

Análise de Tecnologias Solar Fotovoltaica com Bomba Reversível para Atendimento das Ilhas do Lago de Tucuruí

Jackson Moraes, André Mesquita

Universidade Federal do Pará

Abstract:

The subject studied in this work refers to the interaction between generation techniques and strategies of efficient use of photovoltaic solar energy to supply the load and simultaneously supply a water pumping system for storage of potential energy that will be utilized in its operation in reverse mode as Turbine-running pump (BFT) to feed the load in periods of low or zero solar irradiation.

Brazil presents extremely favorable conditions for the use of photovoltaic generation. Currently, this type of generation is considered a strategic and very promising technology that is widely used in several countries of the world, because it can be said that there are no technical reasons that prevent the use of photovoltaic systems, regardless of the size of the load, small or large. Global experiences have important contributions for analysis on market expansion, gains in the scale of production and cost reduction for investors. Although Brazil has a large photovoltaic solar generation capacity, a large number of people still do not have access to this technology in isolated and remote communities, where the extension of the distribution network is not economically viable. Due to this deficit in electricity and social supply, the present project aims to analyze solar photovoltaic technology with hydraulic storage by means of a reversible pump to assist isolated consumers in remote places of the Lago de Tucuruí Islands, as well as the urgent commitment of incorporating alternative sources of energy generation in the Brazilian energy matrix is the main motivation for the development and elaboration of this work. We present the results of analyzes related to the production of electric energy from the photovoltaic transformation of the solar radiation captured by a photovoltaic system mounted in a floating system in the Lake of Tucuruí.

Keywords: Renewable Energy, Hybrid Generation Plant, Photovoltaic Solar System, Diesel Generation, Pumped Hydraulic Storage, Isolated Systems.

1- Introdução

A necessidade do suprimento de comunidades isoladas, como as que vivem em ilhas da Amazônia, tem impulsionado a busca pelo desenvolvimento de fontes renováveis de energia. A parcela da sociedade que não tem acesso ao fornecimento de energia elétrica vive em regiões remotas onde a inclusão por meio da expansão do sistema elétrico convencional não chegou por ser inviável economicamente [CRESESB, 2004]. Este trabalho é desenvolvido com o intuito de avaliar tecnologia híbrida composta por fonte solar fotovoltaica associada a um sistema de armazenamento hidráulico com bomba reversível auxiliado por um gerador diesel e analisar a viabilidade da integração entre as fontes de energia para suprir as cargas envolvidas.

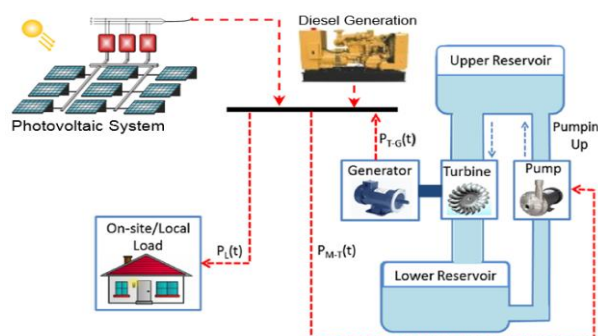
O sistema de armazenamento de energia por meio bomba funcionando como turbina (BFT) é uma vantagem significativa que surge como alternativa viável no sentido de eliminar ou minimizar as perdas com o uso de baterias. O uso de sistemas híbridos com geradores a diesel e energia solar fotovoltaica é uma alternativa bastante utilizada. O armazenamento hidráulico bombeado para reservatório elevado é a grande vantagem, pois nas horas sem incidência de sol, a água armazenada acionará a bomba e esta será revertida e passa atuar como gerador hidráulico. [Pinho, 2008].

A eficiência da bomba como turbina é geralmente menor do que a das turbinas hidrelétricas convencionais. No entanto, a eficiência não é o critério primário de seleção para tais máquinas. O uso da energia solar fotovoltaica flutuante, traz benefícios como: mais eletricidade do que a geração solar em terra devido ao resfriamento dos painéis fotovoltaicos instalados sobre o espelho d'água. A existência de comunidades inteiras ainda não atendidas pelo o fornecimento de energia elétrica é um problema comum nas ilhas do lago de Tucuruí. Esta capacidade de produção certamente terá seu desempenho fortemente alavancado com a oferta de energia que sem dúvida proporcionará a implantação e o desenvolvimento de outros pilares de infraestrutura, como saneamento básico, saúde e educação.

Sistemas De Geração Energia Fotovoltaica E Integração Com Bomba Reversível E Gerador Diesel (Sistema Híbrido) - A Energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico). O efeito fotovoltaico é o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor, observado em um experimento com uma célula eletrolítica (dois eletrodos metálicos dispostos em uma solução condutora), onde a geração de eletricidade aumentava à medida que a célula absorvia a luz a qual era exposta. [09, 14].

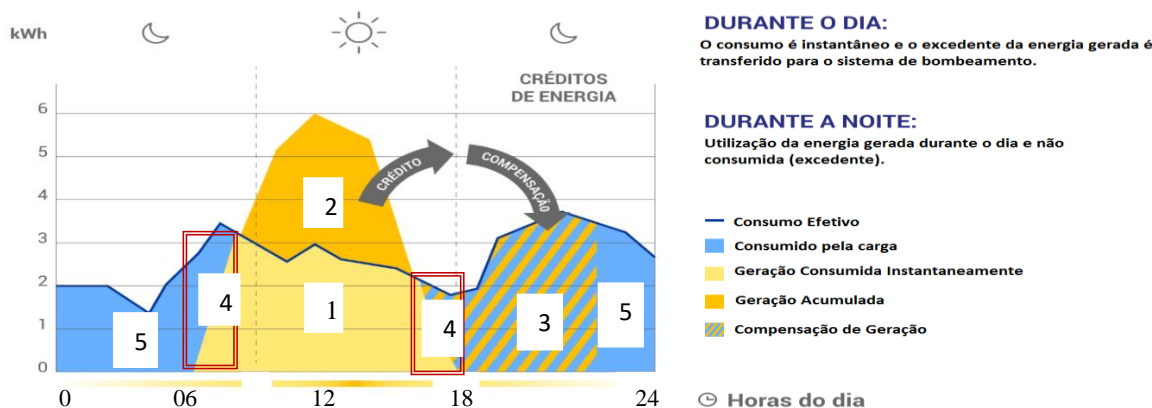
Em regiões onde há oferta de mais de uma forma de energia, pode-se combinar as mesmas em um único sistema, que geralmente se torna uma alternativa viável do ponto de vista econômico. Essa combinação de diferentes fontes de geração de energia associadas em um único sistema, é designada como sistema híbrido de energia [14]. A Figura 1 apresentam a configuração geral de um sistema híbrido e a figura 2 ilustra os estágios de geração.

