:

Received 2018-01-20

Accepted 2018-02-22

Available online 2018-12-28

#### palavras-chave

energia renovável

eólica

solar

biomassa

análise econômica

#### keywords

renewable energy

wind

solar

biomass

economical evaluation

### ABSTRACT

*Energy consumption has been increasing a lot recently because of the intensive use of energy in manufacturing processes and due to the modern lifestyle in our society. In this context, Brazilian energy sources are pretty diversified and they are mainly composed by renewable energy. A technical and economical assessment of solar, wind and biomass power generation was carried out in this work. With this aim, capital costs and generation capacities for each energy source were taken into account. Specific costs of solar generation resulted in R\$0.98/kW-h, wind power were equal to R\$0.12/kW-h and biomass power, obtained in a cogeneration process with sugarcane bagasse, resulted in R\$0.27/kW-h. These data suggest that renewable energy is quite interesting from an economical point of view.*

### RESUMO

*O consumo de energia vem aumentando muito nos últimos anos, principalmente por conta do uso intensivo nas indústrias e também pelo aumento do padrão de vida. Nesse cenário, a matriz energética brasileira é bem diversificada e conta com importante uso de fontes renováveis. No presente trabalho, fez-se uma avaliação técnica e econômica do aproveitamento de energia solar, eólica e daquela proveniente da queima de bagaço de cana, num processo de cogeração. Para isso, foram levados em conta os investimentos necessários e as capacidades de geração de cada uma dessas fontes. O custo específico de geração da energia solar foi de R\$0,98/kW-h, o da eólica igual a R\$0,12/kW-h e aquele da biomassa foi de R\$0,27/kW-h. Esses números sugerem que a geração de energia a partir de fontes renováveis é interessante do ponto de vista econômico.*

## NOMENCLATURA

A	área	m <sup>2</sup>
Cp	coeficiente de potência	—
f	frequência	—
G	capacidade de geração de energia	kW·h ano <sup>-1</sup>
ΔH	variação de entalpia	kJ kg <sup>-1</sup>
I	radiação média solar	kW·h m <sup>-2</sup> ·ano <sup>-1</sup>
m	vazão mássica	kg s <sup>-1</sup>
p	perda	—
P	potência	kW
Pin	pressão de entrada	kPa
Pout	pressão de saída	kPa
v	velocidade do vento na altura da turbina	m s <sup>-1</sup>
vs	velocidade do vento a 2 m de altura	m s <sup>-1</sup>
z	altura	m
η	eficiência	—
ρ	densidade	kg m <sup>-3</sup>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de base no Brasil, envolvendo os setores de produtos químicos, de petróleo e siderúrgico, teve seu desenvolvimento na era Vargas. De modo geral, essas indústrias são bastante intensivas no consumo de energia. Além disso, o próprio estilo de vida moderno está diretamente relacionado a um aumento no uso de energia. Na Figura 1 (Achão *et al.*, 2016) é representado o consumo de energia *per capita*, em kW·h/ano, desde o começo dos anos 70 até mais recentemente. Vê-se que essa demanda praticamente quintuplicou no período considerado.

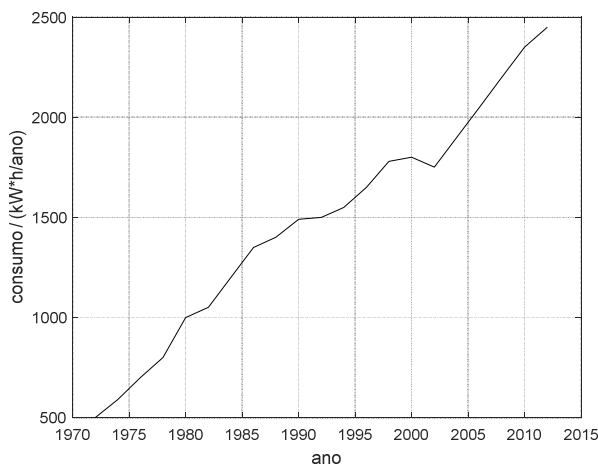
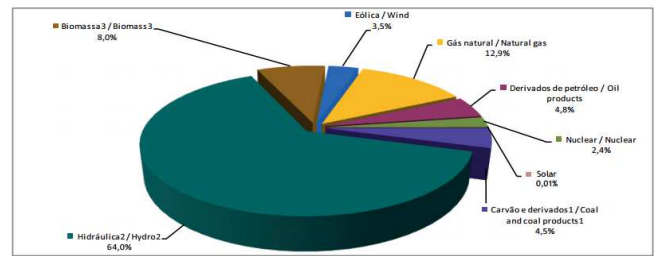


Figura 1 – Consumo de energia *per capita* no Brasil.

