

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR OFF-GRID EM UMA REGIÃO RURAL NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

João Vitor Linhares Silva (UFRN) - joao.linhares1@gmail.com

Mateus Ismael Rodrigues (UFRN) - mateusismael2002@gmail.com

Gabriel Ivan Medina Tapia (UFRN) - gmedinat@ct.ufrn.br

Resumo:

As energias renováveis cada vez mais se destacam como solução aos problemas ambientais que os sistemas convencionais de produção de energia ocasionam. Entre os sistemas renováveis de energia, os sistemas fotovoltaicos e eólicos se caracterizam por serem eficientes no ponto de vista econômico, contudo se configuram por serem intermitentes, causando perda de rendimento do sistema e produção de energia. Para diminuir a intermitência da geração de energia, se apresentam como solução os sistemas híbridos, que se caracterizam em combinar duas ou mais fontes de geração de energia. Este trabalho analisa a viabilidade tecno-econômica de um sistema híbrido eólico-solar off-grid para um assentamento rural. Foi utilizado o software HOMER que permite a modelagem do sistema e otimização econômica baseando nos dados de irradiação solar e velocidade do vento locais, dados de custos dos componentes e pela curva de carga de consumo. Para a análise escolheu-se como localidade o assentamento rural Santo Antônio, situado no município de Touros, interior do estado do Rio Grande do Norte. Após as simulações foram realizadas comparações entre três sistemas: híbrido eólico-solar, solar e o eólico. Os resultados mostraram que entre os três sistemas, o híbrido se destaca como a configuração com o custo menor entre os sistemas, totalizando um NPC (Net Present Cost) de R\$ 810.666,30 em um período de 25 anos de vida útil do projeto e também uma redução de baterias significativa de 24,7% em comparação ao sistema solar e 69,27% comparado ao sistema eólico. Desta forma, conclui-se que o sistema híbrido off-grid apresenta-se como a solução viável diante dos sistemas propostos.

Palavras-chave: Sistema Híbrido, Eólico-Solar, Análise Econômica.

Área temática: Outras fontes renováveis de energia

Subárea temática: Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR *OFF-GRID* EM UMA REGIÃO RURAL NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE

João Vitor Linhares Silva – joao.linhares1@gmail.com

Mateus Ismael Rodrigues – mateusismael2002@gmail.com

Gabriel Ivan Medina Tapia – gmedinat@ct.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas - LSTEA

Resumo. As energias renováveis cada vez mais se destacam como solução aos problemas ambientais que os sistemas convencionais de produção de energia ocasionam. Entre os sistemas renováveis de energia, os sistemas fotovoltaicos e eólicos se caracterizam por serem eficientes no ponto de vista econômico, contudo se configuram por serem intermitentes, causando perda de rendimento do sistema e produção de energia. Para diminuir a intermitência da geração de energia, se apresentam como solução os sistemas híbridos, que se caracterizam em combinar duas ou mais fontes de geração de energia. Este trabalho analisa a viabilidade tecno-econômica de um sistema híbrido eólico-solar off-grid para um assentamento rural. Foi utilizado o software HOMER que permite a modelagem do sistema e otimização econômica baseando nos dados de irradiação solar e velocidade do vento locais, dados de custos dos componentes e pela curva de carga de consumo. Para a análise escolheu-se como localidade o assentamento rural Santo Antônio, situado no município de Touros, interior do estado do Rio Grande do Norte. Após as simulações foram realizadas comparações entre três sistemas: híbrido eólico-solar, solar e o eólico. Os resultados mostraram que entre os três sistemas, o híbrido se destaca como a configuração com o custo menor entre os sistemas, totalizando um NPC (Net Present Cost) de R\$ 810.666,30 em um período de 25 anos de vida útil do projeto e também uma redução de baterias significativa de 24,7% em comparação ao sistema solar e 69,27% comparado ao sistema eólico. Desta forma, conclui-se que o sistema híbrido off-grid apresenta-se como a solução viável diante dos sistemas propostos.

Palavras-chave: Sistema Híbrido, Eólico-Solar, Análise Econômica.

1. INTRODUÇÃO

As maiores dificuldades e os maiores custos para levar energia elétrica estão justamente nas áreas rurais, onde comunidades de baixa densidade populacional, se encontram em locais de difícil acesso e longe das linhas de transmissão. Muitas vezes estas comunidades podem estar também próximas a áreas de proteção ambiental, o que torna o processo de eletrificação complexo (Dal Bem et al., 2016).

Nesse contexto, torna-se factível a opção pela geração distribuída em zonas rurais, que se caracteriza por permitir que a geração elétrica ocorra próxima ao consumidor, podendo atuar em complementariedade com a rede elétrica ou de forma autônoma, dispensando a necessidade das linhas de transmissão, bem como do restante do sistema de distribuição. A opção convencional de geração elétrica nesses casos é o gerador a diesel, que não se mostra uma solução permanente para áreas isoladas em virtude de diversos fatores, tais como a dificuldade relacionada ao transporte recorrente de combustível, a complexidade na manutenção do gerador e as emissões nocivas ao meio ambiente (Javed et al., 2019).

Em 2014, o setor de geração de energia no Brasil foi responsável pela emissão de 479,1 milhões de toneladas gás carbônico equivalente (mt CO₂e), caracterizando-se como uma das principais fontes de gases-estufa da economia nacional segundo dados do Observatório do Clima (2015), um resultado em parte da crise hídrica que prejudicou a geração hidrelétrica naquele ano. Ressalta-se que o segundo maior consumo de eletricidade no país, após o industrial, é o de uso residencial, contribuindo com cerca de 21,4 % do total (BEN, 2018).