Figura 1 - disposição do sistema híbrido. Esquema unifilar e o fluxo de energia



Fonte: Adaptado de [Kusakana, 2014].

Figura 2 – Esquema dos estágios de geração, carga e bombeamento.



Fonte: Adaptado de [SHAYANI, 2006].

Durante 24 horas ocorrem 5 estágios de geração em um sistema fotovoltaico:

- 1- Atendimento da carga feito exclusivamente pelo sistema fotovoltaico;
- 2- Geração do sistema fotovoltaico superior ao consumo. A energia excedente é destinada a alimentação do sistema de bombeamento d'água;
- 3- Geração do sistema fotovoltaico nula. Atendimento da carga feito exclusivamente pelo sistema turbina-gerador, que usa a água do sistema de bombeamento;
- 4- Carga atendida pelo sistema fotovoltaico e pelo sistema turbina-gerador simultaneamente.
- 5- Carga atendida pelo diesel na indisponibilidade de geração das fontes renováveis.

Geração a Diesel - O grupo gerador é um motor diesel acoplado a um gerador elétrico que deve ser dimensionado para atender a carga durante o período em que a geração renovável é menor do que a energia demandada pela carga. A estratégia de operação adequada do sistema de geração garante um atendimento confiável e de qualidade, reduz os seus custos de implantação, de operação e manutenção aos seus consumidores. Este balanço é essencial para garantir a estabilidade do sistema afim de que o mesmo não entre em colapso total e para evitar danos aos equipamentos que o compõe. [14] [Kusakana, 2015].

Consumo e rendimento do GMG (Grupo Motor Gerador) a diesel - Modelo de consumo simplificado em relação à potência de saída do GMG. Esse modelo é utilizado, de forma a atingir os resultados com atendimento a carga de forma plena quando isso for necessário.

$$F_{GMG}(L/h) = A_{GMG} \cdot P_{carga} + B_{GMG} \cdot P_{GMG}$$

em que: F_{GMG} - taxa de consumo do GMG a diesel [litros/hora]; P_{carga} - potência efetiva demandada pela carga em kW; P_{GMG} - potência nominal do GMG a diesel em kW; A_{GMG} taxa de consumo incremental do GMG a diesel, [L/kWh]; B_{GMG} coeficiente da curva de consumo do GMG a diesel sem carga, igual a [L/kWh].

2- Materiais e Métodos

Levantamento de dados e Avaliação do Recurso Solar - A coleta de dados da média anual da irradiação presente na localidade se deu por meio da base de dados histórica do atlas solarimétrico disponibilizada pelo Radiosol2. Este software sintetiza dados de radiação solar proporciona ao usuário a possibilidade de gerar planilhas de dados meteorológicos para serem utilizados em programas de simulação e de dimensionamento (UFRS, 2017).

São armazenados dados de Horas de Insolação, Irradiância Global em Plano Horizontal, Irradiação Global Horária em Plano Horizontal, Irradiação Global Diária em Plano Horizontal e Irradiação Global Diária Média Mensal em Plano Horizontal, assim como as componentes direta e difusa e, medições realizadas em planos inclinados.

Metodologia de Estimativa de Carga e dimensionamento do sistema - O equipamento para a obtenção dos dados de carga utilizado na pesquisa foi o Analisador de Qualidade de Potência, o “Analyzer 435” do fabricante Fluke. A ferramenta utilizada para efetuar os tratamentos e as avaliações foi o software *FlukeView* que possibilita a navegação por meio do Analyzer. O software *FlukeView* mostra o comportamento dos parâmetros selecionados e permite a análise, por meio de planilhas e gráficos, de cada grandeza elétrica que se deseja medir. Para a demanda foi considerada uma curva de carga característica em

comunidades isoladas na Amazônia, já que o objetivo é atender um sistema isolado da região. O critério utilizado para levantamento de carga considera os períodos de base e de ponta:

$$D = P_p \cdot t_p + P_b \cdot t_b$$

Sendo: D = demanda em kW; h – Altura do desnível [m]; P_p = potência carga na hora de ponta;
P_b = potência carga na hora de base; t_p = tempo horas de ponta; t_b = tempo horas de

Em qualquer período do dia, a soma da potência fornecida pelas diferentes fontes deve ser igual à carga demandada, de forma que o sistema híbrido prioriza sempre a geração renovável oriunda das fontes fotovoltaica e do sistema com turbina reversível.

De acordo com o consumo médio da carga em Wh/dia levantado, é necessário dimensionar o sistema fotovoltaico para gerar energia suficiente para suprir esta carga. A potência média necessária é expressa por:

$$P = \frac{E/G}{\eta_{sistema}}$$

Sendo: P = Potência média (kwp); E = Consumo médio diário durante o ano (kWh/dia);
G = Ganho por radiação solar: média mensal diária (kWh/m²/dia); η = Rendimento Pv (%).

As perdas de maior expressão são referentes às perdas nas cablagens e as perdas no inversor e regulador de carga. O rendimento do sistema fotovoltaico é [Carneiro, 2009]:

Perdas nas cablagens = 3%; Perdas no regulador de carga e inversor = 15%

Rendimento (cablagens): K_{cab} = 0.97; Rendimento (regulador + inversor): K_{reg + inv} = 0.85

Rendimento do sistema fotovoltaico: K = K_{cab} × K_{reg + inv} = 0.97 × 0.85 = 0.83

Uma quantidade excedente de energia gerada deve ser contemplada no dimensionamento do sistema fotovoltaico para alimentar o sistema de bombeamento da água do reservatório inferior (Lago da hidrelétrica de Tucuruí) para o reservatório superior. A potência requerida pela bomba para succionar a água do rio até o reservatório superior pode ser expressa pela Equação:

$$P_b = \frac{\rho \cdot g \cdot H_b \cdot Q_b}{\eta_b}$$

Sendo: P_b – potência de eixo da Bomba [kW]; g – aceleração local da gravidade [m/s];
 ρ – Massa específica da água [kg/m³]; Q_b – vazão da Bomba [m³/s];
H_b – altura da Bomba [m]; η_b – rendimento da Bomba [%]

O volume de água armazenada no reservatório deve ser suficiente para atender a demanda de energia da carga em uma situação em que existe um déficit de energia fornecida pelo sistema fotovoltaico. A energia potencial pode ser expressa como:

$$E_R = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

Sendo: h – Altura do desnível [m];
E_R – Energia Potencial do Reservatório [kWh]; ρ – massa específica da água [kg/m³];
V – Volume de água armazenado [m³/s]; g – aceleração local da gravidade [m/s];

O volume de água do reservatório superior é usado para acionar o hidrogerador na situação em que há escassez de energia fotovoltaica, operando como turbina. A potência gerada pelo conjunto turbina-gerador P_T pode ser expressa como:

$$P_T = \rho \cdot g \cdot H_T \cdot Q_T \cdot \eta_T$$

Sendo: P_t – potência de eixo da BFT [kW]; g – aceleração local da gravidade [m/s²];
 ρ – massa específica da água [kg/m³]; Q_t – vazão da BFT [m³/s];
 H_t – altura da BFT [m]; η_t – rendimento da BFT [%]

O sistema diesel entra em operação somente durante ocorrência de contingência provocada por defeito em equipamentos, para manutenção, por escassez das fontes renováveis ou por desequilíbrio no balanço de carga.

