

## ANÁLISE TÉCNICA E FINANCEIRA DE USINA HÍBRIDA EÓLICA FOTOVOLTAICA

### TECHNICAL ANALYSIS AND FINANCIAL PLANT HYBRID WIND-PHOTOVOLTAIC

Ronaldo Pereira Baracco<sup>1</sup>, Sérgio Ricardo Lourenço<sup>2</sup>, Ronaldo Savarino Levenhagen<sup>3</sup>, Douglas Alves Cassiano<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mestre em Energia, engenheiro de processos da Forjaria Uniforja, Diadema, SP.

E-mail: ronaldobaracco@gmail.com.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia, professor da Universidade Federal do ABC, Santo André, SP.

E-mail: sergio.lourenco@ufabc.edu.br.

<sup>3</sup>Doutor em Astronomia, professor da Universidade Federal de São Paulo, Diadema, SP.

E-mail: ronaldo.levenhagen@gmail.com.

<sup>4</sup>Doutor em Engenharia, professor da Universidade Federal do ABC, Santo André, SP.

E-mail: douglas.cassiano@ufabc.edu.br.

### RESUMO

Neste estudo foi feita uma análise técnica e financeira de uma usina híbrida eólica fotovoltaica instalada na cidade de Caetité, BA. A análise tem o objetivo de verificar a influência da taxa de financiamento anual no custo de instalação e custo de geração de energia da usina híbrida com utilização do *software Homer Energy®*. De acordo com as estimativas, a irradiação solar e a velocidade média do vento em Caetité podem favorecer a instalação de usinas híbridas na região. Na simulação, para uma taxa real de 1% ao ano, velocidade média do vento e irradiação média de Caetité, o custo médio encontrado seria equivalente a R\$ 0,127 o quilowatt gerado. Para a região de Caetité destaca-se uma instalação de 9 MW (megawatts) pico de tecnologia fotovoltaica e 18 aerogeradores VESTAS com capacidade de 1,65 MW cada, ou seja, potência total instalada nominal de 38,7 MW. Estima-se um custo de geração de energia equivalente a R\$ 0,123 o quilowatt, que representa o melhor resultado encontrado entre todas as configurações apresentadas. Os resultados apresentados demonstram diversas configurações para usinas híbridas eólica e fotovoltaica instaladas em Caetité, que contribui no entendimento dos custos de instalação e geração de energia na região.

**Palavras-chave:** Usina Híbrida eólica fotovoltaica, Energia Eólica, Energia Solar, Geração de Energia.

### ABSTRACT

This study aimed to make a technical and financial analysis of a wind-photovoltaic hybrid power plant installed in the City of Caetité, BA, Brazil. The analysis aims to verify the influence of annual funding rate in the cost of installation and cost of the hybrid power generation plant. In this paper, it was used as a modeling tool the *Homer Energy®* software. According to the results, the solar irradiation and the average wind speed Caetité may favor the installation of hybrid plants. In the simulation, for a real rate of 1% per year, average wind speed and average irradiation Caetité, found the average cost would be equivalent to R\$ 0.127 per kilowatt generated. For Caetité region posting an installation of 9 MW (megawatts) peak photovoltaic technology and 18 wind turbines VESTAS with a capacity of 1.65 MW each, that is, the total nominal installed capacity of 38.7 MW. It is estimated a cost of equivalent power generation to R\$ 0.123 a kilowatt, representing the best result found among all displayed settings. The results show various configurations for wind and photovoltaic hybrid power plants installed in Caetité. Contributing to the understanding of the installation and power generation costs.

**Keywords:** wind-photovoltaic power plants, Wind Power, Solar Energy, Power Generation.

### 1 – INTRODUÇÃO

Sistema híbrido de geração de energia pode ser definido como aquele que utiliza mais de uma fonte de energia que, dependendo da disponibilidade dos recursos, deve gerar e distribuir energia elétrica, de forma otimizada e com custos mínimos, a uma determinada carga ou a uma rede elétrica, isolada ou conectada a outras redes (BARBOSA, 2006).

#### 1.1 Energia eólica

Os ventos são resultantes do movimento do ar na atmosfera terrestre e, assim como outras fontes renováveis de energia, são originalmente resultantes da radiação solar que atinge a Terra (PINHO *et al.*, 2008).

A velocidade do vento a ser utilizada em projetos de sistemas eólicos para geração de eletricidade resulta do cálculo de uma velocidade média dentro do intervalo de tempo considerado. A partir dos dados originalmente medidos, valores médios podem ser obtidos para um determinado período, conforme apresentado pela Equação 1 (AMARANTE *et al.*, 2001).

$$V_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

Em que:  $V_m$  = velocidade média dos N valores de velocidades medidas ( $V_i$ ).