O aumento do consumo energético, juntamente com a limitação de recursos fósseis, traz à tona a necessidade de diversificação de fontes de geração de energia mais limpas. Nesse sentido, o aumento do debate sobre a preservação de recursos naturais, o desenvolvimento de legislações ambientais mais rígidas e até mesmo o estabelecimento de tratados mundiais, como o Protocolo de Kyoto, foram responsáveis pelo crescimento do apelo sustentável das indústrias. Dessa forma, o uso de fontes renováveis e a diversificação da matriz energética nacional passaram a ser alvo de debates e também foco de pesquisas. Como resultado, vê-se que a matriz brasileira atualmente é bem diversificada e composta primordialmente por fontes renováveis, como indica a Figura 2 (Achão *et al.*, 2016).



Notas/ Notes:  
 1 Inclui gás de coque/ Includes coke oven gas  
 2 Inclui importação de eletricidade/ Includes electricity imports  
 3 Inclui lenha, bagaço de cana, lúvula e outras recuperações/ Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 2 – Matriz energética brasileira.

Estima-se que as fontes de energia renováveis representem 84% da matriz energética brasileira até 2023. Os excelentes níveis de irradiação solar, somados à disponibilidade de vento em diversas regiões e à capacidade de produção de biomassa tornam o Brasil uma fonte potencial de desenvolvimento de matriz energética renovável (Feitosa, 2016). Essas diferentes fontes são brevemente comentadas nas próximas subseções. Nesse cenário, o objetivo desse trabalho é o de comparar o custo de produção de energia fotovoltaica, eólica e de biomassa, bem como avaliar os aspectos técnicos envolvidos.

### 1.1 Energia Fotovoltaica

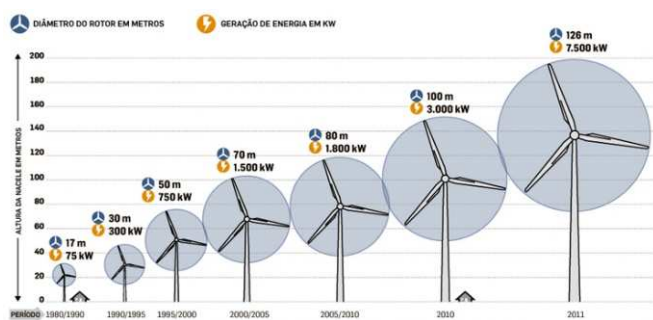
No aproveitamento desse tipo de energia, os fótons transportados com a luz são absorvidos por materiais semicondutores, como silício, contidos em placas fotovoltaicas. A energia proveniente da absorção faz com que os elétrons atinjam um estado energético mais elevado, gerando uma diferença de potencial, que pode ser aproveitada. A composição do material semicondutor é chave para o funcionamento adequado das placas fotovoltaicas. Por conta disso, é usual o emprego de silício dopado com boro e de silício dopado com fósforo nas camadas que compõem a placa.

Das tecnologias aplicadas na produção de placas fotovoltaicas, destaca-se aquela que envolve o silício cristalino, com participação de mais de 85% do mercado. Essa tecnologia se divide em silício monocristalino e policristalino. O primeiro leva a eficiências entre 14 e 21%, mas é o silício policristalino que detém maior fatia do mercado hoje. Isso acontece porque o silício policristalino é mais barato e sua eficiência é pouco inferior à do monocristalino (Boxwell, 2016).

### 1.2 Energia Eólica

A energia eólica é uma variante da energia solar, pois é produzida a partir da variação do aquecimento das camadas de ar, resultando em gradientes de pressão e de densidade, o que promove a movimentação. A ocorrência de ventos é fortemente influenciada por fatores como latitude, longitude, proximidade do mar, entre outros. No Brasil, as regiões mais promissoras para a energia eólica são encontradas nas regiões Nordeste e Sul.