Equilíbrio de potências - Em qualquer intervalo de tempo de amostragem, a soma da potência fornecida pelas fontes geradoras deve ser igual à demanda exigida pela carga.

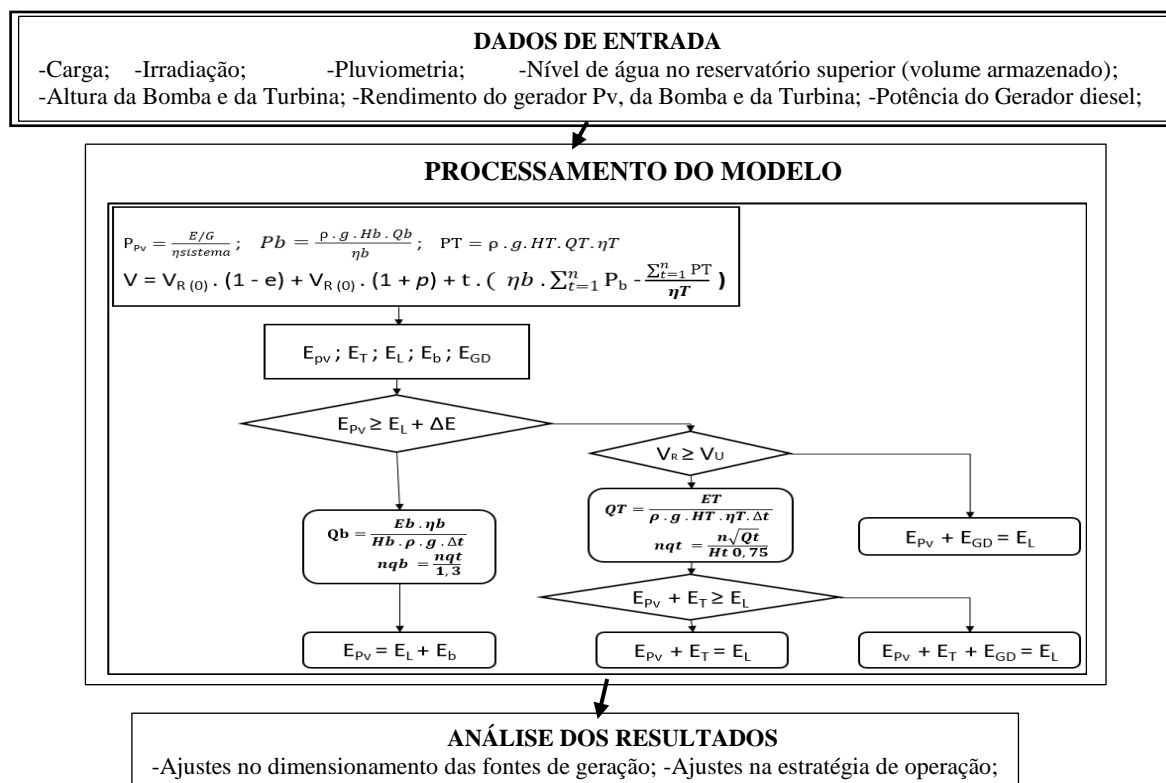
$$P_{carga} = P_{pv} + P_{gd} + P_T - P_b$$

Limites e restrições variáveis - O volume de água no reservatório segue a seguinte dinâmica: No início de qualquer intervalo de amostragem, o volume inicial $V_{R(0)}$ no reservatório é o volume (nível) inicial somado ao volume bombeado e ao volume pluviométrico precipitado, menos o volume utilizado pelo conjunto turbina-gerador.

$$V = V_{R(0)} \cdot (1 - e) + V_{R(0)} \cdot (1 + p) + t \cdot \left(\eta_b \cdot \sum_{t=1}^n P_b - \frac{\sum_{t=1}^n P_T}{\eta_T} \right)$$

e – Evaporação p – Precipitação pluviométrica

Figura 3 - Procedimento de simulação do fluxograma.

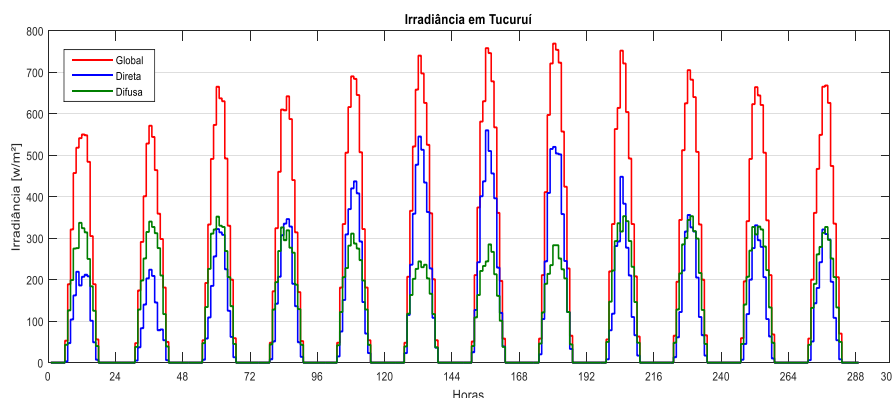


Fonte: O autor.

Caracterização do Local de Estudo - A região de Tucuruí está localizada no sudeste do Pará com as coordenadas geográficas - 3°72' S e 49°72' W. Com a formação do Lago de Tucuruí, cerca de 1800 ilhas surgiram. As Reservas de Desenvolvimento Sustentável Alcobaça (36.128 ha) e Pucuruí-Ararão (29.049 há). A APA, com 568.667 ha, estende-se por todos os municípios que conformam esta região, havendo sobreposição territorial entre a APA e as RDS's. [Plano de Desenvolvimento Regional Sustentável do Lago de Tucuruí, 2013. PARÁ, Lei 6.451 de 08/04/2002].

A Figura 4 mostra a média anual da irradiação presente na localidade que podem ser vistos no software RADIASOL 2 para avaliação do recurso solar. Esses dados são obtidos por meio da base de dados histórica do atlas solarimétrico.

Figura 4 - Radiação solar global direta e difusa diária média no ano para Tucuruí.



Fonte: O Autor com Dados do Software Radiosol2, 2017.