De acordo com a lei dos gases ideais, a densidade do ar é calculada pela Equação 2 (AMARANTE *et al.*, 2001).

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (2)$$

Em que:  $\rho$  = densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);

P = Pressão (Pa);

R = Constante dos gases (287 J/kgK);

T = Temperatura (K).

Outro indicador, mais usual em estudos de potencial energético, é a densidade de potência eólica, que representa a potência cinética média do vento que flui através de uma unidade de área sempre perpendicular à sua direção, ao longo do ano (AMARANTE *et al.*, 2001). Esta função é expressa pela Equação (3) em (W/m<sup>2</sup>):

$$\rho \cdot a = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{i=1}^N \rho \cdot v_i^3 \quad (3)$$

A densidade do ar é determinada pela temperatura e pela pressão atmosférica.

Na equação 4 é apresentada a relação do fator de escala  $C$  com a velocidade média do vento.

$$V_m = C \cdot \beta \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4)$$

Em que:  $\beta$  é a função Gama. Uma aproximação útil para  $C$  quando os valores de  $k$  estão entre 2 e 3 é calculada pela Equação (5):

$$V_m = 0,9 \cdot C \quad (5)$$

Com os dois fatores  $k$  e  $C$ , e com a densidade média do ar é possível, geralmente, estimar a produção anual de uma turbina eólica com boa exatidão (AMARANTE *et al.*, 2001).

A potência extraída do aerogerador pode ser definida como:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot A \cdot v_1^3 \quad (6)$$

Em que:  $\rho$  = Densidade do ar (kg/m<sup>3</sup>);

$C_p$  = Coeficiente de eficiência (%);

$A$  = Área do rotor (m<sup>2</sup>);

$v_1^3$  = Velocidade do vento (m/s).

O coeficiente de eficiência do rotor  $C_p$  é conhecido como limite *Betz*. Este coeficiente não deve ultrapassar a taxa de 0,5926, pois causaria a interrupção da geração. Na prática, o rendimento de um rotor eólico não se aproxima de 59%, a eficiência típica varia entre 35% e 45%. As distribuições estatísticas podem ser combinadas para fornecer a distribuição total das frequências dos ventos de cada local. A distribuição estatística utilizada é a de

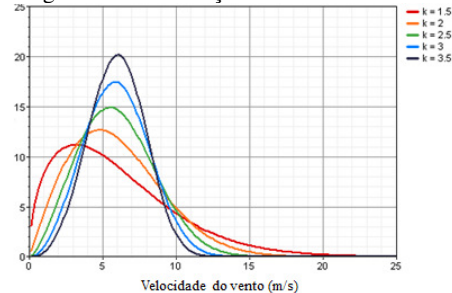
Weibull, que é a mais usual e apresenta melhor aderência aos casos mais variados de regimes de vento (AMARANTE, 2001).

$$h(v) = \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (7)$$

Para:  $0 < v < \infty$

Em que:  $k$  é o fator de forma, em que valores maiores de  $k$  indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos. Valores de  $k$  anuais variam tipicamente entre 2 e 3. Na Figura 1 são mostrados cinco fatores de *Weibull*, todos com a mesma velocidade média do vento de 6 m/s. (STEVENS; SMULDERS, 1979).

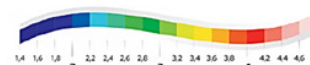
Figura 1 – Distribuição de cinco fatores de Weibull



Fonte: Stevens; Smulders (1979)

Na Figura 2 é apresentado o fator estatístico ( $k$ ) *Weibull* referente à região de Caetité, BA (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2013).

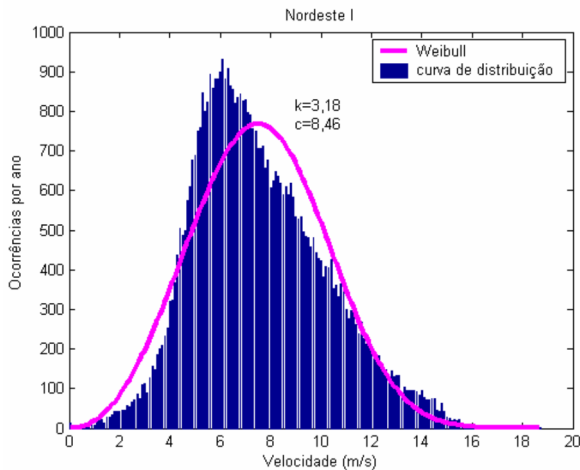
2 – Fator estatístico sugerido para Caetité, BA



Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados (2013), adaptado pelo autor

Na Figura 3 é apresentado um estudo de campo realizado na Região Nordeste Brasileira demonstrando um fator de ( $k$ ) *Weibull* equivalente a  $k = 3,18$  (LEITE; FALCÃO; BORGES, 2006).

