

# **SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR PARA ELEVAÇÃO DE PETRÓLEO**

**Código do Trabalho: 42010**

José Wilson Lage Nogueira

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [wilson@ufrnet.br](mailto:wilson@ufrnet.br)

Daniel da Silva Nascimento

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [danielveio@yahoo.com.br](mailto:danielveio@yahoo.com.br)

Jander Teixeira Dantas

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [jandermec@yahoo.com.br](mailto:jandermec@yahoo.com.br)

Igor Mont'Alverne Seabra Jucá

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [igorseabra@uol.com.br](mailto:igorseabra@uol.com.br)

Ricardo Castilhos de Araújo Neves

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [ricardocastilhos@yahoo.com.br](mailto:ricardocastilhos@yahoo.com.br)

*Resumo.* Neste trabalho propõe-se um sistema híbrido com o intuito de gerar energia elétrica, criando assim condições para a elevação de petróleo em poços que exijam pequena potência e tenham baixa produtividade, em áreas não servidas pela rede elétrica convencional. O estudo está direcionado para condições específicas do Nordeste brasileiro, onde são encontradas situações favoráveis para o desenvolvimento do trabalho. Sistema híbrido é um sistema de geração de energia que pode combinar duas ou mais fontes. O sistema em análise é composto pelas fontes solar e eólica. Para a realização deste trabalho inicialmente foi definido o local de estudo, onde alguns requisitos foram obedecidos: incidência adequada de radiação solar, incidência de ventos satisfatórios, e inexistência de rede convencional fornecedora de energia. Para a obtenção e estimativas de dados eólicos e solares, foram utilizados atlas eólicos e solarimétricos, além de dados medidos na região. A modelagem matemática do sistema foi realizada para os dispositivos de transformação das fontes. Na simulação atual foram considerados diferentes cenários de aproveitamento das fontes. Esse sistema pode ser utilizado como uma forma alternativa e não poluente de geração de energia em substituição aos motores a diesel geralmente instalados nesses locais.

Palavras-chave: Sistema híbrido, Elevação de petróleo, Fontes alternativas de energia.

## **1. INTRODUÇÃO**

De origem natural e não renovável, desde a sua descoberta, o petróleo tem cada vez mais se tornado uma matéria-prima indispensável à vida da sociedade moderna, sendo o componente básico de milhares de produtos.

Se por um lado o petróleo já é indispensável, por outro as fontes renováveis de energia, dentre elas, as fontes solar e eólica ganham cada vez mais espaço como alternativa não poluidora para geração de energia. Essa afirmação pode ser comprovada segundo estudos realizados pela United Nations Solar Energy Group for Environment and Development (UNSEGED) e apresentados na Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento e Meio Ambiente realizada no Rio de Janeiro em 1992, onde mostram que a participação de fontes renováveis no cenário mundial saltará

de 20% em 1985, basicamente hidrelétricas, para cerca de 53% em 2025, agora também com a participação das fontes solar, eólica, biomassa e geotérmica (Aldabó, 2002).

Este trabalho propõe um sistema híbrido eólico-solar com o objetivo de gerar energia elétrica necessário ao acionamento de um motor elétrico acoplado a uma bomba para elevação de petróleo.

O estudo desse sistema foi direcionado para condições específicas do Nordeste brasileiro pois essa região apresenta velocidades de ventos e radiação solar adequadas para o aproveitamento híbrido. Na definição do local específico de análise deste sistema também levou-se em consideração a existência de poços de produção de petróleo que apresentasse baixa produtividade (até 5 m<sup>3</sup>/dia) e a ausência da rede elétrica convencional fornecedora. Assim, observando estes parâmetros foi selecionada a região de Icapuí/CE.

Esse estudo justifica-se devido ao alto custo necessário para se transmitir a energia da rede convencional para algumas regiões de produção de petróleo, em terra, onde há pequena demanda.

## 2. SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR

O sistema híbrido é um sistema autônomo de geração de energia que combina duas ou mais fontes podendo estas serem convencionais e/ou alternativas. Neste caso específico o sistema será composto pelas fontes solar e eólica.

