

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA
SOLAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA NA CIDADE DE MANAUS

MÁRCIA PIRES DE SOUZA

MANAUS
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA
SOLAR COMO FONTE ALTERNATIVA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA NA CIDADE DE MANAUS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira

MANAUS
2016

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Souza, Marcia Pires de
S729a Análise da viabilidade de utilização da energia solar como fonte
alternativa de geração de energia na cidade de Manaus / Marcia
Pires de Souza. 2016
33 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Kennedy Vieira
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Energia solar. 2. Sistema fotovoltaico. 3. Medições
meteorológicas. 4. Sustentabilidade. I. Vieira, Raimundo Kennedy
II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

MÁRCIA PIRES DE SOUZA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR
COMO FONTE ALTERNATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA CIDADE
DE MANAUS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, área de concentração Gestão Ambiental.

Aprovado em 14 de dezembro de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Genilson Pereira Santana, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

DEDICATÓRIA

A Deus, por ser a razão do meu viver e de minhas vitórias.

À minha mãe Guislene, pela parceria e companheirismo ainda mais presente nos últimos dois anos.

Ao meu pai, Valdomiro, e aos meus irmãos Valdomiro Filho e Marly, pelo incentivo e apoio dado para a realização deste mestrado.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado sabedoria, força, coragem e perseverança para concluir o Mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira, pela sua paciência e competente orientação durante a realização do trabalho, e por transmitir seus conhecimentos com muita sabedoria, e pela dedicação de parte de seu tempo na concretização deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, em especial à funcionária Mayara, do 1º Distrito de Meteorologia, pela disponibilização de todos os dados meteorológicos necessários para a realização da pesquisa e por ter estado sempre à disposição quando solicitada à prestar apoio para realização do trabalho.

À Universidade Federal do Amazonas, pela oportunidade dada aos seus servidores de qualificação pessoal e profissional, com a disponibilização de turma específica para este mestrado.

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, por ceder o afastamento de minhas atividades durante todo o curso para dedicação total ao Mestrado.

Por fim, agradeço aos meus familiares e a todos que, direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse concluído.

Muito obrigada!

“Um dia aprendi que sonhos existem para tornar-se realidade. E, desde aquele dia, já não durmo pra descansar. Simplesmente durmo pra sonhar.”

Walt Disney

RESUMO

A crise energética através das fontes convencionais é um problema que hoje atinge países no mundo inteiro. Visando amenizar este problema, apresentamos como alternativa a geração de energia solar via sistema fotovoltaico, que além de ser obtida através de uma fonte renovável, é um recurso abundante em diversos países, além de ser ambientalmente correto. A Região Norte do Brasil possui um dos maiores índices de incidência solar do território brasileiro, o que a torna apta a receber investimentos para a instalação de usinas solares fotovoltaicas. Ademais, essa região do país possui inúmeras comunidades isoladas que não tem acesso a eletricidade ou possui de forma precária. Neste trabalho foi analisado o potencial de geração da energia solar na cidade de Manaus através do estudo de medições meteorológicas realizados nos últimos cinco anos, referentes à radiação solar, acompanhado da precipitação total anual e velocidade média do vento. Foi realizada uma revisão da literatura sobre o tema da energia solar utilizando como base de dados artigos recentes publicados no Google Acadêmico no período de 2012 a 2016. Os resultados mostram que mesmo com a variação extrema no regime de chuvas no período analisado, não houve alterações significativas nos índices de radiação solar, sendo este ponto de fundamental importância no dimensionamento do sistema fotovoltaico.

Palavras-chave: **Energia solar; Sistema fotovoltaico; Medições meteorológicas; Sustentabilidade.**

ABSTRACT

The energy crisis through conventional sources is a problem that now affects countries worldwide. Aiming to soften this problem, we present as alternative the solar power generation via photovoltaic system, which besides being obtained from a renewable source, is an abundant resource in several countries, as well as being environmentally friendly. The northern region of Brazil has one of the largest solar incidence rates of Brazil, which makes it able to receive investments for the installation of photovoltaic solar plants. Moreover, this region of the country has many isolated communities that have no access to electricity or have precariously. In this work was examined the potential for generation of solar energy in the city of Manaus, through the analysis of meteorological measurements carried out in the last five years references to solar radiation, accompanied by the total annual rainfall and average wind speed. It will be performed a literature review on the topic of solar energy using as recent articles database published in Scholar Google in period from 2012 to 2016. The results showed that even with the extreme variation in rainfall during the period analyzed, there was no significant changes in levels of solar radiation, which is a point of fundamental importance in the dimensioning of the photovoltaic system.

Keywords: Solar Energy; Photovoltaic System; Meteorological Measurements; Sustainability.

Lista de Figuras

Figura 1. Matriz energética no mundo e no Brasil

Figura 2. Funcionamento do sistema fotovoltaico

Figura 3. Radiação solar global x Precipitação total mensal e velocidade média do vento 2011

Figura 4. Radiação solar global x Precipitação total mensal e velocidade média do vento 2012

Figura 5. Radiação solar global x Precipitação total mensal e velocidade média do vento 2013

Figura 6. Radiação solar global x Precipitação total mensal e velocidade média do vento 2014

Figura 7. Radiação solar global x Precipitação total mensal e velocidade média do vento 2015

Figura 8. Média de radiação solar e precipitação de 2011 a 2015

Lista de Quadros

Quadro 1. Simulador de custo de sistema fotovoltaico

Lista de Abreviaturas e Siglas

BEN	Balanço Energético Nacional
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
EMA	Estação Meteorológica Automática
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
W/M ²	Watt por metro quadrado
KWH	Quilowatt-hora por mês
MM	Milímetros
MME	Ministério de Minas e Energia
M/S	Metros por segundo
MWP	Megawatt Pico
SIM	Sistema Nacional de Informações Meteorológicas
WP	Watt-pico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Energia solar fotovoltaica	15
2.2 Custo de geração do sistema	17
2.3 Programas e incentivos governamentais	19
2.4 Medições Solarimétricas e condições climáticas	20
3. METODOLOGIA	22
3.1 Revisão da literatura	22
3.2 Medições Meteorológicas	22
4. RESULTADOS DA PESQUISA E DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS	30
6. REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

A crise energética é um problema que preocupa países no mundo inteiro (COMMONER, 2015). Nos últimos anos, ela vem se agravando devido ao aumento na demanda por energia elétrica além dos limites da capacidade de geração instalada (DEVABHAKTUNI, 2013). Além disso, outros fatores como o desenvolvimento industrial, os preços elevados dos combustíveis tradicionais, como o petróleo, a limitação dos combustíveis fósseis e a preocupação crescente com a preservação do meio ambiente tem agravado a situação (TAZVINGA, 2013). Essa circunstância tem incentivado países em todo o mundo todo a buscar por fontes alternativas de geração de energia.