Figura 3 – Estudo realizado na região Nordeste Brasileira



Fonte: Leite; Falcão; Borges (2006)

## 1.2 Energia solar fotovoltaica

A irradiação que chega ao solo pode ser absorvida pelo próprio solo ou refletida novamente à atmosfera. (PINHO; GALDINO 2014).

A Equação (8) define o índice de claridade média mensal.

$$K_T = \frac{H_{ave}}{H_{o,ave}} \quad (8)$$

Em que:  $K_T$  = Índice de claridade (adimensional);

$H_{ave}$  = radiação mensal média sobre a superfície horizontal da Terra (kWh/m<sup>2</sup>/dia);

$H_{o,ave}$  = Radiação horizontal terrestre, ou seja, a radiação sobre uma superfície horizontal na parte superior da atmosfera da Terra (kWh/m<sup>2</sup>/dia).

## 1.3 Simulação de sistemas híbridos

Alguns programas computacionais são desenvolvidos para auxiliar no dimensionamento, estimativa de produção de energia e análise de desempenho de sistemas híbridos, como é o caso do programa Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Híbridos – AVES-H. Outra ferramenta utilizada em estudos de viabilidade, simulação e otimização de sistemas híbridos é o *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables – HOMER*. O *software Homer Energy®* permite que o usuário compare diferentes opções de projetos com base em critérios técnicos e financeiros. Os sistemas híbridos de geração de energia podem gerar eletricidade ou calor, normalmente utilizado por uma carga localizada nas proximidades da unidade de geração. O *software Homer* permite realizar a modelagem de sistemas remotos ou conectados à rede, fornecendo cargas elétricas e térmicas, e compreendendo qualquer combinação de módulos fotovoltaicos (PV), turbinas eólicas, pequenas centrais hidroelétricas, energia de biomassa, motores geradores, microturbinas, células combustíveis, baterias e armazenamento de hidrogênio. O *software Homer* possibilita realizar três tarefas principais:

simulação, otimização e análise de sensibilidade. No processo de simulação verifica-se o desempenho de um sistema modelado, que revela a cada hora do ano a sua viabilidade. No processo de otimização, o *software* permite simular diferentes configurações para o sistema, em busca de satisfazer as limitações técnicas com o menor custo de ciclo de vida. No processo de análise de sensibilidade são executadas várias otimizações no âmbito de um conjunto de valores de entrada para medir os efeitos das incertezas ou alterações nos dados do modelo. A análise de sensibilidade ajuda a avaliar os efeitos da incerteza ou alterações das variáveis sobre as quais o usuário não tem controle, como a velocidade média do vento, irradiação solar e taxa de financiamento anual do projeto. (PINHO *et al.*, 2008).

## 1.4 Variáveis econômicas

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) pratica taxas de financiamento específicas para projetos de energia renovável. A taxa de juros anual e o tempo de vida do projeto podem ser considerados como principais parâmetros econômicos. A taxa anual de financiamento destinada para projetos de energia renovável normalmente é mais atrativa que as taxas básicas praticadas pelo mercado.

O Valor Presente Líquido (VPL) pode ser definido como o valor presente de todos os custos ocorridos durante a vida útil de uma usina subtraído do valor presente de todas as receitas obtidas. Os custos incluem o capital decorrido na etapa de construção, custos de substituição, custos de operação e manutenção.

O *software Homer®* permite calcular o VPL com utilização da Equação (9):

$$C_{VPL} = \frac{C_{ant}}{FCR(i, R_{proj})} \quad (9)$$

Em que:  $C_{VPL}$  = Valor presente líquido (R\$);

$FCR$  = Fator de capital recuperado;

$i$  = Taxa real de financiamento (%);

$R_{proj}$  = Vida útil do projeto (anos);

$C_{ant}$  = Custo total anual (R\$/ano).

O Leilão de Energia de Reserva realizado em 2014 divulgou o custo médio dos projetos fotovoltaicos, que variou entre R\$ 3.400,00 a R\$ 5.100,00 por quilowatt pico (EPE, 2014).

De acordo com o mesmo leilão ocorrido em 2014, o preço médio de venda da energia fotovoltaica foi de R\$ 215,12, com variação entre R\$ 200,82 a R\$ 220,8 o megawatt-hora gerado. A energia eólica foi comercializada a um valor inferior, com preço médio equivalente a R\$ 142,34, com variação entre R\$ 138,87 e R\$ 144,00 o megawatt-hora gerado (EPE, 2014). A Agência Internacional de Energia (IEA) apresentou em um relatório o custo de implantação da geração eólica equivalente a € 1,252 por quilowatt (GREENPEACE, 2014).