O aproveitamento da energia eólica tem melhorado nas últimas décadas, principalmente por conta da maior capacidade dos aerogeradores. Esse fato é evidenciado na Figura 3, na qual se apresenta a evolução da capacidade desses equipamentos, com rotores cada vez maiores.



**Figura 3 – Desenvolvimento da tecnologia eólica.**

O Brasil conseguiu em 2016 o título de maior gerador de energia eólica da América Latina, o que mostra sucesso na diversificação de fontes energéticas no país. Mesmo assim, há potencial para uma expansão ainda maior. Na Tabela 1 (Sawyer e Dyrholm, 2016) são apresentadas as capacidades instaladas de energia eólica dos cinco maiores geradores no mundo, também referente a 2016. Nota-se um abismo entre o Brasil e Estados Unidos e China.

**Tabela 1 – Capacidades instaladas de energia eólica.**

País	Capacidade / (MW)	Participação / %
China	23370	42,8
Estados Unidos	8203	15,0
Alemanha	5443	10,0
Índia	3612	6,6
Brasil	2014	3,7

### 1.3 Energia de Biomassa

A biomassa é definida como qualquer matéria orgânica de origem vegetal ou animal com potencial para a produção de energia a partir de processos de combustão, excluindo-se quaisquer combustíveis de origem fóssil.

A existência de mão de obra barata, a grande disponibilidade de resíduos e a intensificação da industrialização e da urbanização de regiões rurais são fatores que, somados, fazem com que a biomassa seja considerada uma alternativa atraente para a produção de energia (Lucon e Goldenberg, 2007). Outra vantagem é o aproveitamento do que seria até então um resíduo para se gerar energia, com baixo impacto em carbono.

A disponibilidade de matéria-prima de baixo custo é um fator importante na implementação de usinas de geração de energia por biomassa. Em razão disso, o bagaço de cana, presente em grande quantidade nas usinas de açúcar e álcool, se encaixa perfeitamente nesse quesito. Assim, é a geração de energia a partir dessa biomassa que foi considerada no presente trabalho. Na Tabela 2 são classificados os cinco maiores países produtores de cana de açúcar, com suas respectivas produtividades. O Brasil destaca-se como o maior produtor e apresenta boa produtividade, atingindo 74,0 t/ha de cana (Novacana, 2017).

**Tabela 2 – Produtores de cana de açúcar em 2016.**

País	Produtividade / (t/ha)	Produção / (10 <sup>6</sup> t/ano)
Brasil	74,0	455,3
Índia	67,0	281,2
China	82,5	100,7
México	75,7	50,6
Tailândia	51,0	47,7

## 2. METODOLOGIA

Na comparação entre os três tipos de energia renováveis estudadas nesse trabalho, levou-se em conta o custo específico de cada uma, expresso em R\$/kW·h. Dentro desse valor, foram englobados os custos de capital e os eventuais gastos com matéria-prima, como no caso da biomassa, por exemplo. Os custos de capital foram anualizados considerando-se uma taxa de juros de 11% e um tempo de duração dos projetos de 20 anos.

Nas próximas subseções é especificada a metodologia para a estimativa de custos e de capacidade da energia fotovoltaica, eólica e de biomassa.

### 2.1 Energia Fotovoltaica

O cálculo da capacidade de geração de uma placa fotovoltaica depende da radiação solar média que incide sobre ela, da área de captação e da eficiência da placa, como mostra a Equação 1 (Miranda, 2014). Nessa expressão,  $G$  é a capacidade de geração de energia da placa ano, em kW·h/ano,  $I$  é a radiação média proveniente do Sol, em kW·h/m<sup>2</sup>·ano,  $A$  é a área da célula, em m<sup>2</sup>,  $\eta$  é a eficiência da placa e  $p$  representa perdas oriundas de diversos fatores, como ângulo da placa, por exemplo.

$$G = \eta A I (1 - p) \tag{1}$$

Na Tabela 3 é especificada a radiação solar média anual  $I$  para as várias regiões do Brasil (Pereira *et al.*, 2006). Percebe-se que os números são muito próximos entre si e, por esse motivo, nesse trabalho supôs-se um valor representativo de 2036 kW·h/m<sup>2</sup>·ano para a radiação incidente no país.