Para Ahmad (2014), essa necessidade foi percebida sobretudo nos países em desenvolvimento, onde geralmente os recursos disponíveis são as fontes renováveis, como a biomassa, as energias solar e eólica.

Dentre esses países se inclui o Brasil, que devido sua vasta extensão territorial, diversas de suas cidades estão localizadas distantes dos principais centros geradores de energia (BLOCK, 2014).

Na ocasião do Censo 2010 (IBGE, 2011) havia 1,3% de domicílios sem energia elétrica no país. Neste período, a maior escassez ocorria nas áreas rurais do seu território (7,4%). A situação extrema era a da região Norte, onde 24,1% dos domicílios rurais não possuíam energia elétrica; seguida das áreas rurais do Nordeste (7,4%) e do Centro-Oeste (6,8%).

Além disso, as preocupações ambientais estão estimulando a busca de tecnologias não agressivas que permitam que a humanidade sobreviva sem a utilização de combustíveis fósseis (HOSENUZZAMAN, 2015).

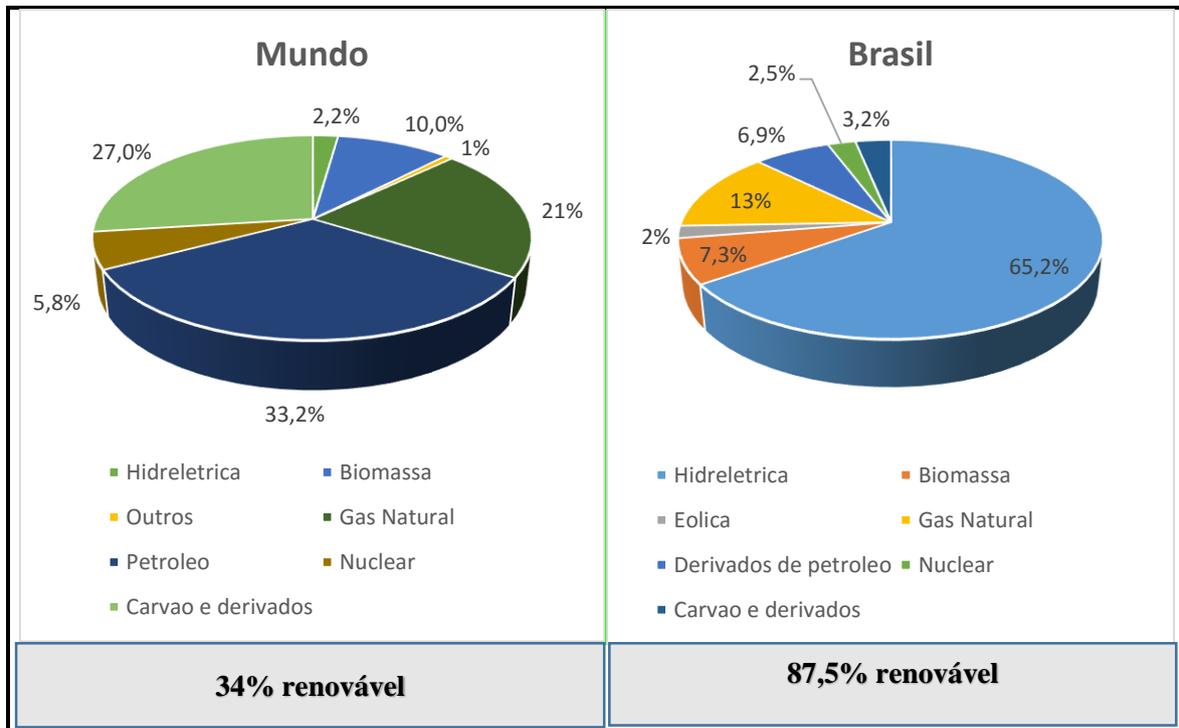
Nesse contexto, as fontes renováveis de geração de energia são mais apropriadas, pois se bem gerenciadas, possibilitam que sua exploração seja ilimitada, já que sua disponibilidade não é reduzida conforme o uso (ELLABBAN, 2014).

O potencial das fontes de energia renováveis é enorme, pois sua capacidade pode produzir muitas vezes a demanda total de energia do mundo (BOTKIN, 2012). Estudos indicam que a necessidade energética global pode ser satisfeita cerca de mil vezes pelo uso de energia solar. Contudo, apenas 0,02% desta energia é atualmente utilizada (DEVABHAKTUNI, 2013).

O Brasil é um dos países mais avançados do mundo no que se refere ao uso de energia renovável (PEREIRA, 2013). Os dados de 2014 mostram no Balanço Energético Nacional (2015) que quase 90% da energia elétrica brasileira foi gerada através de fontes renováveis, ao passo que

no mundo somente 34% dos recursos utilizados foram renováveis (Figura 1). Por este motivo, o apelo ambiental no país não é muito forte, uma vez que grande parcela da geração de eletricidade brasileira já é renovável.

Figura 1: Matriz energética mundo e Brasil (2014)



Fonte: Balanço Energético Nacional 2015 (adaptado)

O objetivo deste trabalho é comprovar a possibilidade de aproveitamento da energia solar como fonte alternativa de geração de eletricidade na cidade de Manaus, a partir da análise de dados meteorológicos referentes aos últimos cinco anos.