Para os parques eólicos, estima-se que os custos de operação e manutenção sejam equivalentes a 2% do

investimento específico (ZUBI; BERNAL; FANDOS, 2009).

### 1.5 O caso de Caetité

A cidade de Caetité, BA, é considerada como uma das melhores localizações do Brasil para a implantação de parques eólicos (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2013).

Os ventos com altas velocidades são constantes durante o ano, o que garante uma excelente produção de energia. Em função disso, foi implantado na região o maior complexo eólico da América Latina, Alto dos Sertões, complexo este composto por 14 parques eólicos e aproximadamente 184 aerogeradores instalados. Na Figura 4 é mostrado parte do parque eólico em funcionamento.

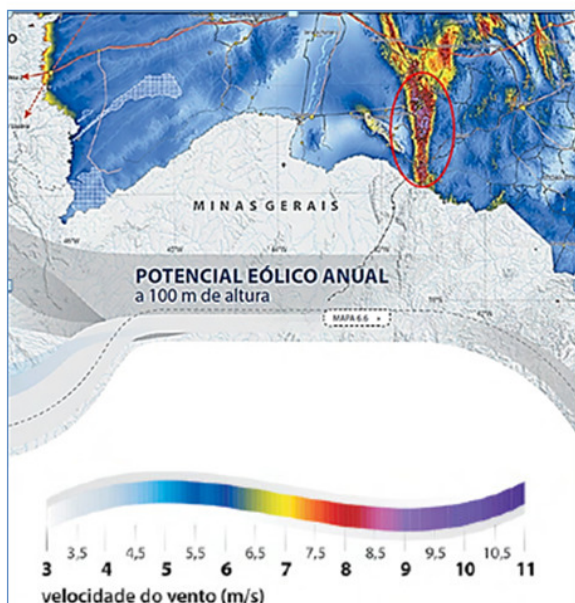
Figura 4 – Complexo eólico Alto dos Sertões (Caetité, BA)



Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados (2013)

Uma das características observadas é o fato de existir maior incidência de ventos no período noturno. O atlas eólico apresentado na Figura 5 demonstra o potencial eólico anual da região, considerado a 100 m de altura.

Figura 5 – Características observadas nos ventos da região de Caetité, BA



Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados (2013), adaptado pelo autor

A velocidade média do vento durante o dia (9h até às 19h) apresenta aproximadamente 7 m/s durante o período noturno (20h até às 8h), a velocidade média sobe alcançando 9m/s. Uma vez que a potência energética disponível do vento varia conforme o cubo da velocidade do mesmo, a produção de energia no período noturno destaca-se, apresentando um ganho considerável (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2013).

De acordo com o mapa Solarimétrico do Brasil, publicado no ano 2000, o Estado da Bahia apresenta o maior índice de irradiação solar no plano inclinado do Brasil com média anual máxima de 6 kWh/m<sup>2</sup> (AMARANTE *et al.*, 2001).

Além do vento, a cidade de Caetité conta com excelente irradiação solar, apresentando um local favorável para a geração de energia fotovoltaica. Os maiores índices do estado estão concentrados na região centro-oeste, região onde está localizada Caetité. A cidade de Caetité está localizada próxima a Bom Jesus da Lapa, apresentando ótima concentração de irradiação solar quando comparada com demais municípios.

A cidade de Caetité receberá um parque híbrido eólico fotovoltaico instalado junto a um dos 14 parques eólicos já existentes do complexo eólico Alto dos Sertões. Ou seja, os aerogeradores já estão instalados.

A usina híbrida em construção conta com capacidade instalada de 26,4 MW (megawatts), com 21,6 MW de eólicas e 4,8 MW pico de energia solar. O complexo prevê a instalação de cerca de 20 mil módulos fotovoltaicos, que serão conectados a quatro inversores e, em seguida, a uma subestação.

A Bahia será o primeiro Estado Brasileiro a receber um complexo híbrido de geração de energia eólica fotovoltaica. Com vistas a explorar a energia renovável Brasileira, o projeto traz a oportunidade da pesquisa e desenvolvimento das duas tecnologias. Este estudo se propôs a fazer uma análise técnica e financeira de uma usina híbrida eólica fotovoltaica instalada na cidade de Caetité, BA. A análise tem o objetivo de verificar a influência da taxa de financiamento anual no custo de instalação e custo de geração de energia da usina híbrida.