Análise das condições meteorológicas médias de Tucuruí

Nebulosidade - O período menos encoberto tem início por volta de 8 de junho e dura 3,8 meses, e termina em torno de 1 de outubro. O período com mais nebulosidade do ano perdura em torno de 1 de outubro e permanecendo cerca de 8,2 meses, terminando em torno de 8 de junho.

Precipitação - O máximo de precipitação ocorre durante os 31 dias ao redor de 17 de março, com acumulação total média de 338 milímetros. O mínimo de chuva ocorre por volta de 26 de agosto, com acumulação média de 12 milímetros no total.

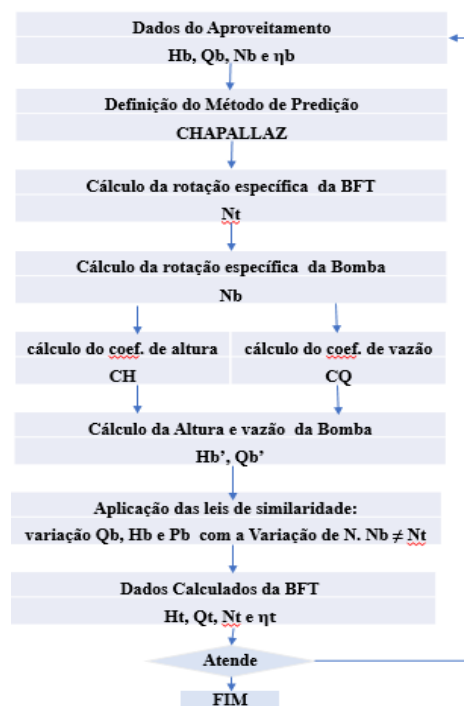
Média diária de energia solar - O período com melhor média de radiação do ano dura 2,2 meses, de 1 de agosto a 7 de outubro, com média diária de energia de ondas curtas incidente por metro quadrado acima de 6,0 kWh. O período com menor incidência de ondas curtas do ano dura 5,6 meses, de 16 de dezembro a 3 de junho, com média diária de energia de ondas curtas incidente por metro quadrado abaixo de 4,7 kWh.

A análise das condições meteorológicas médias de Tucuruí é necessária para demonstrar que as características sazonais da região são extremamente favoráveis a utilização do sistema híbrido em estudo, pois nos períodos de maior nebulosidade são registrados os menores índices de incidência solar, ou seja, menos favoráveis para o aproveitamento fotovoltaico. Porém, estes períodos apresentam maior pluviometria, favorecendo, portanto, a maior capacidade de armazenamento de água no reservatório superior, já que grande volume de água pode ser captado diretamente das chuvas.

Estimativa da Curva de Carga - O software PVSize faz parte do SolarCad, um pacote de softwares para projeto de sistemas de energia solar assistido por computador, abrangendo tanto sistemas térmicos quanto fotovoltaicos. É uma ferramenta prática idealizada sob base científica que facilita a concepção de sistemas fotovoltaicos autônomos e eficaz para dar suporte no levantamento de carga [Vera, 2004].

Seleção da BFT - Metodologia proposta por Chapallaz para bombas - Para seleção da BFT foi utilizado o Método de Chapallaz et al. (1992). Conforme esta metodologia de seleção de BFT, para a determinação dos coeficientes de altura e vazão, se calcula a rotação específica da BFT com base nos dados do aproveitamento. Com os dados de altura manométrica total e a vazão requerida do projeto é possível escolher o tipo de bomba ideal para o sistema. A Figura 5 mostra um diagrama que facilita a escolha.

A Figura 5 - Árvore de decisão para seleção da Bomba



Fonte: O Autor

3 - Resultados e Discussão

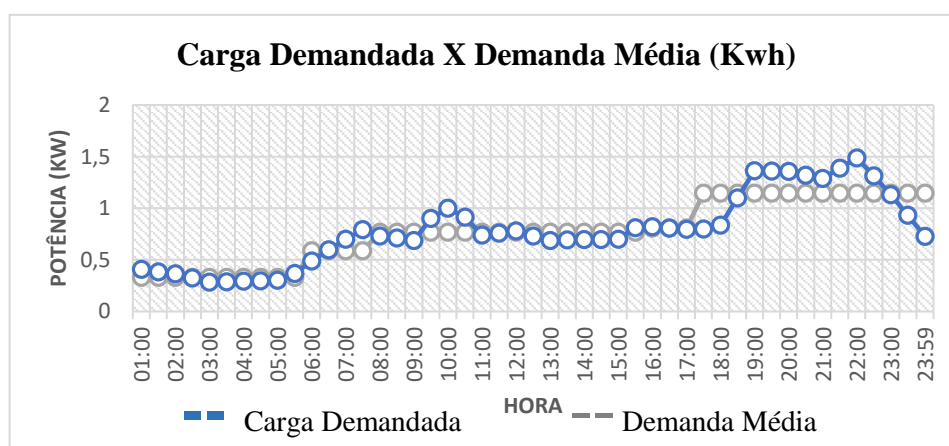
Pretende-se eletrificar uma comunidade com cerca de 10 casas situadas na zona rural do município de Tucuruí, na qual residem famílias formadas por 4 pessoas em média. A tabela 1 mostra o perfil de carga para um dia de consumo. Portanto, define-se o perfil de consumo para cada aparelho, que neste caso corresponde a:

Tabela 1. Aparelhos de consumo previstos na instalação fotovoltaicos para uma habitação rural.

	Potência (w)	Quantidade	Horas	Consumo/dia
Lâmpadas compactas	9	2	9	162
Lâmpadas fluorescentes	14	1	2	28
Rádio	5	1	5	25
Televisão 14"	40	1	3	120
Carga Cte	—	-	-	50
Refrigerador + Freezer	—	-	-	776
Total diário (Wh/dia)	-----			1161

Para o dimensionamento de um sistema off_grid, é preciso determinar o consumo que o sistema fotovoltaico vai atender.

Figura 6 - Curva de carga instantânea x carga média para cada período



Fonte: O Autor.

Desta forma procura-se a melhor alternativa de armazenamento de energia nas opções hidráulica reversível com BFT.

A capacidade de armazenamento é dada em função do período de insolação e da demanda do sistema elétrico. Assim a demanda é dada por:

$$D = \sum P_i \cdot t_i \Rightarrow D = P_b \cdot t_b + P_p \cdot t_p \Rightarrow D = (P_b \cdot 5) + (P_b \cdot 2) + (P_b \cdot 8) + (P_p \cdot 2) + (P_p \cdot 7) \Rightarrow D = 18,61 \text{ kWh}$$

Se temos um consumo médio de 18,61 kWh/dia, é necessário calcular quantas placas serão necessárias para gerar esta potência, considerando um projeto nas coordenadas da cidade de Tucuruí, onde o índice solarimétrico é de 3,98 kWh/m²/dia, ou seja, se atribui como índice solarimétrico para dimensionamento do projeto correspondente ao mês de fevereiro, pois garante produção de energia para a carga em todos os meses.