Este trabalho está dividido em seis capítulos: No capítulo 1 faz-se uma introdução ao assunto. O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, definindo a energia solar fotovoltaica, seu custo de geração, os programas e incentivos governamentais referentes ao tema em questão no Brasil e os principais conceitos referentes a medições solarimétricas e condições climáticas. O capítulo 3 descreve a metodologia aplicada. O capítulo 4 expõe os resultados e análise da pesquisa e por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre a pesquisa, identificando suas limitações e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

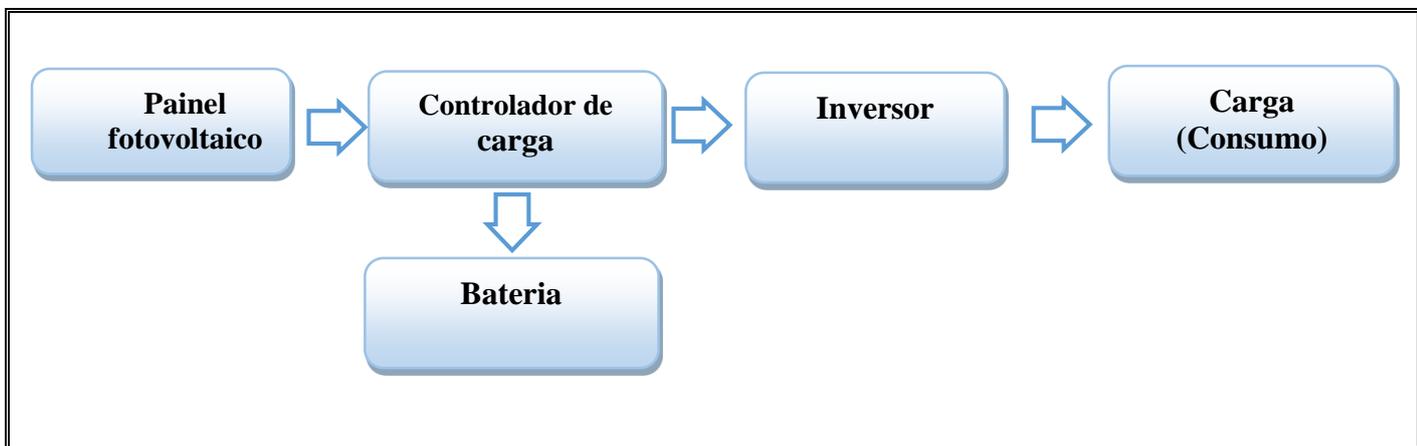
Neste capítulo, apresentamos os principais elementos que compõem um sistema fotovoltaico, analisando os custos de implantação do sistema, os principais incentivos e programas

governamentais disponíveis no Brasil, além de expor as vantagens e desvantagens do sistema, demonstrando a viabilidade da geração do sistema fotovoltaico como uma alternativa sustentável e de grande potencial na cidade de Manaus.

2.1 Energia solar fotovoltaica

Energia solar fotovoltaica é definida como uma fonte renovável de energia obtida pela conversão da energia solar em energia elétrica (BAZILIAN, 2013). Um típico sistema de energia solar fotovoltaica consiste de quatro elementos básicos: módulos ou painéis fotovoltaicos, inversores, controladores de carga e baterias, caso necessário.

Figura 2– Funcionamento do sistema fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Singh (2013)

Da Figura 2, esquematizamos o funcionamento do sistema fotovoltaico, onde:

- Os painéis fotovoltaicos são responsáveis pelo fornecimento de energia para o sistema, transformando a energia solar em energia elétrica.
- Os controladores de carga evitam a sobrecarga e descargas exageradas na bateria, aumentando seu desempenho e vida útil.
- Os inversores transformam a energia elétrica gerada pelos painéis solares de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA), além de serem responsáveis pela sincronia com a rede elétrica.
- Por fim, as baterias armazenam a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado quando não há Sol.

Os sistemas fotovoltaicos são uma forma de geração de energia limpa, e algumas de suas vantagens são a modularidade, a mobilidade, a facilidade de se instalar e sua longa expectativa

e vida, podendo chegar a vinte e cinco anos (XAVIER, 2012). Devido a esta facilidade, o crescimento do sistema fotovoltaico para geração de energia elétrica é um dos mais promissores no domínio das energias renováveis. Isto é uma tendência que deverá continuar nos próximos anos (ARISTIZABAL, 2012). Além desta possibilidade de rápido crescimento, Urbanetz (2012) afirma que sua utilização como geração distribuída não leva a uma menor qualidade do fornecimento de energia e confiabilidade.

Os países europeus são responsáveis por aproximadamente 65% da capacidade global instalada dos sistemas fotovoltaicos, sendo a Espanha, a Alemanha, os Estados Unidos, o Japão e a China os países com a maior capacidade instalada (SAHU, 2015).

No Brasil, sua utilização ainda é incipiente, apesar do potencial solar favorável em seu território (DE MARTINO JANNUZZI, 2013), que apresenta condições superiores às desses países que hoje estão à sua frente em capacidade de potência instalada.

Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do país (4200-6700 kWh/m²) são superiores aos da maioria dos países da Europa, como Alemanha (900- 1250 kWh/m²), França (900- 1650kWh/m²) e Espanha (1200-1850 kWh/m²) (ENTREPRENEURS TOOL KIT, 2017), onde a utilização da energia solar é amplamente disseminada e recebe expressivos incentivos governamentais.

Em vista disso, o país pode desfrutar dessa modalidade de geração de energia de modo especial, pois dispõe em abundância desta fonte energética, em todo seu território, sobretudo nas regiões Norte e Nordeste (MACEDO,2013).

Devido sua localização em uma região de altos níveis de radiação solar, o sistema fotovoltaico tem uma vantagem no país sobre as outras fontes de energia renováveis na categoria disponibilidade de recursos (CANEPPELE, 2014).

Segundo Calazans (2015), a capacidade de energia fotovoltaica total instalada no Brasil é estimada entre 12 e 15 megawatt- pico (MWp), que corresponde a menos do que 0,01% da energia do país.

As aplicações de sistemas solares fotovoltaicos no país são principalmente isolados, especialmente para a eletrificação rural (DE FARIA, 2016).

Os principais obstáculos para o desenvolvimento do mercado fotovoltaico no Brasil foram, segundo Lacchini (2013), os preços elevados, a falta de legislação adequada e incentivos do

governo. Para promover a viabilidade dos sistemas fotovoltaicos no Brasil, a redução dos preços dos módulos deve ser o principal objetivo.

As principais vantagens da utilização do sistema fotovoltaico são os baixos custos de manutenção, a vida útil do sistema e sua confiabilidade (BAZILIAN, 2013). Além disso, é uma fonte de energia gratuita, inesgotável e disponível em quase todos os lugares do mundo, sendo um excelente recurso em lugares remotos ou de difícil acesso (TAZVINGA, 2013). Ademais, esse processo se utiliza de uma fonte de energia limpa, em que não são emitidos gases de efeito estufa (HOSENUZZAMAN, 2015).