## 2 – METODOLOGIA

Neste trabalho utilizou-se como ferramenta de modelagem o *Software Homer Energy*. As variáveis foram nomeadas como variáveis de entrada, variáveis de saída e variáveis de sensibilidade. As variáveis de entrada são apresentadas em tabelas contendo parâmetros técnicos, financeiros e fatores climáticos das duas fontes, eólica e solar.

As variáveis de saída são apresentadas em tabelas na seção dos resultados. Para representá-las foram selecionadas a capacidade fotovoltaica, quantidade de geradores eólicos, Valor Presente Líquido (VPL), custo de geração de energia, capital total investido e produção total de energia.

As variáveis de sensibilidade e variáveis de saída foram selecionadas na simulação devido à influência técnica e financeira atribuída ao projeto.

## 2.1 Variáveis utilizadas para a geração de energia fotovoltaica

O fabricante japonês KYOCERA (KYOCERA, 2014) foi o fornecedor dos painéis fotovoltaicos selecionado para esse projeto. O modelo de painel KD215GX-LFBS utiliza

células fotovoltaicas compostas por silício policristalino. Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis de entrada utilizadas para a geração fotovoltaica, entre elas encontram-se parâmetros técnicos, financeiros e fatores climáticos.

Tabela 1 – Variáveis de entrada utilizadas para geração de energia fotovoltaica

Variáveis / Energia Fotovoltaica	Valores	Unidade
Custo total da instalação da usina fotovoltaica	3.400	(R\$/kWp)
Custo anual de operação e manutenção da usina	34	(R\$/kW/ano)
Vida útil dos equipamentos	25	(anos)
Tamanho da matriz fotovoltaica	0 a 15	(MWp)
Definição do perfil da geração	C.A.	(A)
Fator de perdas, sujeira, excesso de temperatura	80	(%)
Inclinação das placas fotovoltaicas (ângulo inclinação em relação ao plano hor.)	19	(Graus)
Fator que indica a direção de posicionamento dos painéis fotovoltaicos	180	(Graus)
Energia solar refletida pelo solo, (Albedo)	25	(%)
Coordenadas da localidade onde o sistema será instalado	(14° 3' 17") e (42° 28' 28")	Long. e lat.
Coefficiente de temperatura da potência	-0,991	(W/°C)
Temperatura nominal de operação das células fotovoltaicas, (NOCT)	47,9	(°C)
Eficiência da célula fotovoltaica	16	(%)
Índice de visibilidade	Tabela 2 (média 0,592)	(%)
Irradiação solar diária fornecida às placas solares	Tabela 2 (média 5,720)	(kWh/m²/dia)
Temperatura média da região	Média 21,8	°C
Taxa real de financiamento anual	1, 3 e 6	(%)

O índice de Visibilidade e a quantidade de energia solar diária da região de Caetité são apresentados na Tabela 2 (NASA, 2014).

Tabela 2 – Irradiação solar e índice de visibilidade da região de Caetité, BA

Mês	Índice de visibilidade	Irradiação solar diária (kWh/m²/dia)
Janeiro	0,554	6,240
Fevereiro	0,583	6,430
Março	0,560	5,800
Abril	0,597	5,530
Maio	0,625	5,090
Junho	0,650	4,920
Julho	0,656	5,120
Agosto	0,665	5,810
Setembro	0,633	6,260
Outubro	0,570	6,130
Novembro	0,503	5,610
Dezembro	0,508	5,730
Média anual = 5,72 (kWh/m²/dia)		

Fonte: NASA (2014)

Tabela 3 – Variáveis de entrada utilizadas para geração de energia eólica

Variáveis – Energia eólica	Valores	Unidade
Velocidade média do vento na região	Tabela 4 (média 8,5)	(m/s)
Altitude do rotor do aerogerador	80	(m)
Altura do anemômetro de medição	80	(m)
Fator estatístico (Weibull)	3	
Rugosidade	0,25	
Hora de Pico da velocidade média do vento	zero	(h)
Escolha do fabricante e modelo da turbina	VESTAS V82 (1,65 MW)	
Número de turbinas	1 a 23	(Unidade)
Custo das turbinas	6.427.000,00	(R\$/unidade)
Custo de manutenção e operação	128.540,00	(R\$/ano)
Taxa de financiamento anual	1, 3, 6	(%)
Altitude da cidade de Caetité	829	(m)
Vida útil dos equipamentos	25	(anos)

## 2.2 Variáveis utilizadas para a geração de energia eólica

O fabricante de aerogeradores VESTAS (VESTAS, 2015) foi escolhido para este projeto. O aerogerador VESTAS V82, de 1,65 MW cada, foi selecionado por ser produzido por um grande produtor de turbinas eólicas e por possuir uma curva de potência condizente com o potencial eólico brasileiro. Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis de entrada utilizadas para a geração eólica, entre elas encontram-se parâmetros técnicos, financeiros e fatores climáticos.