A fim de diminuir os impactos ambientais e o uso de fontes fósseis, as energias renováveis se apresentam como solução. Entre elas, são citadas as energias fotovoltaicas, eólica, biomassa, geotérmica, ondas, hidroelétricas etc. Dentre estas, a energia eólica e solar são as mais rentáveis, no ponto de vista econômico (Buonomano et al., 2018).

Ainda que haja um crescente desenvolvimento dessas tecnologias, há uma grande desvantagem em seu uso e isso surge em decorrência de seu comportamento indeterminado, pois há dependência do tempo. É necessário tempo climático favorável para utilização de painéis solares, tendo em vista que é necessário sol; e das turbinas eólicas, porque é necessário vento (Acuña et al., 2017). Devido à natureza intermitente de muitas energias renováveis, é necessário combinar mais de uma fonte para ter um sistema confiável, constituindo um sistema híbrido baseado em fontes de energia renováveis. (Anoune, 2018). Neste caso, no sistema híbrido eólico-solar, uma fonte de energia compensa o déficit da outra (Huang et al., 2014), pois há uma complementariedade entre a energia eólica e a solar: quando há alta irradiação solar e pouco vento e quando há muito vento e pouca irradiação solar.

Segundo (Lima, 2016), o estado do Rio Grande do Norte apresenta características favoráveis ao uso de energia híbrida eólico-solar, possuindo regiões com grandes quantidades de vento e irradiação solar. Mesmo assim, as energias solar e eólica têm a característica de ser intermitente. Logo, para obter uma fonte segura de fornecimento de energia, é

necessário o acoplamento de bancos de baterias ao sistema, que disponibiliza energia em horas de intermitência tanto da energia eólica e solar.

A análise técnica e econômica de um sistema híbrido é essencial para a utilização eficiente no uso de energias renováveis (Sinha, 2014). Com base nessa concepção, têm sido desenvolvidos diversos estudos com o intuito de analisar o desempenho e a viabilidade econômica dos sistemas híbridos dessa natureza, os quais carregam um grau de complexidade maior quando comparados aos sistemas não híbridos. Essa complexidade dificulta a otimização do sistema, o que acarreta a necessidade de um estudo particular para cada caso (Lopez, 2012).

Para lidar com a complexidade do sistema, é necessário o uso de ferramentas de otimização, como softwares que analisam a sua viabilidade econômica. Entre os softwares, o HOMER (Hybrid Optimization Model for Electrical Renewable) desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) é amplamente utilizado. O HOMER Pro permite simulações de sistemas on-grid e off-grid que geram eletricidade por várias combinações, entre elas módulos fotovoltaicos, aerogeradores, geradores por biomassa, micro-turbinas, célula de combustível, baterias, armazenamento por nitrogênio e geradores auxiliares com várias opções de combustíveis (Singh et al., 2015).

Diante de todo o contexto, este trabalho tem o objetivo de apresentar a viabilidade técnica e econômica de um sistema híbrido autônomo eólico-solar localizado no interior do estado do Rio Grande do Norte. Escolheu-se como localidade, o assentamento Santo Antônio, localizado no município de Touros, no interior do estado. Foi utilizado o software HOMER Pro para a simular as melhores configurações de sistemas possíveis. Também, foram obtidos dados de consumo elétrico de casas próximas à região para simular as curvas de cargas utilizadas no software, além de uma pesquisa de mercado com fabricantes nacionais para obter preços reais dos equipamentos usados no sistema. Após todas as simulações, foi discutida a viabilidade entre os sistema híbrido eólico-solar e o sistema eólico e solar isolados.

2. METODOLOGIA

Para realizar a análise do sistema proposto, utilizou-se o software HOMER Pro, que permite simular o sistema híbrido, eólico e solar a partir de dados dos equipamentos utilizados, dados climáticos, dados econômicos e da curva de carga do conjunto de casas que o sistema irá suprir. Com os dados, o software realiza processos iterativos para entregar a melhor configuração proposta para o sistema.

2.1 Coleta de dados

Para a coleta dos dados climáticos, escolheu-se a região do município de Touros, região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, visto que o interior do estado é propício ao uso de energia eólica e solar, segundo estudos. A região, um assentamento rural, caracteriza-se por ser espaço tanto de moradia como de trabalho, abrigando dezenas de famílias de trabalhadores rurais.

Os parâmetros climáticos usados para a simulação do software são as médias mensais de velocidade do vento, média mensal da irradiação solar e média mensal de temperatura do ambiente. Para obter os dados, foi utilizado o banco de dados de Irradiância Solar e Meteorologia de Superfície da NASA no qual fornece a média de dados mensais feitas por um período de 10 anos para a velocidade do vento e 20 anos para a irradiação horizontal e temperatura.



Figura 1 – Imagem de satélite da região escolhida para obter os dados climáticos (Google Maps, 2019)

Por meio do contato com moradores do assentamento, obtiveram-se informações relevantes como aparelhos elétricos presentes nas residências e os respectivos tempos de uso, além de contas de luz que forneceram o consumo mensal durante um ano nas respectivas habitações. Tais informações possibilitaram estimar o consumo elétrico mensal durante o ano e

criar a curva de carga. Por último, foi feita uma pesquisa de mercado com fabricantes nacionais, a fim de obter preços dos componentes para o sistema híbrido, incluindo preços médios de baterias, aerogeradores, placas fotovoltaicas, inversores a fim de realizar o cálculo com maior precisão possível, valores econômicos para a simulação do sistema.