**Tabela 3 – Radiação solar no Brasil.**

Região	Radiação média / (kW·h/m <sup>2</sup> ·ano)
Norte	2007
Nordeste	2153
Centro-oeste	2080
Sudeste	2044
Sul	1898

Ainda tendo-se em mente a Equação 1, foi admitida uma placa de silício monocristalino, com eficiência  $\eta$  de 16,8% e perdas  $p$  associadas de 18,0%. A área  $A$  de uma placa fotovoltaica foi considerada como 1,64 m<sup>2</sup> (Miranda, 2014).

### 2.2 Energia Eólica

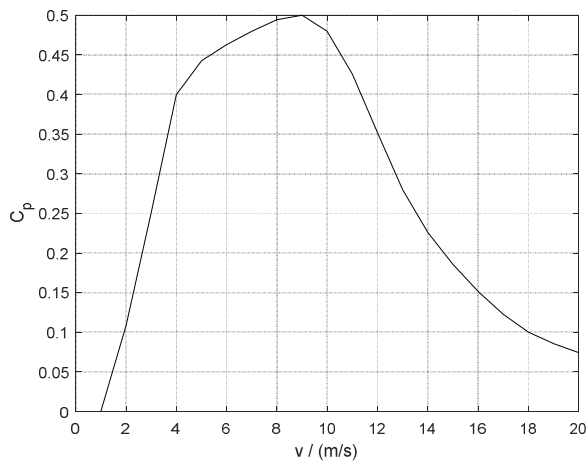
Esse tipo de energia tem seu valor atrelado à instalação e aos diversos componentes de uma turbina eólica: rotor, pás do rotor, gerador, torre, nacela e caixa de transmissão (Rosseto, 2015). Por sua vez, o desempenho da turbina está intrinsecamente ligado com a presença, a velocidade e a direção do vento.

Na Equação 2 é descrito um modelo para se estimar a potência  $P$  de uma turbina eólica, como função da densidade  $\rho$  do ar, da área projetada do rotor,  $A$ , da velocidade do vento,  $v$ , e do coeficiente de potência  $C_p$  do equipamento, fornecido pelo fabricante.

$$P = \frac{\rho A v^3 C_p}{2} \tag{2}$$

O coeficiente de potência consiste num fator empírico que relaciona o percentual de energia efetivamente gerada pelo equipamento. Na Figura 4, esboça-se o  $C_p$  como uma função da

velocidade  $v$  do vento, para uma turbina fabricada pela Wobben Windpower, modelo E82, com três rotores de 82 m de diâmetro, correspondendo a uma área projetada  $A$  de 5281 m<sup>2</sup>.

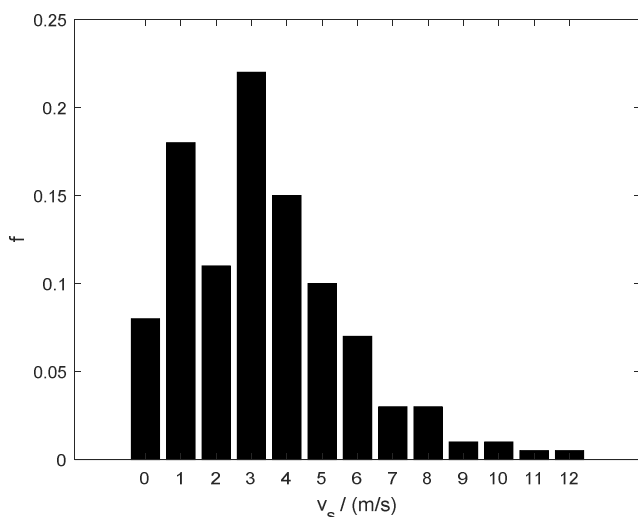


**Figura 4 – Coeficiente de potência para uma turbina eólica Wobben Windpower modelo E82.**

Percebe-se que a velocidade  $v$  tem uma influência muito grande sobre a potência gerada pela turbina eólica (Equação 2). As turbinas eólicas são instaladas num ponto elevado no solo, o que tem impacto direto sobre a velocidade  $v$  do vento. Para corrigir esse efeito, utilizou-se a Equação 3, na qual  $z$  representa a altura da turbina, em metros (Varejão-Silva, 2006). A velocidade superficial  $v_s$  se refere a uma medição feita a 2 m de altura. Nesse trabalho, a altura das turbinas E82 foi considerada igual a 108 m.

$$v = \frac{v_s}{4,87} \ln(67,8z - 5,42) \tag{3}$$

Independentemente da região do país, a velocidade  $v_s$  é bastante variável, dependendo do horário do dia ou estação do ano. Por conta disso, apresenta-se na Figura 5 um histograma contendo diferentes velocidades de vento e suas respectivas frequências  $f$  (Rossetto, 2015). Esses dados mostram que em 8% do tempo não há vento, por exemplo. Desse modo, as potências calculadas pela Equação 2, para cada diferente velocidade  $v$ , foram ponderadas pela frequência  $f$  e os valores resultantes somados, tomando-se como base um ano de operação.