Na Tabela 4 é apresentada a velocidade média do vento encontrada a 80 m de altura na cidade de Caetité (CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2013).

Tabela 4 – Velocidade média do vento encontrado em Caetité,

Mês	Velocidade do vento (m/s)
Janeiro	7,0
Fevereiro	8,0
Março	7,5
Abril	8,0
Maio	8,5
Junho	9,5
Julho	9,5
Agosto	11,0
Setembro	11,0
Outubro	8,0
Novembro	7,5
Dezembro	7,5
Velocidade média anual 8,5 m/s	

Fonte: Camargo Schubert Engenheiros Associados (2013)

### 2.3 Simulação

Para a simulação a rede elétrica foi configurada para receber toda a energia elétrica gerada pela usina híbrida.

Entre as variáveis utilizadas no modelo a taxa anual de financiamento foi selecionada como variável de sensibilidade. Como variáveis de saída foram selecionadas a capacidade fotovoltaica, quantidade de geradores eólicos, valor presente líquido, custo de geração de energia, produção total de energia e capital total investido. A

velocidade do vento de Caetité foi simulada na média da região, ou seja, 8,5 m/s.

A irradiação solar diária de Caetité também foi simulada considerando a média encontrada na região, ou seja, 5,72 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

A variável de sensibilidade taxa real de financiamento anual foi simulada nos intervalos de 1, 3 e 6%, no período de 25 anos. Esta variável de sensibilidade tem o objetivo de quantificar a influência da taxa de financiamento anual no custo de geração de energia da usina. Ao definir a taxa real de financiamento, a inflação não é considerada na análise econômica. Todos os custos tornam-se reais, significando que estão definidos em termos de moeda (Reais) constantes.

Para visualizar as tendências gerais da simulação, o comportamento das variáveis de sensibilidade e variáveis de saída foi observado com auxílio de tabelas de otimização e um gráfico de sensibilidade.

### 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a etapa de simulações o *software Homer Energy* possibilitou verificar diversas configurações, descartou as inviáveis e classificou as viáveis de acordo com o valor presente líquido (VPL) encontrado.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados simulados para a taxa real de financiamento anual equivalente a 6%.

Tabela 5 – Tabela de otimização considerando a taxa de financiamento real de 6% ao ano

Capacidade fotovoltaica	Gerador eólico	Capital total investido	Total VPL	Custo de geração de energia	Produção fotovoltaica	Produção eólica
MWp	Unidade	R\$	R\$	R\$/kWh	kWh/ano	kWh/ano
9	18	146.286.000,00	178.164.128,00	0,187	14.431.081	119.307.104
7	19	145.912.992,00	178.974.080,00	0,191	11.224.167	125.934.624
5	20	145.540.000,00	179.784.048,00	0,192	8.017.262	132.561.560
12	17	150.059.008,00	180.984.240,00	0,192	19.241.460	112.677.544
3	21	145.167.008,00	181.054.240,00	0,194	4.810.365	139.192.016
10	18	149.686.000,00	181.794.208,00	0,193	16.034.524	119.307.104
8	19	149.312.992,00	182.604.192,00	0,194	12.827.617	125.934.624
6	20	148.940.000,00	183.414.160,00	0,195	9.620.730	132.561.560
15	16	153.832.000,00	183.804.368,00	0,195	24.051.766	106.049.936
13	17	153.459.008,00	184.614.352,00	0,195	20.844.872	112.677.544
4	21	148.567.008,00	184.914.432,00	0,197	6.413.809	139.192.016
11	18	153.086.000,00	185.424.320,00	0,196	17.637.976	119.307.104

O custo da geração de energia encontrado na Tabela 5 alcançou a média de R\$ 0,193 o quilowatt gerado, variando de R\$ 0,187 a 0,196 o quilowatt.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados simulados para a taxa real de financiamento anual equivalente a 3 %.

O custo da geração de energia encontrado na tabela 6 alcançou a média de R\$ 0,15 o quilowatt gerado, com variação de R\$ 0,146 a 0,155 o quilowatt.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados simulados para a taxa real de financiamento anual equivalente a 1%.

O custo da geração de energia encontrado na Tabela 7 alcançou a média de R\$ 0,127 o quilowatt gerado, com variação de R\$ 0,123 a 0,131 o quilowatt. O menor custo de geração de energia apresentado nesta taxa é composto por 9 MW pico de tecnologia fotovoltaica e 18 aerogeradores VESTAS com capacidade de 1,65 MW cada. Nesta configuração a produção de energia das fontes solar e eólica representariam respectivamente 14.431.081 e 119.307.104 quilowatts-hora ao ano.