Tabela 2 - Irradiação solar diária média [kWh/m².dia]

Ângulo	Inclin.	Irradiação Solar Média Mensal (kWh/m ² .dia)												
		Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Méd.
Horizontal	0 ° N	4,22	3,92	4,67	4,44	4,78	5,03	5,44	5,53	4,97	4,89	4,78	4,69	4,78
Latitude	4 ° N	4,13	3,87	4,66	4,49	4,90	5,20	5,62	5,64	4,99	4,84	4,68	4,57	4,80
>Méd.Anual	7 ° N	4,06	3,83	4,65	4,52	4,98	5,32	5,73	5,71	4,99	4,79	4,60	4,47	4,80
>Min.mensal	13 ° S	4,42	3,98	4,59	4,17	4,28	4,37	4,75	5,05	4,79	4,93	4,99	4,97	4,61

Fonte: [CRESESB, dados de 2017].

A potência média necessária é expressa por:

$$P = \frac{E/G}{\eta_{sistema}}$$

Sabendo que a eficiência do sistema é de 83%, a potência gerada pelas placas é:

$$P = (18.610/3.980) / 0,83 = 5.634 \text{ watts}$$

O número mínimo de painéis (N_p) que formarão o arranjo fotovoltaico é dado pelo resultado do quociente da energia demandada (E_D) pela energia gerada por um único painel (E_p). Foram consideradas placas de 240 watts nos cálculos, portanto deve-se adquirir a seguinte quantidade de placas.

$$N_p = E_D / E_p$$

$$N_p = 5.634 / 240 = 23,475 \text{ totalizando } \mathbf{24} \text{ placas de 240 watts.}$$

Onde: N_p - Número de placas P_D - Potência demandada P_p - Potência de uma placa.

Da energia gerada pelo sistema fotovoltaico, parte é consumida instantaneamente pela carga, sendo necessário projetar um sistema que gere energia excedente para armazenar.

A energia E_I é a energia gerada pelo sistema fotovoltaico que é consumida instantaneamente pela carga. A diferença entre a energia de suprimento instantâneo e a energia demandada pela carga é o excedente (E_E) de energia produzida e será utilizado para alimentar o sistema BFB (bomba funcionando como bomba) armazenando energia por meio de bombeamento para o reservatório elevado. Por meio dos dados de geração PV e do consumo, se calculou os valores de energia para os períodos do dia fazendo uso da equação:

$$E = P \cdot \Delta t$$

Onde,

P- Potência (kw);

Δt - intervalo de tempo (h).

Ao dimensionar o sistema fotovoltaico prevendo o suprimento de energia necessário para alimentar o sistema de bombeamento.

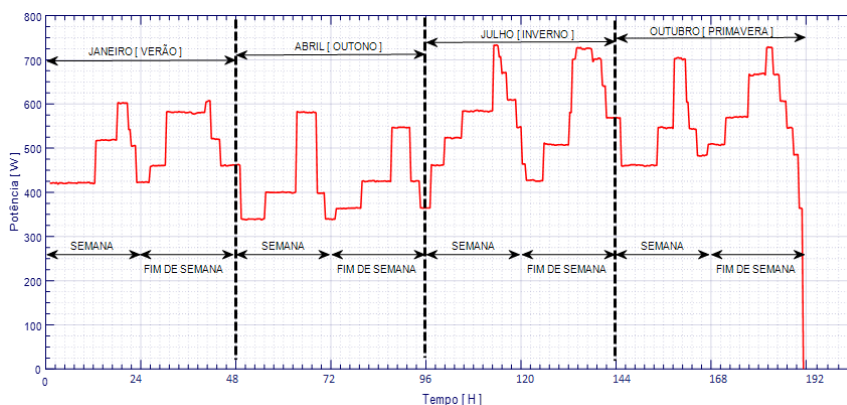
$$E_{pv} = 21,281 \text{ kwh} \quad P = (21.281/3.980) / 0,83 = 6.442 \text{ watts}$$

Para determinar o número de placas, temos:

$$N_p = 6.442 / 240 = 26,84 \text{ totalizando } 27 \text{ placas de } 240 \text{ watts.}$$

Desta forma, para um rendimento de aproximadamente 83%, seria disponibilizada uma geração solar de 6,442 kWp para atender as necessidades diárias da comunidade. A Figura 7 mostra o perfil de potência consumida pela carga.

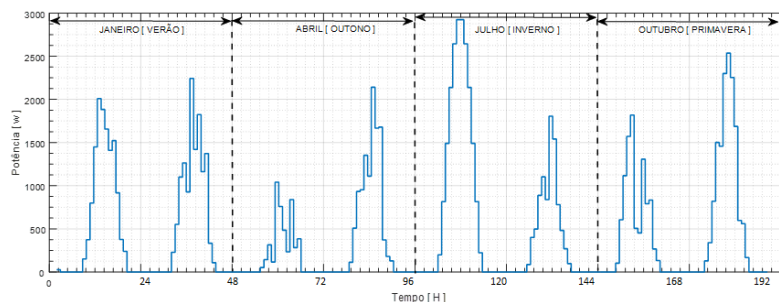
Figura 7 - Perfil de potência consumida pela carga



Fonte: O autor

A Figura 8 traz o perfil de potência de saída do sistema fotovoltaico em todas as estações.

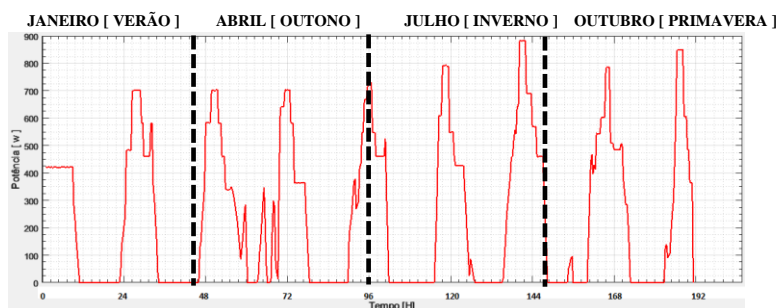
Figura 8 - Perfil de potência de saída do sistema fotovoltaico.



Fonte: O autor

A Figura 9 mostra o Perfil de potência média não suprida pelo sistema PV que será requerida na saída do sistema PHS e/ou gerador Diesel em Hora de ponta e de base.