Esse sistema é composto basicamente por:

- ✓ Turbina eólica: responsável pela transformação da energia eólica em eletricidade;
- ✓ Painéis fotovoltaicos: responsável pela transformação da energia solar em energia elétrica;
- ✓ Banco de baterias: tem a função de armazenar energia quando a produção excede o consumo e de fornecer energia quando não houver suficiente geração.
- ✓ Sistema de controle: considerado o ponto principal para o sucesso de um sistema híbrido de energia. Sua função principal é selecionar o melhor modo de operação para o sistema em função dos objetivos da aplicação, levando em consideração a configuração do sistema e as restrições técnicas. Ele é responsável pela supervisão e coordenação da operação do sistema como um todo, distribuindo o controle de operação dos componentes com os respectivos controladores e reguladores;
- ✓ Retificador/regulador: tem a função de retificar e/ou regular a tensão de saída dos geradores de energia a tensão nominal do banco de baterias (12V, 24V, etc.), prevenindo o banco contra sobrecargas ou descargas excessivas.

Na figura 1 se pode visualizar um esquema ilustrativo do sistema híbrido em análise.

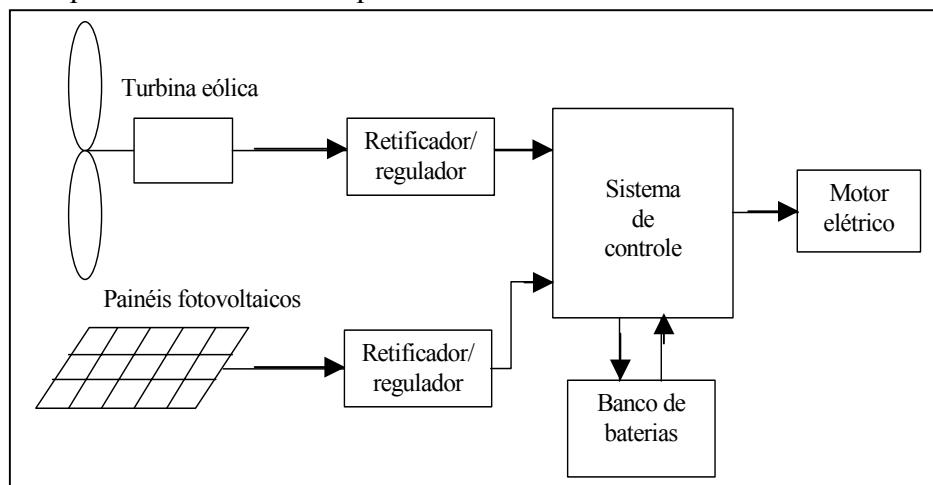


Figura 1 – Desenho esquemático do sistema híbrido.

## 3. OBTENÇÃO DE DADOS EÓLICOS E SOLARES

### 3.1. Radiação Solar

Os dados de radiação solar foram obtidos do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2000) para a cidade de Jaguaruana/CE, que fica bem próxima a Icapuí/CE, admitindo-se assim inexistência de grandes diferenças na incidência de radiação solar em relação ao nosso local de estudo.

Na tabela 1 se pode visualizar as médias mensais obtidas para a incidência de radiação solar em Jaguaruana/CE (Atlas Solarimétrico, 2000).

Tabela 1. Incidência de radiação solar na cidade de Jaguaruana/CE.

Energia solar		
Meses	Energia disponível (MJ/m <sup>2</sup> .dia)	Energia gerada (kW.h/m <sup>2</sup> .mês)
Janeiro	17,1	14,73
Fevereiro	17,4	13,53
Março	16,1	13,86
Abril	16,4	13,67
Maio	15,6	13,43
Junho	15,2	12,67
Julho	16,1	13,86
Agosto	18,4	15,84
Setembro	19,8	16,50
Outubro	19,9	17,14
Novembro	20,2	16,83
Dezembro	19,2	16,53

A energia disponível, mostrada no quadro 1 acima, quantifica a energia que incide na superfície terrestre, enquanto a energia gerada é a energia transformada em eletricidade pelo conjunto de painéis. A eficiência dos painéis fotovoltaicos varia entre 0,10 e 0,15 (Fraidenraich e Lyra, 1995). Para o cálculo da energia gerada foi usado a eficiência de 0,10.