Tabela 6 – Tabela de otimização considerando a taxa de financiamento real de 3% ao ano

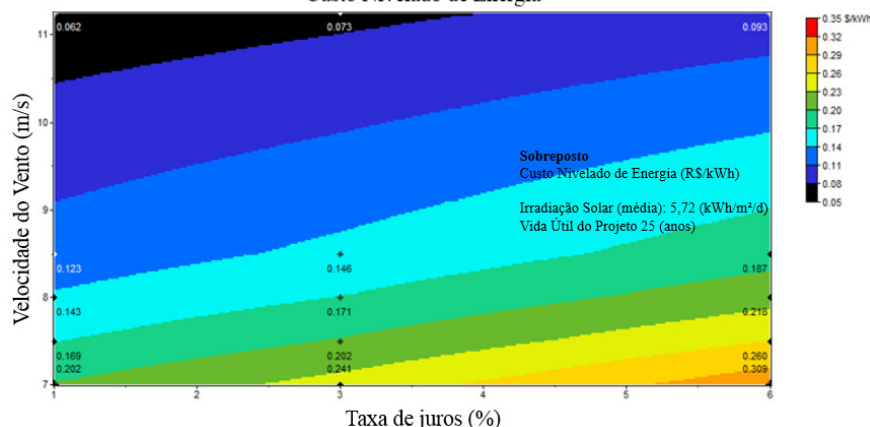
Capacidade fotovoltaica	Gerador eólico	Capital total investido	Total VPL	Custo de geração de energia	Produção fotovoltaica	Produção eólica
MWp	Unidade	R\$	R\$	R\$/kWh	kWh/ano	kWh/ano
9	18	146.286.000,00	189.709.520,00	0,146	14.431.081	119.307.104
7	19	145.912.992,00	190.947.920,00	0,149	11.224.167	125.934.624
12	17	150.059.008,00	192.184.544,00	0,150	19.241.460	112.677.544
5	20	145.540.000,00	192.186.336,00	0,151	8.017.262	132.561.560
10	18	149.686.000,00	193.422.960,00	0,151	16.034.524	119.307.104
3	21	145.167.008,00	194.051.632,00	0,153	4.810.365	139.192.016
15	16	153.832.000,00	194.659.552,00	0,152	24.051.766	106.049.936
8	19	149.312.992,00	194.661.360,00	0,152	12.827.617	125.934.624
13	17	153.459.008,00	195.897.984,00	0,152	20.844.872	112.677.544
6	20	148.940.000,00	195.899.776,00	0,153	9.620.730	132.561.560
11	18	153.086.000,00	197.136.384,00	0,153	17.637.976	119.307.104
4	21	148.567.008,00	198.078.512,00	0,155	6.413.809	139.192.016
14	17	156.859.008,00	199.611.408,00	0,155	22.448.334	112.677.544

Tabela 7 – Tabela de otimização considerando a taxa de financiamento real de 1% ao ano

Capacidade fotovoltaica	Gerador eólico	Capital total investido	Total VPL	Custo de geração de energia	Produção fotovoltaica	Produção eólica
MWp	Unidade	R\$	R\$	R\$/kWh	kWh/ano	kWh/ano
9	18	146.286.000,00	201.205.584,00	0,123	14.431.081	119.307.104
7	19	145.912.992,00	202.870.608,00	0,126	11.224.167	125.934.624
12	17	150.059.008,00	203.336.976,00	0,125	19.241.460	112.677.544
5	20	145.540.000,00	204.535.632,00	0,127	8.017.262	132.561.560
10	18	149.686.000,00	205.002.016,00	0,126	16.034.524	119.307.104
15	16	153.832.000,00	205.468.368,00	0,127	24.051.766	106.049.936
8	19	149.312.992,00	206.667.024,00	0,127	12.827.617	125.934.624
3	21	145.167.008,00	206.993.504,00	0,129	4.810.365	139.192.016
13	17	153.459.008,00	207.133.392,00	0,127	20.844.872	112.677.544
6	20	148.940.000,00	208.332.048,00	0,128	9.620.730	132.561.560
11	18	153.086.000,00	208.798.432,00	0,128	17.637.976	119.307.104
14	17	156.859.008,00	210.929.808,00	0,129	22.448.334	112.677.544
4	21	148.567.008,00	211.186.336,00	0,131	6.413.809	139.192.016

Na Figura 6 é apresentado um gráfico com a representação dos melhores resultados encontrados durante a simulação. No canto direito da Figura 6 observa-se uma

legenda de cores com variação de R\$ 0,05 a R\$ 0,35 por quilowatt-hora gerado.