2.2 Modelo do sistema

O modelo do sistema principal, foi proposto sendo um sistema híbrido composto por módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas, inversores de corrente contínua para alternada e baterias conforme a Fig. 2. O sistema funciona com dois barramentos, um de corrente contínua, onde são conectadas as baterias e os módulos fotovoltaicos e o barramento de corrente alternada, que liga o gerador eólico e as residências. O inversor faz a ligação entre os dois barramentos, convertendo a corrente contínua para a corrente alternada, vice-versa.

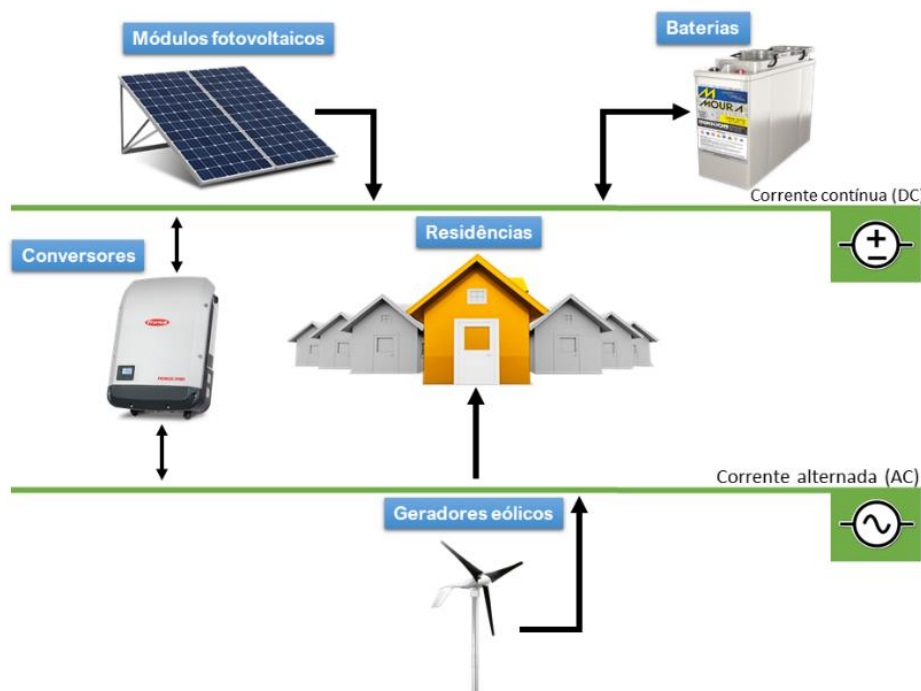


Figura 2 - Modelo proposto para o sistema híbrido

Comparou-se este modelo com os sistemas não híbridos eólico e solar, para a análise econômica.

2.3 Simulação no software HOMER

Após a seleção de equipamentos, o software simula a operação do sistema realizando cálculos de balanço de energia em cada intervalo de tempo diária (geralmente em cada hora) e compara a demanda elétrica no determinado intervalo de tempo com a energia que o sistema pode fornecer e assim realiza o cálculo do fluxo de energia necessário de cada equipamento. Esta simulação é realizada dentro de um conjunto de soluções onde é determinado o máximo e mínimo que cada equipamento pode fornecer em capacidade energética. Em seguida, por meio de processos iterativos, o software determina se a configuração é viável (isto é, se ela pode atender à demanda elétrica nas condições especificadas) e estima o custo de instalação e operação do sistema durante a vida útil do projeto, tendo como objetivo o melhor modelo no ponto de vista econômico.

O algoritmo que realiza os processos iterativos tem com o objetivo reduzir o NPC (*Total Net Present Cost*), que a cada processo iterativo realizado no espaço de soluções, tem o valor do NPC reduzido.

Para o cálculo de potência energética de cada equipamento, o HOMER utiliza as Eqs. (1), (2), (3), (4) e (5).

Placas Solares. Para o cálculo da potência dos módulos fotovoltaicos, o HOMER utiliza a Eq. (1):

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \frac{G_T}{G_{T,SC}} \quad (1)$$

Y_{PV} é a capacidade da placa fotovoltaica medida em (kW); f_{PV} é o fator de redução em (%), no qual tem o objetivo de compensar a potência produzida para níveis de produção real. Fatores como sujeira, perdas de fiação, sombreamento do local e outros tipos de fatores externos são considerados; G_T é a irradiação solar horizontal incidente, calculada pelos dados de Irradiância Solar e Meteorologia de Superfície da NASA em (kW/m²) e, por último, $G_{T,SC}$ a irradiação solar incidente na placa em condições padrões informadas pelo fabricante (kW/m²).

Aerogerador. Para o cálculo da potência eólica do aero-gerador, o software realiza três etapas. Primeiramente, é calculada a velocidade do vento na altura em que se encontra a turbina eólica pela Eq. (2).

$$v_{cubo} = v_{anem} \frac{\ln(z_{cubo}/z_0)}{\ln(z_{anem}/z_0)} \quad (2)$$

Sendo v_{cubo} a velocidade do vento na altura do cubo do aerogerador; v_{anem} a velocidade do vento medida pelo anemômetro; z_{cubo} a altura do chão até o cubo do aerogerador; z_{anem} a altura do anemômetro e z_0 a rugosidade aerodinâmica referente ao bioma caatinga, característico no estado do Rio Grande do Norte.