Por outro lado, as principais desvantagens do sistema são o alto custo inicial de instalação (KAZEM, 2013), as limitações na disponibilidade do sistema no mercado, a necessidade de uma grande área de instalação (LANZAFAME, 2014), as formas de armazenamento pouco eficientes, a dependência climática (KHATIB, 2013) e o baixo rendimento, levando em consideração que não existe produção a noite. Além disso, em algumas zonas do planeta a energia solar não constitui uma alternativa válida, pois nessas regiões não há luz solar suficiente.

2.2 Custo de geração do sistema

Estudos recentes mostram que os custos de geração do sistema fotovoltaico, embora difícil de estimar, são altos, variando de 0,15 US\$/quilowatt hora (kWh) em sistemas na escala megawatt e operado 24 h por dia, para 0,50 US\$/kWh em pequenas comunidades, onde a eletricidade é fornecida apenas para 6-12 h por dia (SILVEIRA, 2013).

Com relação à compra dos painéis fotovoltaicos, Bazilian (2013) afirma que o investimento necessário é de 3,50 a 4,00 US\$/watt-pico (wp). Havendo a necessidade de instalar um inversor e componentes periféricos, os investimentos estruturais podem aumentar cerca de 25%.

No entanto, segundo Devabhaktuni (2013), o preço dos módulos fotovoltaicos caíram de forma sistemática ao redor do mundo. Isto ocorreu em função do aumento de escalar. Assim, espera-se que o mesmo fenômeno se repita no Brasil. Esta constatação já fora mencionada por Silveira (2013). Este autor acredita que investimentos na área em países desenvolvidos pretendem gerar volumes de produção necessários para que os custos de aquisição de painéis reduzam para 2,00 US\$/wp.

Além disso, o preço da energia no Brasil tem aumentado nos últimos anos devido às condições climáticas não favoráveis que fizeram secar os reservatórios das centrais hidroelétricas. Estas centrais tiveram a redução do nível de geração, como nunca visto antes (SCANLON, 2015). Esta instabilidade gera uma oportunidade para os sistemas fotovoltaicos, pois, com os preços de energia mais elevados há o favorecimento à implantação de sistemas fotovoltaicos (CHOWDHURY, 2014).

Para Calazans (2015), o uso do sistema solar fotovoltaico no Brasil, assim como ao redor do mundo, depende ainda de subsídios para alcançar viabilidade econômica, mantido o custo da tecnologia atual, sem levar em conta os benefícios indiretos de geração limpa que esta energia fornece.

O cálculo do custo de produção de energia elétrica no sistema fotovoltaico pode ser determinado a partir da seguinte equação (SILVEIRA, 2013):

$$C_{el} = \frac{(I_t \times f) + c_{man} + c_{oper}}{H \times e}$$

Onde:

C_{el} = Custo da energia elétrica

I_t = Investimento total

f = fator de anuidade

c_{man} = custo de manutenção (US\$/Kwh)

c_{oper} = custo de operação (US\$/Kwh)

H = número de horas operacionais (h/ano)

e = energia gerada (Kw)

Também é possível estimar o preço de implantação de um sistema de energia solar fotovoltaica através de simuladores solares *online* (PORTAL SOLAR, 2016). A potência necessária para alimentar uma propriedade (residências, indústrias ou usinas) é calculada em função do consumo em kilowatt-hora (kWh). Para o cálculo é necessário informar o Estado, a cidade mais próxima e o consumo médio de energia em kWh. Simulamos o cálculo para uma residência média na cidade de Manaus, cujo consumo mensal é de 489 kWh. Os resultados apontam que:

Quadro 1: Simulador de custo de sistema fotovoltaico

Para atender a essa demanda de eletricidade, o sistema gerador de energia solar fotovoltaica precisa ter uma potência de:	
4,08 kWp. (ou potência instalada)	
O preço médio de um gerador fotovoltaico deste tamanho varia no mercado de:	
R\$ 28.560,00 até R\$ 40.800,00	
Quantidade de placas fotovoltaicas:	
16 de 250 Watts	
Produção anual de energia:	Geração mensal de energia:
5868 kWh/ano aproximadamente	489 kWh/mês aproximadamente
Área mínima ocupada pelo sistema:	Peso médio por metro quadrado:
32,63 metros quadrados aproximadamente	15 kilograma / metro quadrado

Fonte: Portal solar (adaptado)

2.3 Programas e incentivos governamentais

A partir de pesquisas realizadas, chegou-se à conclusão que a micro geração distribuída por meio do sistema fotovoltaico é economicamente viável somente com a existência de incentivos, tais como financiamento público, incentivos fiscais e políticas regulamentadoras (CALAZANS, 2015). Sem esses estímulos, o sistema é dispendioso e o retorno não é satisfatório.

Segundo Chowdhury (2014), em países desenvolvidos, onde há mais investimento na indústria fotovoltaica, subsídios governamentais têm desempenhado um papel fundamental para tornar esses sistemas economicamente viáveis. No Brasil não existem esses incentivos, o que provoca um grande potencial energético não aproveitado.

Estes incentivos poderiam assumir a forma de tarifas de energia reduzidas ou empréstimos para a compra de equipamentos, com um conseqüente aumento do mercado.

Para Zhang (2011), a participação do governo para a promoção do sistema fotovoltaico com subsídios de longo prazo tem uma importância fundamental, já que o alto preço da presente tecnologia ainda é um fator limitante.

As fontes renováveis há muito tempo ganharam destaque nas políticas energéticas. Em seu estudo sobre a influência da política energética sobre a difusão do sistema fotovoltaico, Chowdhury (2014) conclui que políticas são necessárias, a fim de superar as barreiras institucionais, permitindo que a tecnologia amadureça, criando um mercado inicial.

Os investimentos em consciência pública também são importantes para a expansão dos sistemas fotovoltaicos (HOSENUZZAMAN, 2015). O relaxamento das exigências legais para instalação do sistema é outro fator crítico nos esforços para difundir esta fonte de energia.

O Governo brasileiro criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (PROINFA), com o objetivo de promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, através do aumento da participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas no Sistema Elétrico Interligado Nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016).