Figura 6 – Custo de geração de energia encontrado  
Custo Nivelado de Energia

Fonte: Software Homer Energy®, adaptado pelo autor

Os dois eixos, abscissas e ordenadas, são representados na Figura 6, respectivamente, pela taxa real de financiamento e velocidade média do vento. Conforme comentado na metodologia, esta análise foi realizada considerando a velocidade média do vento e irradiação

média diária da região de Caetité, representadas respectivamente por 8,5 m/s e 5,72 kWh/m²/dia.

Neste cenário, considerando as taxas de financiamento simuladas, o custo de geração de energia

apresentaria variação entre R\$ 0,123 e R\$ 0,187 o quilowatt gerado.

## CONCLUSÃO

Os resultados apresentados na Tabela 2 indicam uma irradiação solar praticamente constante na região de Caetité, BA. A velocidade do vento é uma das maiores do Brasil e alcança, na média, 8,5 m/s.

A taxa real de financiamento anual apresentou elevada sensibilidade no custo de geração de energia da usina. A implantação da tecnologia fotovoltaica nos espaços formados entre os geradores eólicos pode representar uma considerável redução nos custos de geração de energia da usina híbrida. A simulação realizada, ao considerar a instalação fotovoltaica em usinas eólicas de Caetité, foi apresentada nas Tabelas 5, 6 e 7.

Na Tabela 7, para uma taxa real de 1% ao ano, velocidade média do vento e irradiação média de Caetité, o custo médio encontrado seria equivalente a R\$ 0,127 o quilowatt gerado. Destaca-se, na Tabela 7, uma instalação de 9 MW pico de tecnologia fotovoltaica e 18 aerogeradores VESTAS com capacidade de 1,65 MW cada. O capital investido nesta configuração representaria R\$ 146.286.000,00 e o valor presente líquido R\$ 201.205.584,00. Estima-se um custo de geração de energia equivalente a R\$ 0,123 o quilowatt, que representa o melhor resultado encontrado entre todas as configurações apresentadas.

O cenário otimista praticado no leilão de Energia de Reserva de 2014 apresentou a importância de R\$ 0,221 e R\$ 0,144 o quilowatt gerado das respectivas fontes, solar e eólica. Neste cenário, a melhor configuração encontrada seria negociada a R\$ 0,162 o quilowatt gerado, o que representa um lucro equivalente de 32%.

O cenário pessimista praticado no leilão de Energia de Reserva de 2014 apresentou a importância de R\$ 0,200 e R\$ 0,138 o quilowatt gerado das respectivas fontes, solar e eólica. Neste cenário, a melhor configuração encontrada seria negociada a R\$ 0,153 o quilowatt gerado, o que representa um lucro equivalente de 25%.

Destaca-se, entre os resultados, a taxa de financiamento real de 1% ao ano, que apresenta viabilidade nos dois cenários, otimista e pessimista.

O estudo demonstrou diversas configurações de usinas híbridas eólica e fotovoltaica instaladas em Caetité, BA, o que contribui no entendimento dos custos de instalação e geração de energia.

## REFERÊNCIAS

- AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, MME, 2001.
- BARBOSA, C. F. **A avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região amazônica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Pará, 2006.

## CAMARGO SCHUBERT ENGENHEIROS

**ASSOCIADOS**. Atlas eólico da Bahia, Ed. Gráfica Burti, 2013.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. Leilão de Energia de Reserva, 2014.

GREENPEACE. **GWEC Global Wind Energy Outlook**, 2014.

**KYOCERA**. Disponível em:

<<https://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares.html>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

LEITE, A. P.; FALCÃO, D. M.; BORGES, C. L. T.

Modelagem de usinas eólicas para estudos de confiabilidade. **Revista Controle & Automação**, v. 17, n. 2, p. 177-188, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-17592006000200006>.

NASA – **National Aeronautics and Space**

**Administration**. Disponível em:

<<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>>. Acesso em: 10 nov. de 2014.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas Híbridos Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília, Ministério de Minas e Energia, 2008.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPREL, CRESESB, Rio de Janeiro, 2014.

STEVENS, M.; SMULDERS, P. T. The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes. **Wind Engineering**, v. 3, p. 132-145, 1979.

**VESTAS**. Disponível em: <<http://www.vestas.com>>.

Acesso em: 10 mar. 2015.

ZUBI, G.; BERNAL, J. L.; FANDOS, A. B. Wind energy (30%) in the Spanish power mix technically feasible and economically reasonable. **Energy Policy**, v. 37, p. 3221-3226, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.012>.