### 3.2. Ventos

Os dados de velocidades de ventos considerados neste trabalho foram obtidos da Estação Meteorológica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Admite-se, para efeito desta simulação, que a região estudada tenha estas características de ventos. É importante ressaltar que estes dados eólicos foram medidos na cidade de Natal/RN, e foram comparados com dados medidos na região de Icapuí/CE durante um ano verificando-se que há boa concordância entre os registros obtidos nos locais em questão. Os dados foram registrados a 10 metros, porém para a produção de energia a partir dessa fonte é mais comum o aproveitamento a partir de 20 metros. Neste caso foi determinada a velocidade através da equação (1) para a altura desejada de 20 metros (Ai et al, 2003).

$$V = V_0 \cdot \left( \frac{H}{H_0} \right)^n \quad (1)$$

onde:

$V$  = velocidade do vento na altura desejada (m/s);

$V_0$  = velocidade do vento na altura conhecida (m/s);

$H$  = altura desejada (m);

$H_0$  = altura conhecida (m);

$n$  = fator de rugosidade (adimensional).

O fator de rugosidade é um fator dependente do terreno no qual estão sendo efetuadas as medições de velocidades e por consequência é o local de instalação da turbina eólica. Na tabela 2 se pode encontrar alguns valores típicos para o fator de rugosidade com o tipo de terreno equivalente. O fator de rugosidade utilizado foi 0,26.

Tabela 2. Fator de rugosidade do terreno (Aldabó, 2002).

Descrição do terreno	Fator de rugosidade ( <i>n</i> )
Terreno sem vegetação	0,10
Terreno gramado	0,12
Terreno cultivado	0,19
Terreno com poucas árvores	0,23
Terreno com muitas árvores ou poucas edificações	<b>0,26</b>
Florestas	0,28
Zonas urbanas sem edifícios altos	0,32

Na tabela 3 pode-se visualizar as médias mensais de velocidades de ventos obtidas da Estação Meteorológica da UFRN a 10 metros e a calculada a 20 metros de altura.

Tabela 3. Médias mensais de velocidades de ventos obtidas pela Estação Meteorológica.

Mês	Velocidade dos ventos		
	Velocidade a 10 m (m/s)	Fator de rugosidade	Velocidade a 20 m (m/s)
Janeiro	4,3	0,26	5,15
Fevereiro	4,3	0,26	5,15
Março	4,0	0,26	4,79
Abril	4,0	0,26	4,79
Maio	3,4	0,26	4,07
Junho	3,8	0,26	4,55
Julho	3,8	0,26	4,55
Agosto	4,2	0,26	5,03
Setembro	4,5	0,26	5,39
Outubro	4,9	0,26	5,87
Novembro	4,2	0,26	5,03
Dezembro	4,3	0,26	5,15

Na tabela 4 pode-se verificar para os meses de fevereiro e junho de 2001, as respectivas produções de energia calculadas para nas cidades de Natal/RN e Icapuí/CE conforme a modelagem da seção 4.

Tabela 4 – Comparação entre as capacidades de produção de energia das cidades de Natal/RN e Icapuí/CE.

Mês	Icapuí/CE (kWh/m <sup>2</sup> .mês)	Natal/RN (kWh/m <sup>2</sup> .mês)
Fevereiro	10,09	10,80
Junho	7,70	7,99

#### 4. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática foi realizada para os equipamentos que transformam as fontes primárias em eletricidade: turbina eólica e painel fotovoltaico.

#### 4.1. Turbina Eólica

A energia eólica é a energia cinética do ar em movimento (ventos) (Palz, 1995).

Assim, inicialmente, pode-se quantificar a energia cinética do ar.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

onde:

$E_c$  = energia cinética (J);

$m$  = massa de ar que atravessa a turbina (kg);

$v$  = velocidade dos ventos (m/s);

Então, derivando-se a equação (2) em função do tempo, encontrar-se-á a potência eólica disponível para ser convertida em eletricidade.

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \quad (3)$$

mas,

$$\frac{dE_c}{dt} = P_d \quad (4)$$

e

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (5)$$

então:

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (6)$$

onde:

$P_d$  = potência eólica disponível (W);

$\rho$  = massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );

$A$  = área do rotor da turbina ( $\text{m}^2$ ).

Acrescentando-se à equação 6 dois fatores (que dizem respeito aos rendimentos aerodinâmico e do gerador considerado síncrono) que são o coeficiente de potência e a eficiência, respectivamente, chega-se à equação (7), que quantifica a potência elétrica de saída da turbina (Costa, 2001).

$$P_e = \eta(v) \cdot C_p(v) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (7)$$

onde:

$P_e$  = potência elétrica de saída (W);

$\eta$  = eficiência (adimensional);

$C_p$  = coeficiente de potência (adimensional).