**Figura 4 – Frequências de velocidade superficial do vento.**

### 2.3 Energia da Biomassa

Nesse trabalho foi considerada como biomassa em estudo o bagaço de cana de açúcar, por conta de sua disponibilidade no país. O aproveitamento dessa biomassa se deu por cogeração, num processo envolvendo uma turbina de contrapressão e uma de condensação (Van Wylen *et al.*, 2004). A pressão de operação da caldeira nesse sistema de cogeração foi considerada igual a 6,5 MPa, eficiência de 87% e geração de vapor superaquecido a 510 °C. As pressões de entrada e de saída  $P_{in}$  e  $P_{out}$  e as eficiências isentrópicas  $\eta$  das turbinas do processo são detalhadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Condições operacionais das turbinas.**

Parâmetro	Turbina de contrapressão	Turbina de condensação
$P_{in}$ / kPa	6300	250
$P_{out}$ / kPa	300	10
$\eta$ / %	81	79

Tomou-se como estudo de caso uma usina de açúcar e álcool de médio porte, com processamento de 1,8 milhões de toneladas de cada durante a safra, de duração média de 240 dias. Quando a cana é processada, gera-se 25% de bagaço, com poder calorífico de 7356 kJ/kg. Além disso, para cada quilograma de cana no processo, é preciso empregar 0,3 kg de vapor para operações de troca térmica (colunas de destilação, tratamento do caldo, etc.). Isso significa que a turbina de contrapressão opera com a quantidade total de vapor gerado na caldeira, enquanto que a turbina de condensação é alimentada somente uma fração desse vapor. A potência de cada turbina é calculada através da Equação 4, na qual  $m$  representa a vazão mássica de vapor e  $\Delta H$  é a variação de entalpia entre as correntes de entrada e saída do equipamento.

$$P = \eta m \Delta H \tag{4}$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas próximas subseções são apresentados os resultados de custo específico para as energias fotovoltaica, eólica e de biomassa. Em seguida, fecha-se essa parte do trabalho fazendo-se um comparativo entre as diferentes energias.

### 3.1 Energia Fotovoltaica

Ao se aplicar a Equação 1, a qual prevê a capacidade de geração de energia por placa fotovoltaica em base anual, chega-se num resultado de 460 kW·h/ano. Uma placa com essa capacidade tem valor de mercado de cerca de R\$2407, detalhados na Tabela 5, e custo de manutenção próximo a R\$150/ano (Miranda, 2014). Ao se anualizar o custo total das placas com juros de 11% e 20 anos, chega-se num valor R\$302/ano, que, somados aos custos de manutenção, resultam num total de R\$452/ano. Levando-se em conta a capacidade da placa e o custo total, tem-se um custo de energia específico de R\$0,98/kW·h.

**Tabela 5 – Custos com os componentes de placa fotovoltaica.**

Componente	Custo / (R\$)
Módulo principal	421
Periféricos	586
Instalação	1400
Total	2407

### 3.2 Energia Eólica

Observando-se a Figura 4, nota-se que a frequência de distribuição das velocidades superficiais do vento é bastante variada. Na Tabela 6 são apresentados os valores das velocidades corrigidas  $v$  (Equação 3) e as potências calculadas através da Equação 2, assumindo-se uma densidade do ar de  $1,1 \text{ kg/m}^3$  e tomando-se os valores de  $C_p$  da Figura 4. Cada potência foi ponderada por  $f$  e as unidades convertidas para  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{ano}$ , ou seja, esses termos representam a quantidade de energia gerada por ano para uma dada velocidade de vento. Somando-se os dados da terceira coluna da tabela, tem-se uma energia total gerada por ano de  $6,95\cdot 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{ano}$ .