Conforme dados do mesmo ministério, outras iniciativas envolvendo sistemas fotovoltaicos para a eletrificação rural foram criados buscando resolver o problema da falta de acesso à eletricidade nas regiões isoladas do Brasil. Entre elas, podem ser mencionados o Programa “Luz no Campo”, cujo objetivo foi suprir com energia elétrica as áreas rurais não atendidas, com atenção diferenciada às regiões Norte, Nordeste e Centro Oeste, em razão de seu baixo índice de eletrificação rural.

Dessa forma, 16 milhões de habitantes rurais no Brasil tiveram acesso à energia elétrica através de programas de eletrificação rural no período de 1999 a 2013. No entanto, cerca de 155.000 famílias rurais ainda continuam sem acesso à energia elétrica na Região Amazônica, sobretudo comunidades muito isoladas que não podem ser abastecidas pela rede existente (SÁNCHEZ, 2015).

2.4 Medições Solarimétricas e condições climáticas

Antes de iniciar qualquer projeto de energia solar, é importante avaliar a radiação solar por um período mínimo de um ano, pois a produção de energia solar, diferentemente do que se pensa, não depende do calor, mas sim da radiação solar.

Os dados solarimétricos são de importância fundamental no dimensionamento da energia solar para a geração de eletricidade, pois um local onde as informações do recurso solar disponível

não são claras, pode inviabilizar o projeto ou gerar grandes prejuízos financeiros (RIVEROS-ROSAS, 2015).

A solarimetria pode ser definida como um conjunto de técnicas responsáveis pela avaliação do recurso solar disponível em determinado local (LISBOA, 2010). Os instrumentos de medição solarimétricos são responsáveis por medir a incidência da radiação solar em uma determinada área, em condições específicas. Os instrumentos mais comuns são (ATLAS SOLARIMÉTRICO DO BRASIL, 2015):

- Heliógrafo;
- Actinógrafo;
- Piroheliômetro;
- Piranômetro Fotovoltaico;
- Piranômetro Termoelétrico.

O mapeamento do potencial solar no Brasil tem sido realizado por diversas instituições, sendo que os levantamentos mais recentes encontram-se disponíveis nos seguintes atlas:

- Atlas de Irradiação Solar no Brasil (1998);
- Atlas Solarimétrico Brasileiro (2000);
- Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

As condições climáticas também são essenciais no dimensionamento do sistema fotovoltaico.

O território brasileiro, em virtude da sua localização e grande extensão, apresenta diferentes tipos de clima. Os principais climas do Brasil são: equatorial, tropical, semiárido, tropical de altitude, tropical atlântico e subtropical. (ALVARES, 2013).

Atravessado na região norte pela Linha do Equador e ao sul pelo Trópico de Capricórnio, a maior parte do país situa-se em zonas de latitudes baixas, nas quais prevalecem os climas quentes e úmidos, com temperaturas médias em torno de 20 °C. (GARCIA, 2015).

São verificados no país desde climas superúmidos quentes, provenientes das massas equatoriais, como é o caso de grande parte da região Amazônica, até climas semi-áridos muito fortes, próprios do sertão nordestino (VIANA, 2013).

No norte do Brasil, predomina o clima equatorial, sobretudo na região da Amazônia. As temperaturas são elevadas durante quase todo o ano. Há chuvas em grande quantidade, com

índice pluviométrico acima de 2500 mm anuais. Este tipo de clima apresenta temperaturas altas o ano todo (IBGE, 2016).

Em Manaus, o clima é considerado tropical úmido (WEATHERBASE, 2016) com temperatura média compensada anual de 26,7 °C e umidade do ar relativamente elevada durante o ano, com médias mensais entre 77% e 88%. O índice pluviométrico é elevado, em torno de 2.300 milímetros (mm) anuais, sendo março o mês de maior precipitação (335 mm) e agosto o de menor (47 mm) (INMET, 2014). As estações do ano são relativamente bem definidas no que diz respeito à chuva: o inverno é relativamente seco, e o verão chuvoso.

Devido à proximidade da Linha do equador, o calor é constante do clima local, sendo essa uma condição importante no dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos. No entanto, além do Sol, a região também é muito propensa a precipitações e céu nublado. São inexistentes os dias de frio no inverno, e a proximidade com a floresta normalmente evita extremos de calor, tornando a cidade úmida.

3. METODOLOGIA

O procedimento metodológico utilizado consiste de duas etapas: revisão da literatura e pesquisa documental no Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para levantamento de medições meteorológicas realizadas na cidade de Manaus nos últimos cinco anos.

3.1 Revisão da literatura

Na primeira etapa foram definidos os principais conceitos referentes a energia solar fotovoltaica, além de expor o custo estimado de geração do sistema, os principais programas e incentivos governamentais existentes na área no Brasil, e explicar os conceitos referentes a medições meteorológicas e condições climáticas da região em estudo. A base de dados para obtenção dos artigos analisados foi o Google Acadêmico. As pesquisas foram realizadas a partir da análise de diferentes artigos científicos recentes como fontes de pesquisas, publicados no período compreendido entre 2012 a 2016.

3.2 Medições Meteorológicas

Os dados utilizados na pesquisa foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, os quais foram disponibilizados através do Sistema Nacional de Informações Meteorológicas – SIM. As informações solicitadas foram a radiação solar, precipitação e velocidade do vento,

referente aos últimos anos, ou seja, de 2011 a 2015, na cidade de Manaus, o universo da pesquisa.

Para análise dos dados foram utilizados gráficos, com o objetivo de visualizar a influência das variáveis precipitação e velocidade do vento sobre o objeto de estudo, a radiação solar.

As medições meteorológicas foram realizadas no 1º Distrito de Meteorologia, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, em Manaus/AM.

Este distrito situa-se a uma altitude de 61,25 em relação ao nível do mar, com latitude 03°06'12" Sul e longitude 060°00'59" Oeste.

Uma estação meteorológica automática (EMA) coleta, de minuto a minuto, as informações meteorológicas representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados (INMET, 2011).

A coleta de dados é feita através de sensores para medição dos parâmetros meteorológicos a serem observados. As medidas tomadas, em intervalos de minuto a minuto, e integralizadas para no período de uma hora, para serem transmitidas, são (INMET, 2011): a temperatura e umidade do ar, a temperatura do ponto de orvalho, a pressão atmosférica do ar, a velocidade e direção do vento, a intensidade da rajada do vento, a radiação solar e a precipitação acumulada no período.