#### 4.2. Painel Fotovoltaico

A representação da fotocélula ideal pode ser feita segundo o modelo elétrico da figura (2), onde a contribuição devido ao diodo de junção “P-N” se encontra em paralelo com a corrente fotogerada, que por sua vez, é proporcional à intensidade da iluminação (Fraidenraich e Lyra, 1995).

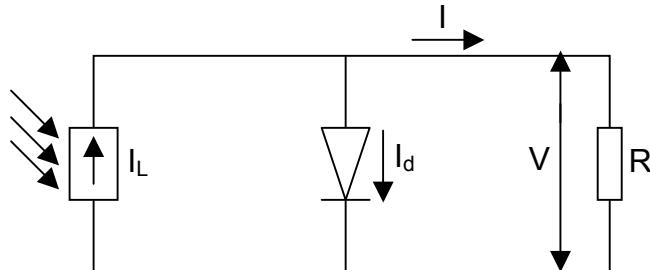


Figura 2. Modelo elétrico da fotocélula ideal.

A corrente ( $I$ ) representa a corrente líquida entregue para a resistência da fotocélula. A relação entre esta corrente e suas componentes é mostrada na equação (8), que descreve o comportamento da célula em qualquer condição de operação, mesmo na ausência de iluminação.

$$I = I_L - I_d \quad (8)$$

onde:

$I$  = corrente líquida de saída (A);

$I_L$  = corrente fotogerada (A);

$I_d$  = corrente de diodo (A).

A tensão ( $V$ ) nos terminais da célula é então dada pela “lei de Ohm”.

Para a geração da fotocorrente ( $I_L$ ) nem todos os fótons incidentes contribuem. Há basicamente três fatores que afetam a absorção dos fótons (Costa, 2001), que são:

1. Os fótons com energia inferior à da banda proibida do semicondutor atravessam as células sem serem absorvidos, o que dá origem às “perdas de não absorção”.
2. A largura finita “W” do semicondutor e o valor finito do coeficiente de absorção “ $\alpha$ ” obrigam mesmo uma parte dos fótons com energia superior a atravessar sem serem absorvidos, o que dá as “perdas de transmissão”.
3. Uma parte dos fótons é refletida pela superfície de incidência, por conta da diferença entre os índices de refração, o que dá origem as “perdas de reflexão”.

Além desses fatores que afetam a absorção, há, ainda, uma perda por conta da recombinação de uma pequena parte dos portadores fotogerados. Tais portadores são gerados em regiões do semicondutor distantes da zona de alto campo (em torno da junção), e, por consequência, recombina-se antes de atingirem essa zona. A fração desses portadores é chamada de “eficiência de coleção”.

A corrente de diodo, por sua vez, é dada em função da “corrente inversa de saturação” ( $I_0$ ) e da tensão térmica, sendo que esta tensão é função da temperatura absoluta da célula ( $T_{cel}$ ) e do “fator de idealidade” ( $m$ ) cujo valor varia de 1 (altos valores de “ $V$ ”) a 2 (baixos valores de “ $V$ ”).

$$I_d = I_0 \cdot [\exp(V/V_t) - 1] \quad (9)$$

$$V_t = \frac{m \cdot K \cdot T_{cel}}{e}, \quad 1 < m < 2 \quad (10)$$

onde:

- $I_0$  = corrente de saturação da célula (A);
- $V_t$  = tensão térmica da célula (V);
- $m$  = fator de idealidade (adimensional);
- $K$  = constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K);
- $T_{cel}$  = temperatura absoluta da célula (K).

Assim, podemos reescrever a equação (8) levando-se em consideração a equação (10), da seguinte forma:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

Outros parâmetros que permitem a caracterização da célula de forma prática, são o chamado fator de forma (FF) e a eficiência de conversão energética ( $\eta$ ). O parâmetro (FF) expressa o quanto a área definida pelo produto ( $I_M \cdot V_M$ ) definido como potência máxima ( $P_{máx}$ ), se aproxima da área definida pelo produto ( $I_{SC} \cdot V_{OC}$ ), assumindo valores entre 0,7 e 0,8 tipicamente. A equação (12) apresentada a seguir apresenta o fator de forma calculado a partir de valores experimentais de ( $I_M$ ), ( $V_M$ ), ( $I_{SC}$ ) e ( $V_{OC}$ ). A eficiência de conversão energética ( $\eta$ ), equação (13), é definida pela razão entre a potência ( $P_{máx}$ ) e a potência ( $P_L$ ) correspondente a radiação solar incidente. Tal eficiência assume valores entre 0,10 e 0,15 tipicamente (Fraidenraich e Lyra, 1995).