**Tabela 6 – Energia gerada pela turbina eólica.**

$v_s / (\text{m/s})$	$v / (\text{m/s})$	Geração / ( $10^3 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{ano}$ )
0	0,0	0,0
1	1,8	0,0
2	3,7	14,8
3	5,5	230,5
4	7,3	595,9
5	9,1	859,1
6	11,0	1086,1
7	12,8	766,5
8	14,6	1178,2
9	16,4	565,7
10	18,3	744,9
11	20,1	439,7
12	21,9	471,2

Esse tipo de turbina eólica tem um custo de aquisição e de instalação de aproximadamente  $\text{R}\$6,5\cdot 10^6$  (Melek, 2013). Anualizando-se esse valor num cenário de 20 anos e com taxa de juros de 11%, ter-se-ia como resultado  $\text{R}\$8,2\cdot 10^5/\text{ano}$  de custo de capital. Associando esse dado à capacidade de geração da turbina, de  $6,95\cdot 10^6 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{ano}$ , resultaria num custo específico de  $\text{R}\$0,12/\text{kW}\cdot\text{h}$  para a energia eólica.

### 3.3 Energia da Biomassa

O processamento de 1,8 milhões de toneladas de cana numa safra de 240 dias é equivalente a uma vazão de  $86,8 \text{ kg/s}$  desse insumo. Como  $1 \text{ kg}$  de cana geram  $0,25 \text{ kg}$  de bagaço, tem-se então que a vazão de bagaço processada corresponde a  $21,7 \text{ kg/s}$ . Ao se queimar esse bagaço na caldeira, haveria a geração de  $34,0 \text{ kg/s}$  de vapor superaquecido a  $505 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $6500 \text{ kPa}$ , considerando-se uma variação de entalpia de  $2285 \text{ kJ/kg}$  entre as correntes de entrada e saída no equipamento. Nesse cenário, na Tabela 7 são apresentadas as vazões de vapor alimentadas nas turbinas de contrapressão e de condensação, juntamente com as respectivas variações de entalpia e as potências geradas. Cabe ressaltar que a diferença entre as vazões de vapor alimentadas na turbina de alta pressão e na de baixa pressão se deve ao uso de vapor na usina, em operações unitárias de aquecimento, sem envolver a geração de trabalho mecânico.

**Tabela 7 – Potências das turbinas.**

Parâmetro	Turbina de contrapressão	Turbina de condensação
$m / (\text{kg/s})$	34,0	7,9
$\Delta H / (\text{kJ/kg})$	787	1254
$P / (10^3 \text{ kW})$	21,7	7,8

Outro parâmetro importante da Tabela 7 é que a capacidade de geração de eletricidade da usina em estudo seria

igual a  $29,5 \text{ MW}$ . Já que o tempo da safra é de 240 dias, haveria a geração de  $1,7\cdot 10^8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{ano}$  de energia.

Da literatura (Dantas Filho, 2009), levanta-se que o custo de investimento de uma usina de açúcar e álcool que processa 2,5 milhões de toneladas de cana por safra e com capacidade de  $40 \text{ MW}$  teria custo de  $\text{R}\$58\cdot 10^6$ . Fazendo-se a proporcionalidade entre a usina tratada nesse trabalho, com 1,8 milhões de toneladas de cana, com a do estudo mencionado, ter-se-ia um valor de  $\text{R}\$42\cdot 10^6$  de investimento para a usina menor. Como os dados de referência se baseiam em 2009, levou-se o investimento de  $\text{R}\$42\cdot 10^6$  para valor presente, usando os índices oficiais de inflação para a correção. Assim, tem-se um investimento total de  $\text{R}\$67\cdot 10^6$ . Colocando-se esse número em base anual, num intervalo de 20 anos e juros de 11% ao ano, resulta em  $\text{R}\$8,4\cdot 10^6/\text{ano}$ . Como consequência, o custo específico da energia proveniente do aproveitamento da cana é igual a  $\text{R}\$0,05/\text{kW}\cdot\text{h}$ , considerando somente os custos de capital.

Entretanto, é importante também se levar em conta nesses custos o preço do bagaço, que depende bastante da demanda em jogo. No Brasil, no auge dessa demanda, seu preço atingiu  $\text{R}\$150$  por tonelada de bagaço, mas atualmente está próximo de  $\text{R}\$85$  por tonelada de bagaço (Novacana, 2016). Assim, isso geraria um custo variável de  $\text{R}\$0,22/\text{kW}\cdot\text{h}$ . Somando-se o custo de capital e o de matéria-prima, tem-se um total de  $\text{R}\$0,27/\text{kW}\cdot\text{h}$ .