Muitos desses parâmetros são fundamentais para o planejamento de um sistema fotovoltaico. No entanto, nos limitaremos a focar nos mais importantes no dimensionamento do sistema, que são a radiação solar, a precipitação e a velocidade do vento.

Neste trabalho os dados de radiação solar foram obtidos através do piranômetro fotovoltaico, a precipitação através do pluviômetro e a velocidade do vento através do anemômetro.

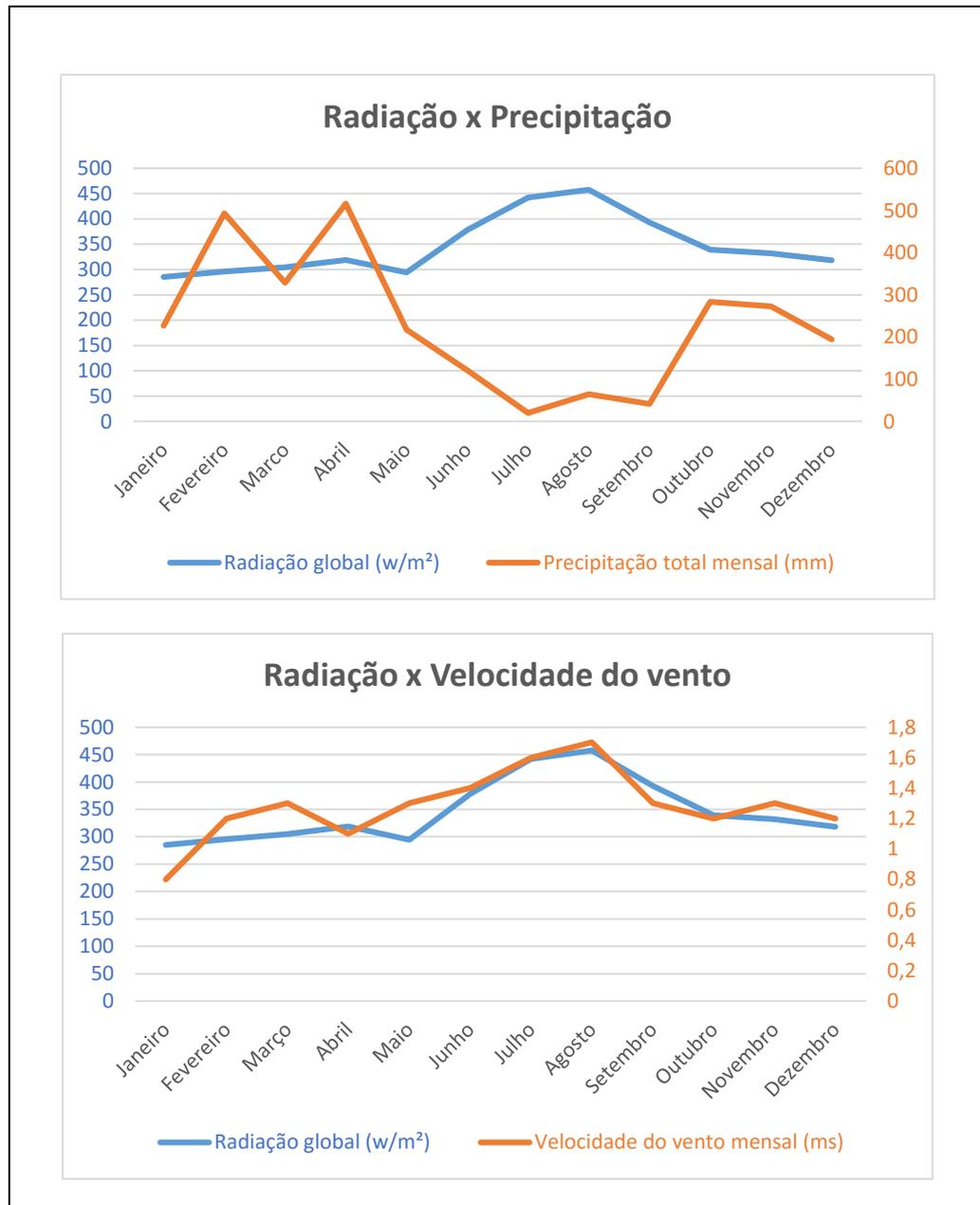
As unidades de medição utilizadas são o watt (w/m^2) para radiação solar, milímetros (mm) para precipitação e metros por segundo (m/s) para o vento.

4. RESULTADOS DA PESQUISA E DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta os dados referentes aos últimos cinco anos, ou seja, de 1º de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2015, tendo eles sido disponibilizados pelo 1º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, na cidade de Manaus.

As Figuras 3 a 7 apresentam os gráficos referentes à radiação solar global comparada com a precipitação total mensal e velocidade média do vento medida pelo equipamento no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2015 na cidade de Manaus-AM.

Figura 3– Radiação solar global x Precipitação total mensal / Velocidade média do vento 2011