Com os dados de velocidade do vento na altura do cubo do aerogerador e da curva de potência do aerogerador modelado no software, é possível obter a potência sobre condições normais de temperatura e pressão. Após obter a potência o valor é ajustado com a Eq. (3):

$$P_w = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot P_{tp} \quad (3)$$

P_w é a potência de saída ajustada, em (kW); ρ a densidade do ar real (kg/m^3), medida em função das temperaturas obtidas pelo banco de dados da NASA; ρ_0 a densidade padrão ($1,225 \text{ kg/m}^3$) e P_{tp} a potência obtida pela curva de carga informada pelo fabricante do aerogerador.

Baterias. O HOMER calcula a potência máxima em que as baterias podem carregar e descarregar. Para calcular o carregamento máximo da bateria, o HOMER utiliza a Eq. (4).

O software impõe três limitações diferentes para calcular o carregamento máximo.

$$P_{bat,cmax} = \frac{\text{MIN}(P_{bat,cmax,cin}, P_{bat,cmax,tmc}, P_{bat,cmax,cor})}{\eta_{bat,c}} \quad (4)$$

$P_{bat,cmax,cin}$ é a quantidade máxima de potência em que o modelo de bateria cinética pode carregar (kW); $P_{bat,cmax,tmc}$ é a potência definida pela carga máxima da bateria informado pelo fabricante (kW); $P_{bat,cmax,cor}$ é a potência de definida pela corrente máxima da bateria (kW) e $\eta_{bat,c}$ a eficiência de carregamento da bateria. O software utiliza como a potência máxima da bateria o menor valor dentre as três potências.

Para o descarregamento, o HOMER utiliza a Eq. (5).

$$P_{bat,dmax} = \eta_{bat,d} P_{bat,dmax,cin} \quad (5)$$

No qual $P_{bat,dmax,cin}$ é a quantidade máxima de potência em que o modelo de bateria cinética pode descarregar (kW) e $\eta_{bat,d}$ a eficiência de descarregamento da bateria.

Inversores. O cálculo de potência de um inversor no software é dado pela Eq. (6).

$$P_{in} = \frac{P_{pico}}{\eta_{inv}} \quad (6)$$

P_{pico} é o pico de potência máxima dado pelo sistema e η_{inv} é a eficiência de saída do inversor.

2.4 Parâmetros econômicos do Software

Para calcular o melhor modelo de sistema, o software utiliza como base o NPC (*Net Present Cost*) que engloba todos os custos em toda sua vida útil menos a receita gerada por revenda dos equipamentos durante todo o projeto e também a venda de energia à concessionária em casos de sistemas *on-grid*, mostrado na Eq. (7).

$$C_{NPC,total} = C_{total} - C_{revenda} \quad (7)$$

O C_{total} inclui os custos de capital inicial, reposição, manutenção, entre outros. Outro parâmetro importante é o COE (*Levelized cost of energy*), que divide o custo anual total do sistema pela energia total servida, conforme a Eq. (8).

$$COE = \frac{C_{anual,total}}{E_{distribuida}} \quad (8)$$

$C_{anual,total}$ representa o custo total anualizado do sistema (R\$/ano) e $E_{distribuida}$ a energia total produzida durante o ano (kWh/ano). O cálculo do custo anual total, é função das taxas de juros anual e o tempo de projeto, calculado pela Eq. (9).

$$C_{anual,total} = CRF(i, T_{proj}) \cdot C_{NPC,total} \quad (9)$$

Sendo este, $C_{NPC,total}$ o custo líquido total do sistema (R\$); i a taxa de juros; T_{proj} o tempo de vida total do projeto.

O $CRF(i, N)$ (*Capital Recovery Factor*) é a função que retorna o fator de recuperação de capital. Este índice é usado para calcular a porcentagem do custo total pago anualmente. Seu cálculo é feito por meio da Eq. (10).

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (10)$$

com a variável N sendo o tempo de vida útil do projeto, utilizado aqui o tempo de 25 anos de projeto.

No cálculo da taxa de juros real, o HOMER utiliza a Eq. (11):

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (11)$$

no qual i' é a taxa de juros nominal e f a taxa de inflação esperada. A taxa de juros real é utilizada para relacionar os custos fixos do projeto com os custos anuais, utilizando as taxas de juros da localidade em que se encontra o projeto.

Afim de obter o valor da taxa de juros nominal foi utilizada a taxa do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC, 2019) com o valor de 6% ao ano, na qual refere-se à taxa de juros apurada nas operações de empréstimos entre as instituições financeiras do Brasil. Também para o cálculo da inflação real, foi utilizado o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA, 2019) oficial do mês de agosto de 2019, onde o índice acumulado nos últimos 12 meses foi de 3,43%.

O software fornece também outro parâmetro importante para a análise econômica do sistema. O $C_{operacional}$ corresponde aos custos referentes a manutenção do sistema. Este valor é obtido pela subtração entre $C_{anual,total}$ e $C_{anual,cap}$, conforme a Eq. (12).

$$C_{operacional} = C_{anual,total} - C_{anual,cap} \quad (12)$$

O $C_{anual,cap}$ corresponde ao custo inicial do sistema, multiplicado pelo fator de recuperação de capital mostrado na Eq. (9).

3 RESULTADOS

3.1 Dados meteorológicos

Após obter os dados de irradiação horizontal global e da velocidade do vento por meio da base de dados da NASA, foi obtido uma média anual de irradiação no assentamento Santo Antônio de 5,58 kWh/m²/dia e 5,50 m/s de velocidade do vento. A Fig. 3 mostra o gráfico mensal dos dados.