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{SC} \cdot V_{OC}} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{I_M \cdot V_M}{P_L} = \frac{P_{máx}}{P_L} \quad (13)$$

onde:

- $FF$  = fator de forma da célula (adimensional);
- $\eta$  = eficiência de conversão energética da célula (adimensional);
- $I_M$  = corrente no ponto de máxima potência (A);
- $V_M$  = tensão no ponto de máxima potência (V);
- $V_{OC}$  = tensão de circuito aberto da célula (V);
- $I_{SC}$  = corrente de curto-circuito (A);
- $P_{máx}$  = potência máxima produzida (W);
- $P_L$  = potência fotogerada (W).

## 5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional para a produção de energia foi realizada considerando casos de produção de petróleo em poços localizados em Icapuí/CE.

A estimativa de consumo de energia para estes poços foi determinada através de um programa usado na empresa PETROBRAS para simular o consumo de energia de um sistema de elevação de petróleo por meio de bombas de cavidades progressivas.

As condições operacionais, assim como as potências necessárias ao motor elétrico a ser utilizado nestes casos, estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5. Características admitidas dos poços.

<b>Condições de operação</b>	<b>Poço 1</b>	<b>Poço 2</b>
Potência de consumo	1,2 kW	1,2 kW
Profundidade	200 m	300 m
Viscosidade do fluido	400,00 cp	400,00 cp
Vazão	1,6 m <sup>3</sup> /dia	1,6 m <sup>3</sup> /dia
Eficiência volumétrica da bomba	100%	100%
Rotação	100 rpm	100 rpm
Pressão no fundo do poço	58 kPa	769 kPa
Pressão na cabeça do tubing	3000 kPa	3000 kPa
Pressão na cabeça do casing	0 kPa	0 kPa
Temperatura no fundo do poço	25 °C	25 °C
Gradiente de temperatura	0,03 °C/100m	0,03 °C/100m

Com base na potência do motor pode-se quantificar o consumo mensal de energia do sistema de elevação. Considerando o funcionamento do sistema durante 8 horas por dia, todos os dias do mês, obtém-se o consumo de 288 kWh/mês.

## 5.1 CENÁRIOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

Para o cálculo da transformação da energia eólica em eletricidade, foi admitido:

- ✓ Massa específica do ar = 1,177 kg/m<sup>3</sup> na temperatura média de 27°C;
- ✓ rendimento global do sistema = 0,20 que considera a eficiência e o coeficiente de potência.

Nas duas tabelas 6 e 7 subsequentes podem ser visualizadas os dois cenários de produção de energia analisados para estes casos de poços. Nestes cenários se pode constatar que o mês de menor produção de energia é o mês de maio, uma vez que este apresenta a menor média de velocidades de ventos e a penúltima em incidência solar.

Tabela 6. Primeiro cenário de produção de energia.

<b>1º CENÁRIO</b>			
<b>Aerogerador com D=2,4 m e área de painéis de 21 m<sup>2</sup>.</b>			
<b>Meses</b>	<b>Energia eólica (kWh/mês)</b>	<b>Energia solar (kWh/mês)</b>	<b>Sistema híbrido (kWh/mês)</b>
Janeiro	54,10	309,23	363,33
Fevereiro	48,87	284,20	333,07
Março	43,55	291,14	334,69
Abril	42,15	287,00	329,15
Maio	26,75	282,10	308,85
Junho	36,13	266,00	302,13
Julho	37,34	291,14	328,48
Agosto	50,42	332,73	383,15
Setembro	60,01	346,50	406,51
Outubro	80,06	359,86	439,92
Novembro	48,79	353,50	402,29
Dezembro	54,10	347,20	401,30

Tabela 7. Segundo cenário de produção de energia.