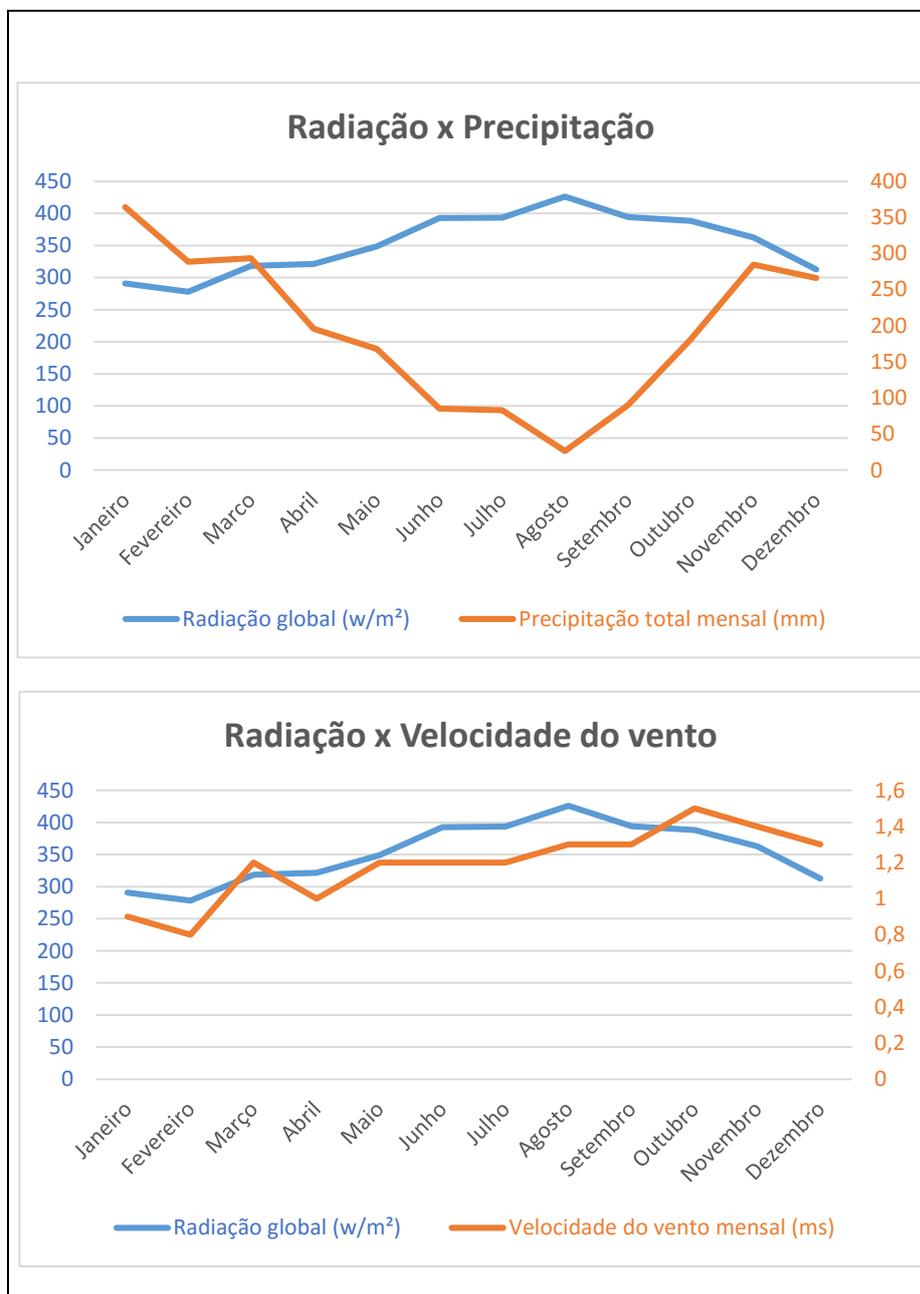


Fonte: INMET (adaptado)

Neste ano, o índice máximo de radiação solar ocorreu no mês de agosto, alcançando 457,5w/m². O índice mais baixo ocorreu no mês de janeiro, atingindo 285,27 w/m². A precipitação total anual nesse ano foi de 2.780,0 mm, com valores máximos e mínimos de 515,9 e 20,2 mm, respectivamente, nos meses de abril e julho. A velocidade média do vento oscilou entre 0,8 a 1,7 m/s, nos meses de janeiro e agosto, respectivamente.

Percebe-se que os níveis de radiação aumentaram consideravelmente no período com menor precipitação, entre os meses de julho e setembro, enquanto que a velocidade do vento não exerceu nenhuma influência sobre a radiação.

Figura 4– Radiação solar global x Precipitação total mensal / Velocidade média do vento 2012



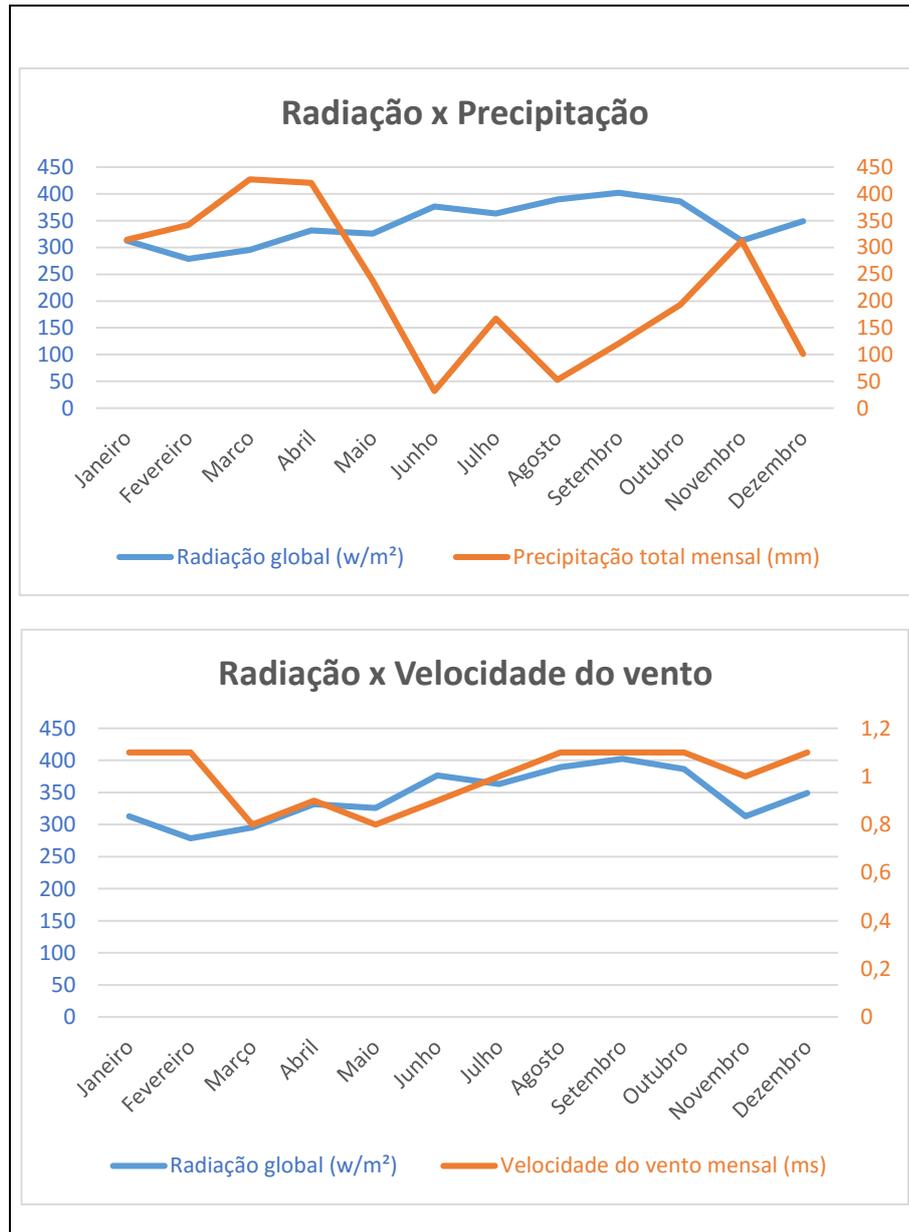
Fonte: INMET (adaptado)