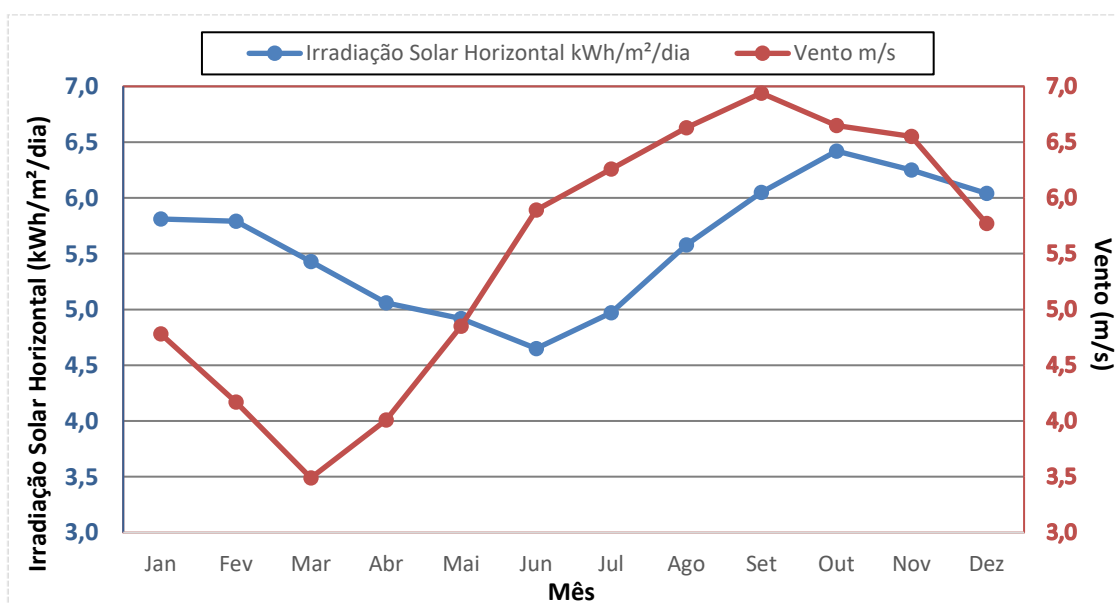


Figura 3 – Irradiação solar e velocidade do vento medidas mensalmente no assentamento Santo Antônio, município de Touros.

Foi necessário coletar dados relacionados à temperatura ambiente do local onde será dimensionado o sistema híbrido, já que as placas voltaicas perdem rendimento em função da temperatura em que são expostas. Os dados obtidos da média diária mensal estão contidos da Fig. 4. A média diária anual é de 26,09 °C.

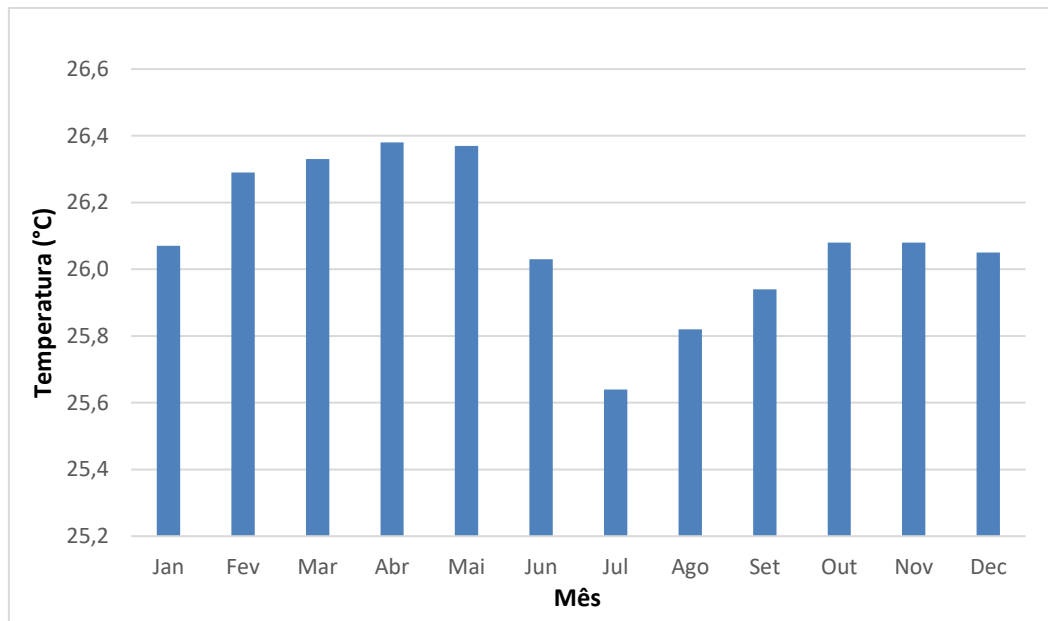


Figura 4 – Média de temperatura mensal.

3.2 Consumo elétrico

Para o cálculo do consumo elétrico usado no sistema, realizou-se uma coleta de dados mensais de energia consumida pelas casas do conjunto, totalizando uma média diária de 4,366 kWh por cada casa do projeto. Para alimentar o software HOMER é necessário ter a média de consumo em horas de cada dia. Por meio de entrevistas com moradores do assentamento foi coletado informações de uso de aparelhos domésticos, para que assim ser realizada a curva de carga próxima do real possível apresentada na Fig. (5).