Figura 9 - Perfil de potência média não suprida pelo sistema PV saída do gerador Diesel



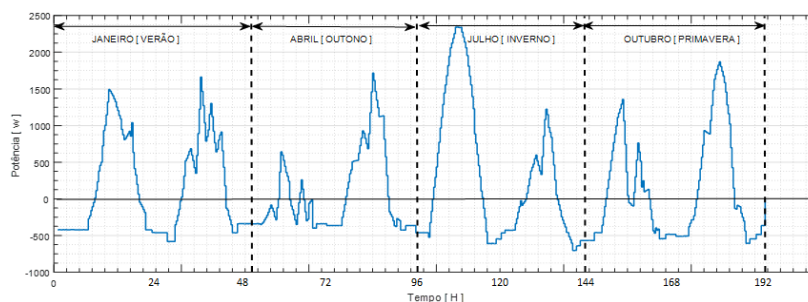
Fonte: O autor

A potência instalada em painéis para o sistema solar híbrido hidráulico é então de 5,752 kwp. Para o sistema hidráulico, o cálculo da potência (P_t) e da vazão (Q_t) pode ser feito a partir da equação. A vazão será calculada considerando-se o rendimento do conjunto BFT (n_{BFT}) como de 50%:

$$P_t = \rho \cdot g \cdot Q_t \cdot H_t \cdot t \quad Q_t = P / (\rho \cdot g \cdot H_t \cdot \eta_t)$$

A figura 10 mostra o perfil de carga atendido pelo sistema PV, assim como o déficit e o excedente de potência do sistema PV que é disponibilizado para o bombeamento.

Figura 10 - Perfil de déficit e excedente de potência do sistema PV.



Fonte: O autor

A condição de trabalho possui como característica uma vazão (Q) e uma altura de queda (H). Assim se calcula os elementos necessários para a correta seleção da bomba que irá funcionar como BTF. Para uma estação elevatória formada por uma adutora, as tubulações de sucção têm 10 metros de comprimento, são de ferro fundido cimentado internamente em bom estado de conservação, diâmetro de 250 mm. A tubulação de sucção tem 10 metros de comprimento, feita de ferro fundido cimentado internamente em bom estado de conservação, diâmetro de 250 mm, para cálculo respectivos valores do coeficiente “K” de perda de carga localizada. O barrilete de recalque é formado por comprimento de 4 metros, do mesmo material, com diâmetro de 200 mm.

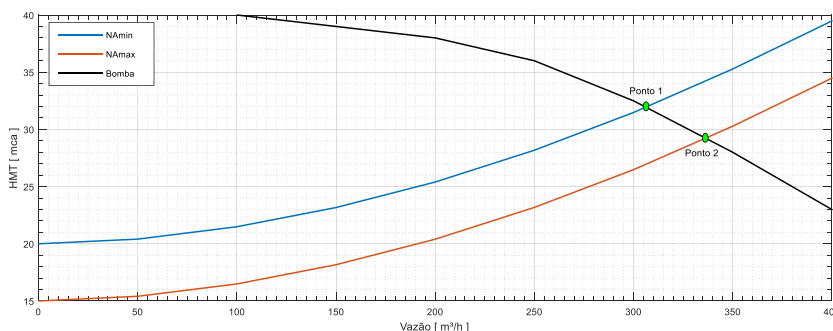
O desnível geométrico entre o eixo da bomba e a entrada do reservatório (montante) é de 14 metros. A altura de sucção (diferença entre o eixo da bomba e o nível da água no poço de sucção) varia de um mínimo de 5 metros a um máximo de 7 metros.

Tabela 3 - Cálculos para a curva do sistema.

Vazão (l/s)	Perda na sucção (m)		Perda no recalque (m)		Perda de carga (m)	Altura geométrica (m)		Curva do sistema	
	Distribuída	Localizada	Distribuída	Localizada		NA min	NA máx	NA min	NA máx
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20	15	20	15
13,89	0,00	0,00	0,39	0,01	0,41	20	15	20,41	15,41
27,78	0,01	0,01	1,42	0,04	1,49	20	15	21,49	16,49
41,67	0,03	0,03	3,01	0,09	3,17	20	15	23,17	18,17
55,56	0,05	0,05	5,13	0,17	5,40	20	15	25,40	20,40
69,44	0,08	0,08	7,76	0,26	8,18	20	15	28,18	23,18
83,33	0,11	0,12	10,87	0,38	11,48	20	15	31,48	26,48
97,22	0,15	0,16	14,46	0,51	15,28	20	15	35,28	30,28
111,11	0,19	0,21	18,52	0,67	19,59	20	15	39,59	34,59

Fonte: O autor

Figura 11 - Curvas do sistema x bomba.



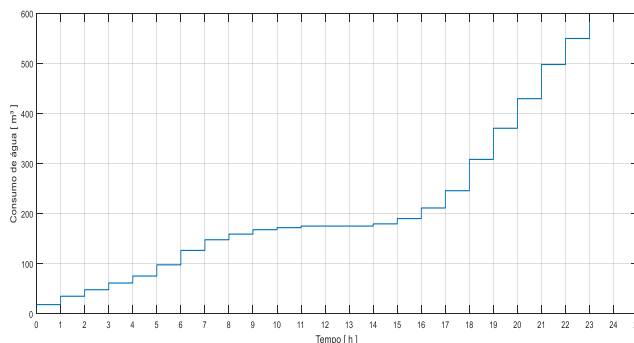
Fonte: O autor

No ponto 1, a vazão esperada para o sistema de bombeamento funcionando, quando o nível de água no tanque de sucção estiver no mínimo (altura de sucção máxima). No ponto

2, a vazão esperada para o sistema de bombeamento funcionando, quando o nível de água no tanque de sucção estiver no máximo (altura de sucção mínima).

O correto dimensionamento dos reservatórios é fundamental, pois são responsáveis pelo equilíbrio entre a demanda e a oferta. Na Figura 12, observa-se que o reservatório chega ao nível mínimo próximo das 20:30 horas.

Figura 12 - Volume do sistema PHS em 24h.



Fonte: O autor

Utilizando-se o sistema PHS para auxiliar o sistema fotovoltaico durante o dia, é necessário cerca de 584 m³ de água. Com um reservatório com capacidade para armazenar 500 m³ de água, é necessário que no período entre 21h e 00h o gerador diesel supra a carga.

Estratégia para atendimento da demanda utilizando a geração das BFT's - A carga apresenta uma demanda máxima, identificada a partir de um levantamento da carga instalada em sua condição mais crítica (com todos os equipamentos sendo utilizados simultaneamente). As principais atividades desenvolvidas no local são o turismo e a piscicultura. A estratégia para atendimento da carga da comunidade é definida:

1. Potência elétrica de pico: (cerca de 7h de duração). 2. Carga intermediária. 3. Carga base continuamente (24h de duração).