Para complementar a análise, na Tabela 8 são mostrados os principais índices técnicos na geração de energia a partir da cana. Esses índices aparecem tomando-se como base  $1 \text{ kg}$  de cana de açúcar. Isso quer dizer, por exemplo, que o processamento de um quilograma de cana proporciona  $0,094 \text{ kW}\cdot\text{h}$  de energia elétrica.

**Tabela 8 – Índices técnicos no processamento da cana de açúcar.**

Índice	Valor	Unidade
bagaço	0,25	kg/kg
vapor (caldeira)	0,39	kg/kg
vapor (aquecimento)	0,30	kg/kg
eletricidade	0,094	$\text{kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$

### 3.4 Comparativo

Na Tabela 9 são elencados os custos específicos de cada um dos tipos de energia renováveis tratados nesse trabalho. Para efeito de comparação, nesse quadro também se apresenta o preço específico da energia elétrica disponível na rede.

**Tabela 9 – Comparação dos custos específicos de diferentes tipos de energia.**

Energia	Custo específico / ( $\text{R}\$/\text{kW}\cdot\text{h}$ )
Fotovoltaica	0,98
Eólica	0,12
Biomassa	0,27
Rede	0,22

Os valores encontrados correspondem às atuais tendências de avanço das fontes de energia na matriz brasileira e consideradas nesse trabalho. Por exemplo, dentre as energias estudadas, a eólica é a que mais vem crescendo e sendo explorada, tendo o seu potencial de geração continuamente elevado e recebendo inúmeros investimentos. Isso se justifica pelo menor custo específico da energia eólica em relação às

demais. A grande desvantagem da energia eólica consiste no fato de que, para sua instalação, são necessários lugares específicos, que atendam a condições ótimas de geração e que compensem a instalação. Há também o inconveniente da frequência, velocidade e incidência de ventos, que apresentam grande variação. Por conta disso, o estudo de usinas integradas, envolvendo o armazenamento de energia por meio de hidrogênio / células combustíveis, apresenta potencial e tem sido tratada na literatura.

Quanto ao valor do custo específico da energia fotovoltaica, que se mostrou o mais elevado dentre as energias abordadas, cabe ressaltar que os preços estimados neste caso foram gerados considerando apenas um módulo fotovoltaico. Entretanto, um conjunto de bateria e inversor pode suportar mais do que um módulo fotovoltaico. Saturando-se o sistema com módulos associados, como em parques fotovoltaicos, tem-se ganho de escala e se reduz o custo específico. Existe ainda um enorme potencial desta fonte de energia a ser explorado, uma vez que este ocupa o último lugar na composição da matriz energética brasileira, representando 0,01% do total de energia produzido (Figura 2).

Os custos específicos de energia proveniente da biomassa se mostraram intermediários quando comparados com as outras fontes. Trata-se de uma opção atraente, principalmente tendo-se em mente a significativa produção de cana de açúcar no Brasil. A maioria das usinas de açúcar e álcool, notadamente as de grande porte, já produzem energia elétrica e a vendem na rede, em leilões abertos. Na realidade, o valor de R\$0,27/kW·h (Tabela 9) para essa biomassa está superestimado. No processo de cogeração, obtém-se tanto energia elétrica e também vapor para aquecimento. A potencial receita com a venda desse vapor não foi considerada, o que torna a energia gerada a partir da cana de açúcar ainda mais relevante.

De forma geral, no entanto, todas as fontes analisadas mostraram-se viáveis, quando aplicadas de acordo com as suas limitações e capacidades e quando instaladas de acordo com uma demanda que possam suprir. Por este motivo, é factível aguardar o aumento da produção energética renovável no Brasil, considerando a capacidade de geração e a disponibilidade dos recursos sustentáveis no país. Além disso, podem contribuir em favor da difusão das energias renováveis uma melhora na eficiência dos equipamentos e também uma análise criteriosa para as regiões nas quais se deseja implantar esse tipo de energia, otimizando a capacidade produtiva e reduzindo custos.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesse trabalho, fez-se uma comparação técnica e econômica entre as energias fotovoltaica, eólica e de biomassa. Das três, a energia fotovoltaica apresentou custo específico mais elevado, com R\$0,98/kW·h. Além disso, a energia solar ocupa uma proporção irrelevante na matriz energética brasileira. Contudo, esse cenário pode mudar ao longo do tempo. Pesquisas envolvendo placas de silício mais eficientes podem baratear significativamente sua fabricação. Nesse contexto, o Brasil seria muito beneficiado, por sua abundância de radiação solar em praticamente todas as regiões.