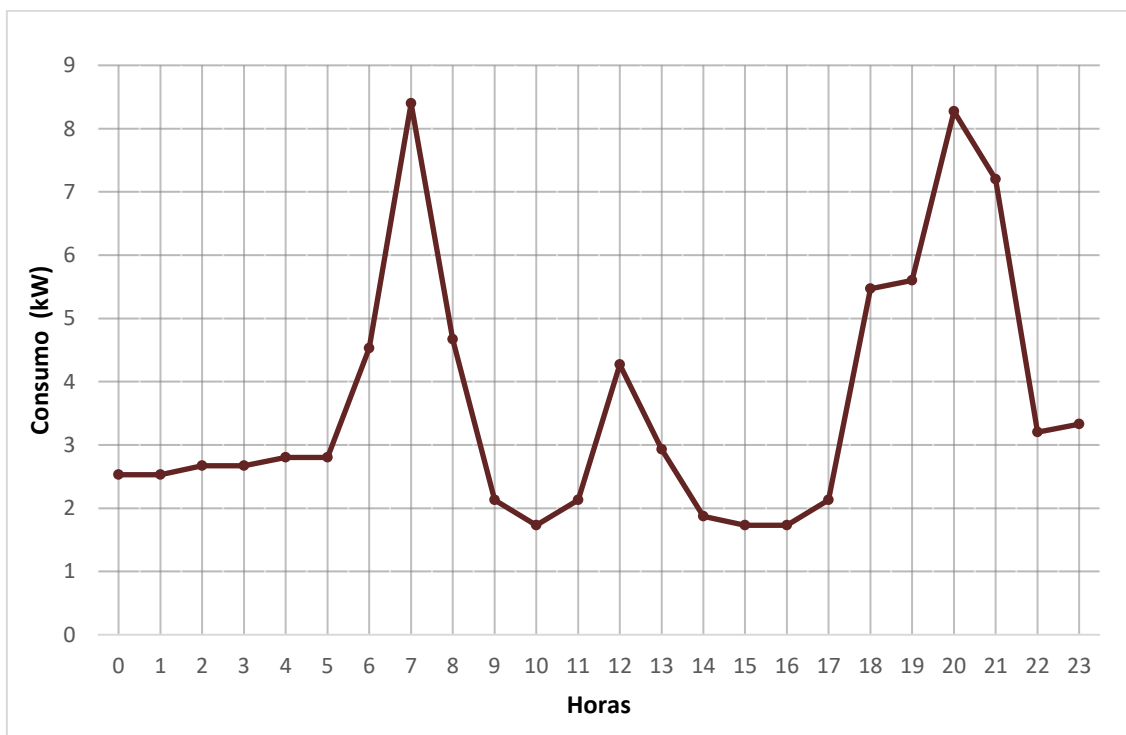


Figura 5 – Curva de carga referente às 20 casas do projeto

O modelo proposto para o projeto é uma comunidade localizada no assentamento, composta por 20 casas sendo obtido no total, uma carga média diária de 87,32 kWh, com um pico de carga de 8,4 kW.

3.3 Pesquisa de mercado e especificações técnicas

Para o cálculo de preços dos equipamentos utilizados no sistema, foi realizado uma pesquisa de mercado entre os fornecedores nacionais dos componentes. Para os painéis fotovoltaicos obteve-se uma média de preço por cada 250W de painéis, também, foi realizado uma média de preço para o inversor. Os equipamentos restantes foram modelados na biblioteca do software de acordo com as informações fornecidas pelos fabricantes. A Tab. 1 mostra os dados necessários pelo software para realizar a simulação.

Tabela 1 – Dados econômicos e especificações técnicas dos equipamentos.

Equipamentos	Dados	Valores
Módulos fotovoltaicos	Modelo:	Módulo genérico
	Capacidade:	250 W
	Custo:	R\$ 850,00
	Reposição:	R\$ 850,00
	Fator de redução:	80%
	Manutenção:	R\$ 40,00/ano
	Vida útil:	25 anos
Aerogerador	Modelo:	Eletrovento HLV 8.0
	Capacidade:	10 kW
	Custo:	R\$ 140.000,00
	Reposição:	R\$ 100.000,00
	Altura do cubo:	24 m
	Manutenção:	R\$ 300,00/ano
	Vida útil:	25 anos
Baterias	Modelo:	Moura Clean 12MF220
	Capacidade:	220 Ah
	Custo:	R\$ 1200,00
	Custo de reposição:	R\$ 1045,00
	Custo de manutenção:	R\$ 10,00/ano
	Vida útil:	4 anos
Inversor	Modelo:	Inversor genérico
	Capacidade:	1 kW
	Custo:	R\$ 1.200,00
	Custo de reposição:	R\$ 1.200,00
	Eficiência:	95%
	Vida útil:	15 anos

3.4 Resultados

Após as simulações, o software fornece resultados otimizados dos três sistemas analisados para o local. A Tab. 2 apresenta todos os dados relacionados ao custo e informações dos equipamentos de cada sistema durante o período de 25 anos do projeto. Nota-se que no sistema híbrido há um menor custo líquido total (NPC) e também um menor custo operacional por cada ano.