Para suprir os horários de maior demanda, uma segunda BTF pode entrar em operação para atender os picos de menor período. São possíveis combinações conforme segue:

1. BFT1 das 17 às 07h. 2. BFT1 e BFT2, das 19 às 23h.

Desta forma, as BFT's operam em condições próximas às nominais, e contribui para um bom desempenho do ponto de vista de controle de frequência do sistema. Além de utilizar de forma eficiente o volume de água armazenado no reservatório superior.

4- Conclusão

O projeto se mostra viável e, com procedimentos bem sucedidos, pode-se ter um ganho expressivo em termos de caracterização do sistema com obtenção de parâmetros que demonstre o custo benefício da implantação de fontes de energia renovável como alternativa eficiente por meio de sistemas híbridos composto por fonte solar fotovoltaica, armazenamento hidrelétrico bombeado e gerador diesel, com subsídios suficientes para estabelecer um dimensionamento eficiente de tais sistemas de forma a atender a carga com energia confiável e com fornecimento ininterrupto. Utilizar equipamentos com boa eficiência para obter o melhor rendimento.

Elaboração de configuração para o sistema e desenvolvimento de uma estratégia de operação em que o controle do despacho de carga permita que as fontes renováveis fotovoltaica e turbina reversível contribuam o máximo de tempo e o gerador diesel fique ligado durante o menor tempo possível com o objetivo de reduzir os custos com consumo de óleo diesel, operação e manutenção e, diminuir a emissão de gases nocivos ao meio ambiente.

Oferecer estudos sobre as possibilidades de expansão desses sistemas de modo que acompanhem o crescimento da carga instalada, em função do aumento de eletrodomésticos e do número de horas de funcionamento destes, do número de unidades consumidoras, e da renda das famílias devido à ampliação e melhoria das atividades econômicas, favorecendo e incentivando a fixação e o desenvolvimento do homem no campo. Fornecer conteúdos que possam ser utilizados como auxílio para conscientizar a sociedade com relação ao uso racional da energia dada a intermitência das fontes renováveis, a limitação da geração e a proteção do meio ambiente como um fator de suma importância para o bom funcionamento e longevidade deste e de qualquer sistema de energia. Disponibilizar estudos para projetos para proporcionar fornecimento de energia e conseqüentemente melhoria da infraestrutura, desenvolvimento socioeconômico, produtividade e do escoamento de produtos.

6- Agradecimentos

Agradeço fundamentalmente a Deus pela vida e pela vontade de adquirir conhecimento e contribuir com a sociedade, ao Professor André Mesquita, pela orientação sempre competente e prestativa, aos bons amigos que fiz ao longo do mestrado, em especial aos que muito me ajudaram sempre de forma espontânea, aos meus familiares, pelo amor incondicional, amizade e pelas palavras de conforto e incentivo.

6- Referências Bibliográficas

- [01] - GREENPRO. *Energia Fotovoltaica – Manual Sobre Tecnologias, Projeto e Instalações*. União Europeia: ALTENER, 2004.
- [02] - BAISER, A. **Modern Physics. Na introductory survey**. Londres, Inglaterra, 1968.
- [03] - PINHO, J. T.; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar–GTES**. CEPEL–DTE–CRESESB, 2014.
- [04]- CÂMARA, C, F. *Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, 2011.
- [05] - <http://sites.ifi.unicamp.br/lfmoderna/conteudos/espectroscopia-atomica-e-molecular-2/>Acesso em 01 de junho de 2017.
- [06] **SOLARGIS**. *Online Data and Tools for Solar Energy Projects*. Bratislavia: GeoModel Solar, 2013. Disponível em: <http://solargis.info/> Acesso: 02/06/2017.
- [07] **EIA**. *World Energy Consumption, Independent Statistics and Analysis*. Washington: EIA, U.S. Energy Information Administration, 2014. Disponível em: <http://www.eia.gov/analysis/> Acesso: 11/05/2017.
- [08] PINHO, J. T.; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.
- [09] CRESESB. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **CRESESB Informe. Conferência de Bonn e PROINFA: Surge Novas Perspectivas para Energias Renováveis. P. 22. N°9. Maio, 2004. CRESESB. Tutorial Solar**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso: 09/07/2017.
- [14] PINHO, J. T. Ministério de Minas e Energia. **Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia**. 1ª Edição, Brasília, 2008.
- [15] MELÉNDEZ, Teddy A. F.; **Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos de Bombeamento**. Dissertação do programa de pós Graduação em Energia. Universidade de São Paulo, 2009.
- [16] ALVIM, Aymoré C. ; MARTINEZ, Carlos B. ; SILVA, Selênio R. ; **Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água**. In. Seminário de Divulgação do Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) da UFMG.2002.
- [17] FEDRIZZI, Maria. C. ; **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado; Universidade de São Paulo; São Paulo, 1997
- [18] FEDRIZZI, Maria. C. ; **Sistemas Fotovoltaicos de abastecimento de Água para uso Comunitário: Lições Aprendidas e Procedimentos para Potencializar a sua Difusão**. Tese de Doutorado; Universidade de São Paulo; São Paulo, 2003.
- [19] MEDEIROS, Carlos F.; **Abastecimento de água**; Disponível em<<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Agua.html>>. Acesso em: 06 Ago. 2017.
- [20] Melo, O.B.;**análise da viabilidade técnica econômica de painéis fotovoltaicos instalados no setor residencial**. Trabalho de Conclusão de Curso; Universidade de São Paulo; São Carlos, 2014.
- [21] Matos, A.P.;**Energia Solar Fotovoltaica Como Fonte Alternativa Na Geração De Energia Elétrica Em Uma Embarcação**. Trabalho de Conclusão de Curso; UFSC; Joinville, 2016.
- [22] KAZMERSKI, L. L. **Solar photovoltaics R&D at the tipping point: a 2005 technology overview**. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150, 105-135, 2006.
- [23] BRITO, M. C., SERRA, J. M. **Células solares para a produção de energia elétrica**. *Quantum* número 1 - Revista do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Portugal, 2005.
- [24] BLUESOL, ENERGIA SOLAR. **Livro Digital de Introdução aos Sistemas Solares**, 2016. Disponível em: www.blue-sol.com.br, Acesso em: Agosto de 2017.
- [25] Kusakana K. Viabilidade de sistemas hidrocínicos rio fora da rede com Armazenamento hidráulico bombeado em aplicações rurais. *Gestão de conversão de energia* 2015; 96: 352-62 .
- [26] Kusakana K. **Programação ótima do fluxo de potência para distribuído fotovoltaica / vento /Geradores a diesel com sistema de armazenamento de bateria**. *IET Renew Power Gener* 2015; 9(8): 916-24 .
- [27] Bacaltchuk, J.; **Usinas Hidrelétricas Reversíveis Com Uso Compartilhado De Reservatórios Existentes. xxx seminário nacional de grandes barragens, Foz do Iguaçu – Paraná 12 a 14 de maio de 2015**. Disponível em :<http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/seminarioTecnico/album.html?action=detail&image=4> Acesso em: 08/09/2017.
- [28] Gonçalves, C.; **Energia renovável – eficiência e desafios**. *Eletronorte & Unb*; Disponível em: <http://www.eletronorte.gov.br/opencms/opencms/seminarioTecnico/album.html?action=detail&image=4> Acesso em: 05/10/2017.