2º CENÁRIO			
Aerogerador com D=5,0 m e área de painéis de 14 m <sup>2</sup> .			
Meses	Energia eólica (kWh/mês)	Energia solar (kWh/mês)	Sistema híbrido (kWh/mês)
Janeiro	234.82	206.15	440.97
Fevereiro	212.10	189.47	401.56
Março	189.02	194.09	383.12
Abril	182.92	191.33	374.26
Maio	116.08	188.07	304.15
Junho	156.83	177.33	334.17
Julho	162.06	194.09	356.16
Agosto	218.82	221.82	440.64
Setembro	260.45	231.00	491.45
Outubro	347.47	239.91	587.38
Novembro	211.76	235.67	447.42
Dezembro	234.82	231.47	466.29

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos cenários analisados pode-se observar que ambos produzem energia suficiente para suprir as necessidades do sistema de elevação de petróleo. Entretanto, o cenário composto por aerogerador com 5 metros de diâmetro de rotor e área de painel fotovoltaico de 14 m<sup>2</sup> apresenta melhor distribuição da produção de energia a partir das fontes primárias, sendo, portanto, considerada, até o momento, como a melhor configuração para o sistema híbrido.

A análise econômica que será realizada em trabalho futuro contribuirá também para a seleção definitiva.

## 7. AGRADECIMENTOS

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro e bolsas concedidas.

## 8. REFERÊNCIAS

- Aldabó, R., 2002, “Energia Eólica”, Artliber Editora, São Paulo, Brasil, pp.15 - 32.
- B. Ai., H. Yang et al, 2003, “Computer-Aided Design of PV/Wind Hybrid System”, Renewable Energy, N.28, pp. 1491-1512.
- Costa, A. C. A., 2001, “Metodologia de Análise e Projeto de Sistemas Híbridos Eólico-Solar-Bateria para a Geração de Energia Elétrica”, dissertação de mestrado, Recife, Brasil, pp 8-28.
- Fraidenraich, N., Lyra, F. “ENERGIA SOLAR: Fundamentos e tecnologias de conversão heliotermoelétrica e fotovoltaica”. Recife: Editora Universitária da UFPE, 1995 .
- Tiba, C. et. Al, 2000 “ Atlas Solarimétrico do Brasil, Ed. Universitária da UFPE, Recife, Brasil, 111p.
- Palz, W., 1995, “Energia Solar e Fontes Alternativas”, Hemus Editora, São Paulo, Brasil, pp. 91-94.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso neste trabalho.

José Wilson Lage Nogueira  
Federal University from Rio Grande do Norte, [wilson@ufrnet.br](mailto:wilson@ufrnet.br)

Daniel da Silva Nascimento  
Federal University from Rio Grande do Norte, [danielveio@yahoo.com.br](mailto:danielveio@yahoo.com.br)

Jander Teixeira Dantas  
Federal University from Rio Grande do Norte, [jandermec@yahoo.com.br](mailto:jandermec@yahoo.com.br)

Igor Mont'Alverne Seabra Jucá  
Federal University from Rio Grande do Norte, [igorseabra@uol.com.br](mailto:igorseabra@uol.com.br)

Ricardo Castilhos de Araújo Neves  
Federal University from Rio Grande do Norte, [ricardocastilhos@yahoo.com.br](mailto:ricardocastilhos@yahoo.com.br)

**Abstract.** This work propose a hybrid system with intention to generate electric energy, thus creating conditions to pump oil in wells that demand small power and have low productivity, in areas not served for the conventional electric net. The study is directed for specific conditions northeast Brazilian, where favorable situations for the development of the work are found. A hybrid power system is a system of energy generation that can combine two or more sources. The system in analysis is composed for the sources solar and wind power. For the accomplishment of this work initially the study place was defined, where some requirements had been obeyed: adequate incidence of solar radiation, incidence of satisfactory winds, and inexistence of supplying conventional net of energy. For the attainment and estimates of wind and solar data, wind power and solarimetrics Atlases had been used, beyond data measured in the region. The mathematical modeling of the system was carried through for the devices of transformation of the sources. In the simulation different scenes of exploitation of the sources had been considered. This system can be used as an alternative and not pollutant form of generation of energy in substitution to the engines diesel generally installed in these places.

**Keywords.** *Renewable Energy, Hybrid Power System, Elevation of Oil, Wind Power, Solar Energy.*