Tabela 2 – Resultados das simulações contendo os valores econômicos de cada modelo de sistema

Sistema	Capacidade Fotovoltaica (kW)	Nº de Turbinas eólicas	Nº de Baterias	Capacidade do Inversor(kW)	NPC (R\$)	COE (R\$/ kWh)	Custo Operacional (R\$/ano)	Custo inicial (R\$)
Híbrido	44,1	1	67	10,3	810.666,30	1,38	23.193,10	382.602,73
Fotovoltaico	49,5	-	89	10,9	820.872,90	1,40	28.867,17	288.085,77
Eólico	-	10	218	32,3	2.706.360,6	4,60	54.506,15	1.700.367,29

As Tabs. 3, 4 e 5 apresentam dados de custos iniciais, manutenção, reposição e revenda de cada sistema. O custo de reposição durante os 25 anos do projeto é relacionado às baterias, com o percentual de 38,33% do custo total do sistema híbrido, 48,89% do custo do sistema fotovoltaico e 36,32% do custo do sistema eólico.

Tabela 3 – Tabela contendo o NPC detalhado de cada componente do Sistema Híbrido

Equipamentos	Custo inicial (R\$)	Reposição (R\$)	Manutenção (R\$)	Revenda (R\$)	Total (R\$)
Turbina eólica	140.000,00	-----	5.536,95	-----	145.536,95
Placas Solares	149.814,80	-----	130.120,38	-----	279.935,18
Baterias	80.400,00	302.132,94	12.365,86	- 28.429,48	366.469,32
Inversor	12.387,92	8.572,52	-----	- 2.235,60	18.724,84
Sistema	382.602,73	310.705,46	148.023,19	- 30.665,07	810.666,30

Tabela 4 – Tabela contendo o NPC detalhado de cada componente do sistema somente fotovoltaico

Equipamentos	Custo inicial (R\$)	Reposição (R\$)	Manutenção (R\$)	Revenda (R\$)	Total (R\$)
Placas Solares	168.205,74	-----	146.093,67	-----	314.299,41
Baterias	106.800,00	401.340,77	16.426,29	-37.764,53	486.802,54
Inversor	13.080,04	9.051,46	-----	-2.360,5	19.771,00
Sistema	288.085,77	410.392,23	162.519,97	-40.125,03	820.872,95

Tabela 5 – Tabela contendo o NPC detalhado de cada componente do sistema somente eólico

Equipamentos	Custo inicial (R\$)	Reposição (R\$)	Manutenção (R\$)	Revenda (R\$)	Total (R\$)
Turbina eólica	1.400.000,00	-----	55.369,52	0,00	1.455.369,52
Baterias	261.600,00	983.059,41	40.235,19	-92.501,87	1.192.392,73
Inversor	38.767,29	26.827,20	-----	-6.996,17	58.598,31
Sistema	1.700.367,29	1.009.886,61	95.604,71	-99.498,05	2.706.360,56

A produção elétrica mensal do sistema híbrido é mostrada na Fig. 6. Observa-se na figura que o aerogerador é responsável por 24,4% da energia produzida e as placas voltaicas produzem 75,6%. Além disso, a produção de energia é elevada no segundo semestre, devido a maior incidência de ventos conforme visto na Fig. 3. No total, o sistema híbrido é capaz de produzir 94.801 kWh/ano.

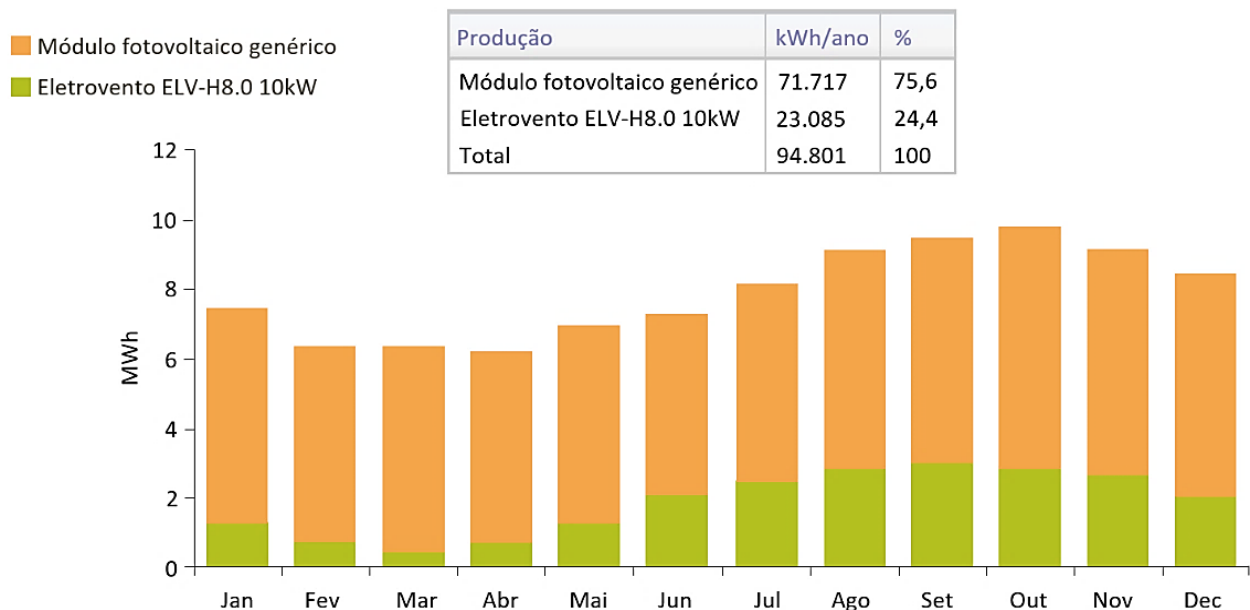


Figura 6 – Produção elétrica mensal do sistema híbrido.