- [29] SHAYANI, Rafael Amaral. **Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células**. 2006.
- [30] <https://www.google.com.br/maps/@3.9801338,49.7256751,15260a,35y,37.27t/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 08/10/2017.,
- [31] Sanjay V. Jain , Rajesh N. Patel. Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. 2014.
- [32] Xavier, G. A. Simulação de Micro-Redes de Energia Elétrica com Geração Fotovoltaica e Armazenamento de Energia. Viçosa, MG. Brasil 2011.
Disponível em: <http://docplayer.com.br/11468378-Gustavo-azevedo-xavier-simulacao-de-micro-redes-de-energia-eletrica-com-geracao-fotovoltaica-e-armazenamento-de-energia.html> .Acesso em : 07/09/2017.
- [33] STEVENSON, Richard. First Solar: Quest for the \$1 Watt; Within five years, this company's thin-film solar cells could compete with coal. *Revista Spectrum*. Agosto de 2008.
- [34] LORENZO, E.; ARAUJO, G.; CUEVAS, A.; EGIDO, M.; MINANO, J.; ZILLES, R. *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. 1. ed. Sevilla: Institute. of Solar Energy, Polytechnic Univ. of Madrid, 1994. Ed. Earths can Publications Ltd, January 1994, 340 p.
- [35] EPE **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. MME, Rio de Janeiro, 2012,2014.
URL: <http://www.epe.gov.br> Acesso em: 03/06/2017; 18/07/2017; 26/08/2017.
- [36] PONCE-ALCANTARA, S. DEL CANIZO, C. LUQUE, A. PERC structure to improve multicrystalline solar cell performance. 2005 *Spanish Conference on Electron Devices*, Tarragona, p. 283-286, 2-4 Feb. 2005.
- [37] RAZYKOV, T. M. Photovoltaic Solar Electricity: State of the Art and Future Prospects. . *ICEMS 2003 - Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003*, v. 1, p. 297 - 301 vol.1, 9-11 Nov.2003.
- [38] ARMSTRONG, S.; HURLEY, W.G. Investigating the Effectiveness of Maximum Power Point Tracking for a Solar System. *PESC '05. IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference*, 2005, Recife, p. 204 – 209, 16-16 June 2005.
- [39] EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. 2015. 292p. Ministério de Minas e Energia, Brasília. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acessodia 14/02/2016.
- [40] Honsberg C. Bowden S. 1999. “**Photovoltaics: Devices, Systems and Applications PVCDROM 1.0**”, University of New South Wales, Sydney, Austrália.
- [41] SKARSTEIN, O., ULHEN, K. **Design Considerations with respect to long-term diesel saving in wind/diesel plants**. *Wind Engineering*, 13, 72-87, 1989.
- [42] VIANA, A.N.C.; Nogueira, F. J. H. **Bombas centrífugas funcionando como turbinas**. Itajubá/MG, 1990. Trabalho de pesquisa. Departamento de Mecânica. UNIFEL.
- [43] DOMOSOLAR. Disponível em<<http://www.domosolar.net/domotica/energia-fotovoltaica/>>. Acesso em 22/12/2017.
- [44] OTTOBONI, R. **Modelagem e especificação do sistema de controle de velocidade de Bombas Funcionando como Turbina pelo SISCOV® e lógica Fuzzy** (Dissertação de Mestrado). Itajubá-MG. Universidade Federal de Itajubá.Itajubá/MG 2015.
- [45] ALVES, D.D.S. **Contribuições Para o Estudo e a Aplicação de Bombas Funcionando Como Turbinas na Geração Descentralizada** (Dissertação de Mestrado). Belo Horizonte-MG. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte/MG 2010.
- [46] MAH, D. et al. **Smart Grid Applications and Developments**. Berlin: Springer, 2014.
- [47] SATO, T. et al. **Smart Grid Standards Specifications, Requiriments a Technologies**. London: Wiley, 2014.
- [48] BUCHHOLZ, B. M.; STYCZYNSKI, Z. **Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks**. Berlin: Springer, 2014.
- [49] CHAPALLAZ, J. M.; EICHENBERGER, P.; FISCHER, G.; **Manual on Pumps Used as Turbines**; MHPG Series; Vol. 11; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH; Germany, 1992.
- [50] Santos, J.C.V., e Kleinkauf, W.,1999, ” A methodology for modeling synthetic daily sequences of hourly power demand for villages and small towns, based on stochastic processes”, *Solar Energy*, Vol 66, N° 6, pp.459-467.
- [51] – Laboratório de Energia Solar. Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC). UFRGS, 2017:
Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/>. Acesso em 10/06/2018.
- [52] PARÁ, Lei 6.451 de 08/04/2002. Dispõe sobre criação de Unidades de Conservação da Natureza na região do Lago de Tucuruí no território sob jurisdição do Estado do Pará, e dá outras providências. A ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO PARÁ. Belém, Pa, 09.04.2002. Disponível em: < <http://oads.org.br/leis/>> Acesso em 01.07.2018.
- [53] Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade -SEMAS.
Disponível em: <<https://www.sem.as.pa.gov.br/diretorias/areas-protetidas/area-de-protacao-ambiental-do-lago-de-tucuru/localizacao/>> Acesso em 15.07.2018.

- [54] – Rütther, R. LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar & LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Panorama Atual da Utilização da Energia Solar Fotovoltaica**. Departamento de Engenharia Civil e Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 1999.
Disponível em: <http://www.labsolar.ufsc.br/>. Acesso em 10/09/2018.
- [55] – NASA. Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version 2 (MERRA-2), 2017.
Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/> Acesso em 10/06/2018.
- [56] Hecktheuer, L.A. **Análise de Associações de Módulos Fotovoltaicos**. Tese de Doutorado. PROMEC/UFRS. 2011.
- [57] KIPP & ZONEN. **Instrumentos de medição de irradiância**. Disponível em:
<<http://www.kippzonen.com>>. Acesso em: 29 jun. 2018.
- [58] POLO, J.; ZARZALEJO, L. F.; RAMÍREZ, L. Solar radiation derived from satellite images. In: BADESCU, V. (Ed.). **Modeling solar radiation at the Earth's surface: recent advances**. Bucharest: Springer, 2008. p. 449-460.
- [59] INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia - Observações**. Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 02 jul. 2018.
- [60] SWERA. **Home**. Disponível em: <<http://swera.unep.net>>. Acesso em: 30 jun. 2018.