A energia eólica levou a um custo específico de R\$0,12/kW·h, o mais barato entre os analisados. É por isso que o uso da energia do vento vem crescendo vertiginosamente no país. O ponto negativo tanto da energia eólica como da solar são

suas inconstâncias. A energia solar está obviamente disponível somente durante o dia e a eólica tende a ser mais intensa durante a noite. Para aproveitar ao máximo a geração energética, vale a pena considerar a instalação de usinas integradas, com o armazenamento de energia via hidrogênio.

O Brasil é um dos maiores produtores de cana de açúcar no mundo e as usinas nacionais usualmente geram energia elétrica a partir do bagaço. Estimou-se nesse trabalho um custo específico de geração para essa biomassa de R\$0,27/kW·h. O cálculo em si foi bastante conservador, pois não se considerou a venda de vapor gerado no processo.

A matriz energética nacional é diversificada e conta com importante uso de fontes renováveis. Os números levantados nesse trabalho reforçam essa ideia e sugerem que a geração de energia de fontes renováveis é muito interessante do ponto de vista econômico.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer por todo o apoio institucional oferecido pelo Centro Universitário da FEI.

#### REFERÊNCIAS

- ACHÃO, C. C. L.; MATOS, R. A. S.; SOARES, F. K.; LOUREIRO, L. S. S. M. **Balço Energético Nacional 2016**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2016. Disponível em <<http://www.cbdb.org.br/informe/img/63socios7.pdf>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.
- BOXWELL, M. **Solar Electricity Handbook**, 2017 edition. Coventry: Greenstream Publishing, 2016
- DANTAS FILHO, P. L. **Análise de custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana de Açúcar: um Estudo de Caso em Quatro Usinas de São Paulo**. 2009. 175 f. Tese (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, SP, 2009.
- FEITOSA, A. Energias Renováveis: o Imenso Potencial Brasileiro. São Paulo: **Revista Exame**, 2016. Disponível em <<http://exame.abril.com.br/negocios/dino/energias-renovaveis-o-imenso-potencial-brasileiro-dino89081876131/>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.
- LUCON, O.; GOLDENBERG, J. **Energia e Meio Ambiente no Brasil: Energias Renováveis e Sustentabilidade**. 2007. 14 f. Monografia (Especialização em Engenharia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, SP, 2007.
- MELEK, V. C. **Estudo Comparativo de Viabilidade Econômica entre uma Usina Eólica e uma Usina Híbrida (eólica-fotovoltaica)**. 2013. 83 f. Monografia (Especialização em Eficiência Energética) – UTPR, Curitiba, PR, 2013.
- MIRANDA, A. B. C. M. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede**. 2014. 98 f. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
- NOVACANA. **A produção de cana no Brasil e no mundo**. 2017. Disponível em <<http://www.novacana.com/cana-de-acucar/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.
- NOVACANA. **Preço do bagaço de cana começa a reagir**. 2016. Disponível em <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/preco-do-bagaco-de-cana-comeca-a-reagir>>.

Acesso em 22 de fevereiro de 2018.

- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; de ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos: INPE**, 2006. Disponível em <[ftp://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil\\_solar\\_atlas\\_R1.pdf](ftp://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf)>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.
- ROSSETTO, C. **Avaliação Econômica da Implantação de Turbinas Eólicas por meio de análise de risco**. 2015. 32f. Monografia (Engenharia) – PUC Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2015.
- SAWYER, S.; DYRHOLM, M. **Global Wind Report. Mongolia: Global Wind Energy Council**, 2017. Disponível em <<http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/>>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.
- VAN WYLEN, G; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**, 4 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2004
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia, Versão Digital 2**. Recife: Esalq, 2006. Disponível em <[http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce5702/Meteorologia\\_e\\_Climatologia\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce5702/Meteorologia_e_Climatologia_VD2_Mar_2006.pdf)> Acesso em 22 de fevereiro de 2018.