4 CONCLUSÃO

Os resultados mostram que para sistemas *off-grid* o sistema híbrido apresenta-se como a solução viável diante dos sistemas propostos. O resultado é visto por meio dos custos do NPC, COE e pelos custos dos equipamentos. A maior

redução em comparação aos outros sistemas foi referente a quantidade de baterias, de 24,7% em relação ao sistema somente solar e 69,27% em relação ao sistema eólico, além de que o acoplamento do aerogerador resultou em uma redução de 11% em custos de placas fotovoltaicas, mostrando que a complementariedade dos sistemas fotovoltaicos e eólicos na região estudada reduz o uso de baterias e aumenta a eficiência da produção elétrica produzindo mais energia com menos equipamentos.

Ainda assim, em comparação à sistemas conectados à rede elétrica, o sistema híbrido proposto se torna menos atrativo devido ao seu alto custo. Sistemas conectados à rede elétrica não necessitam do uso de baterias para armazenar o excedente elétrico, visto que ele é enviado a rede elétrica da concessionária e é retornado ao cliente quando o sistema híbrido não é capaz de suprir a demanda elétrica. Conforme a Tab. 3, os custos totais das baterias representam 45,21% do custo total do projeto. Este valor significativo é resultado vida útil de 4 anos das baterias estacionárias de chumbo-ácido. Entretanto, os sistemas *off-grid* podem ser viáveis em locais isolados, onde o custo para levar energia elétrica por meio de concessionárias se tornam altos e inviáveis à companhia elétrica.

Espera-se que em um futuro próximo, sistemas híbridos *off-grid* possam ser mais viáveis economicamente, pois, conforme o avanço da tecnologia é esperada a redução dos custos de produção dos equipamentos utilizados além do aumento da eficiência dos mesmos e também o desenvolvimento e utilização de outros sistemas de armazenamentos mais eficientes.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e também ao Laboratório de Sistemas Térmicos e Energias Alternativas (LSTEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

REFERÊNCIAS

- Acuña, L. G., Padilla, R. V., Mercado, A. S., 2017. Measuring reliability of hybrid photovoltaic-wind energy systems: A new indicator”. *Renewable Energy*, vol. 106, pp. 68-77.
- Anoune, K., Bouya, M., Astito, A., & Abdellah, A. B., 2018. Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 652-673.
- BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2018.
- Buonomano, A., Calise, F., D'accadia, M. D., Vicidomini, M., 2018. A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment. *Energy*, Vol. 155, pp. 174-189.
- Dal Bem, J. C. T., Barbi, I., Normey-Rico, J. E., Ruther. R., 2016. Solução para Bombeamento de Água em Propriedades Rurais Utilizando Energia Solar Fotovoltaica. *Revista Brasileira de Energia Solar* ano 7, volume VII número 1, pp. 50-57.
- Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>>. Acessado em: 5 nov. 2019.
- Huang, Q., Shi, Y., Wang Y., Lu, L., Cui, Y., 2014. Multi-turbine wind-solar hybrid system. *Renewable Energy*, Vol. 76, pp. 401-407.
- IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo. Rio de Janeiro: IBGE, ago. 2019.
- Javed, M. S., Song, A., Tao, M., 2019. Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm, *Energy*, vol. 176, n. 1, pp. 704-717.
- Lima, J. A., 2016. Análise da viabilidade da geração híbrida de energia solar e eólica no nordeste brasileiro, Tese de Doutorado, PPGRN, UFCG, Campina Grande.
- Lopez, R.A., 2012. *Energia Solar para a produção de eletricidade*, 1. ed, São Paulo, SP.
- SELIC - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia. Banco Central do Brasil. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic/>>. Acessado em: 10 set. 2019.
- Singh, A., Baredar, P., & Gupta, B., 2015. Computational simulation & optimization of a solar, fuel cell and biomass hybrid energy system using HOMER pro software, *Procedia Engineering*, vol. 127, pp. 743-750.
- Sinha, S., & Chandel, S. S., 2014. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 192-205.

TECHNO-ECONOMIC ANALYSIS OF A HYBRID PV-WIND OFF-GRID ENERGY SYSTEM IN A RURAL AREA IN THE STATE OF RIO GRANDE DO NORTE

Abstract. *Renewable energies increasingly stand out as a solution to the environmental problems that conventional energy production systems cause. Among renewable energy systems, photovoltaic and wind power systems are economically efficient, but they are intermittent, causing loss of efficiency and power production. To reduce the intermittency of power generation, the solution is hybrid systems, which combine two or more sources of power generation. The aim of this work is size and analyze the techno-economic viability of an off-grid PV-wind hybrid system located in a rural settlement. HOMER software was used, which allows the system modeling and economic optimization based on local solar irradiation and wind speed, costs of components and the system load curve. The locality chosen was the rural settlement Santo Antônio, located in the district of Touros, in the interior of the state of Rio Grande do Norte. After the simulations, comparisons were made among three systems: wind-solar hybrid, solar and wind. The results showed that among the three systems, the hybrid stands out as the lowest configuration cost configuration between the systems, totaling a NPC (Net Present Cost) of R\$ 810.666,30 over a 25-year project lifetime and also a significant battery reduction of 24,7% compared to the solar system and 69,27% compared to the wind system. Thus, it can be concluded that the off-grid system is the viable solution to the proposed systems.*

Key words: *Hybrid System, PV-Wind, Economic Analysis.*