Em 2012, o índice máximo de radiação solar também ocorreu no mês de agosto, no entanto houve uma queda no valor, alcançando 426,11 w/m². O menor índice ocorreu no mês de fevereiro, atingindo 278,05 w/m². A precipitação total anual nesse ano foi de 2.312,0 mm, inferior ao ano anterior, e com valores máximos e mínimos de 364,2 e 26,6 mm,

respectivamente, nos meses de janeiro e agosto. A velocidade média do vento variou entre 0,8 a 1,5 m/s, nos meses de fevereiro e outubro, respectivamente.

Pôde-se constatar que neste ano os níveis de radiação permaneceram constantes mesmo com as variações extremas das chuvas.

Figura 5 – Radiação solar global x Precipitação total mensal / Velocidade média do vento 2013



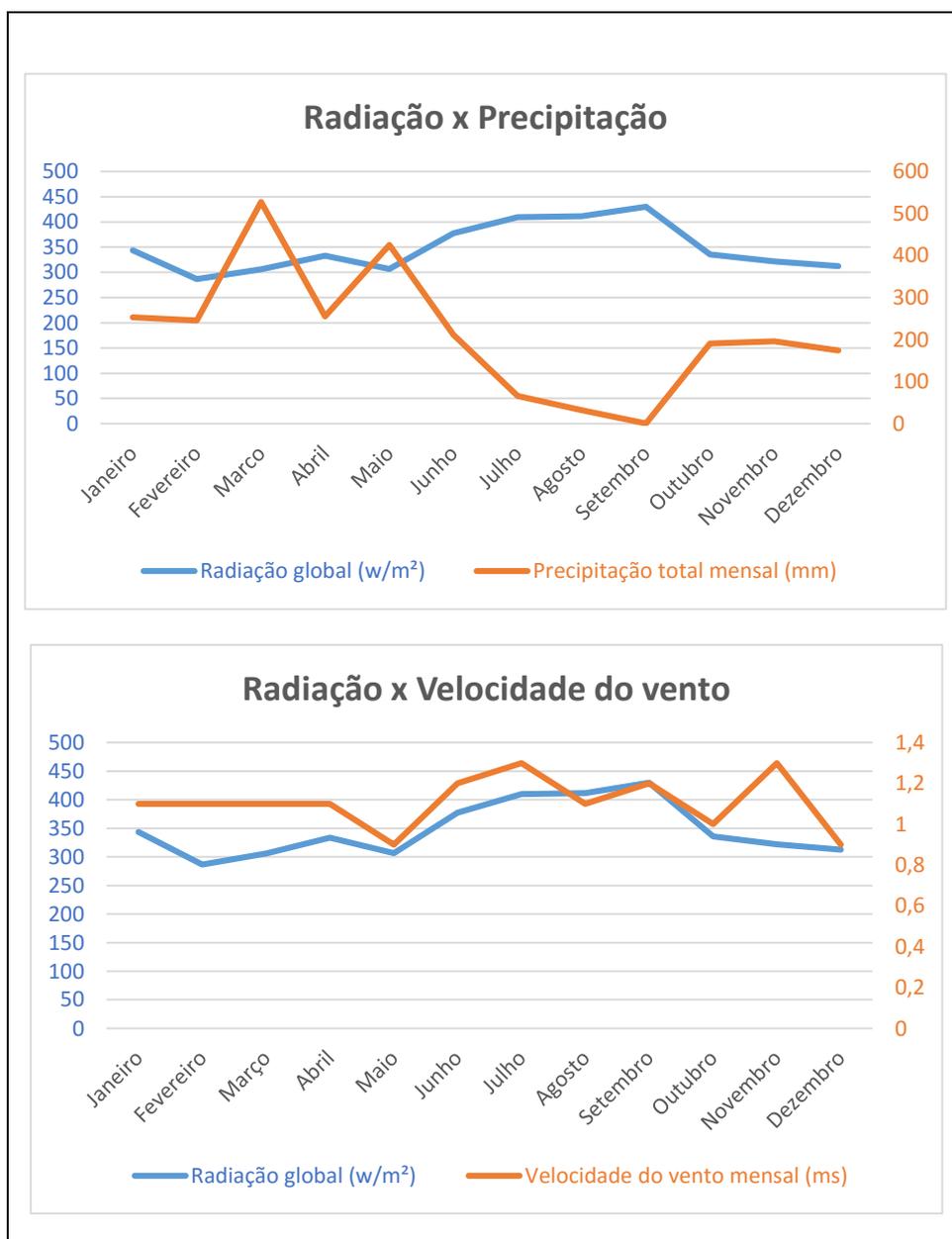
Fonte: INMET (adaptado)

Neste ano, o índice de radiação solar permaneceu caindo, sendo que nesse ano o pico ocorreu no mês de setembro, alcançando 402,22 w/m². O menor índice permaneceu no mês de fevereiro, atingindo 278,61 w/m², com um leve aumento em relação ao ano anterior. A precipitação total anual nesse ano foi de 2.723,0 mm, superando o ano anterior, e com valores máximos e mínimos

de 427,4 e 32,1 mm, respectivamente, nos meses de março e junho. A velocidade média do vento ficou entre 0,8 a 0,9 m/s durante quatro meses do ano e manteve-se constante entre 1,0 e 1,1 m/s, nos demais meses.

Novamente os índices de radiação permaneceram constantes mesmo com a variação extrema das chuvas ao longo do ano.

Figura 6 – Radiação solar global x Precipitação total mensal / Velocidade média do vento 2014



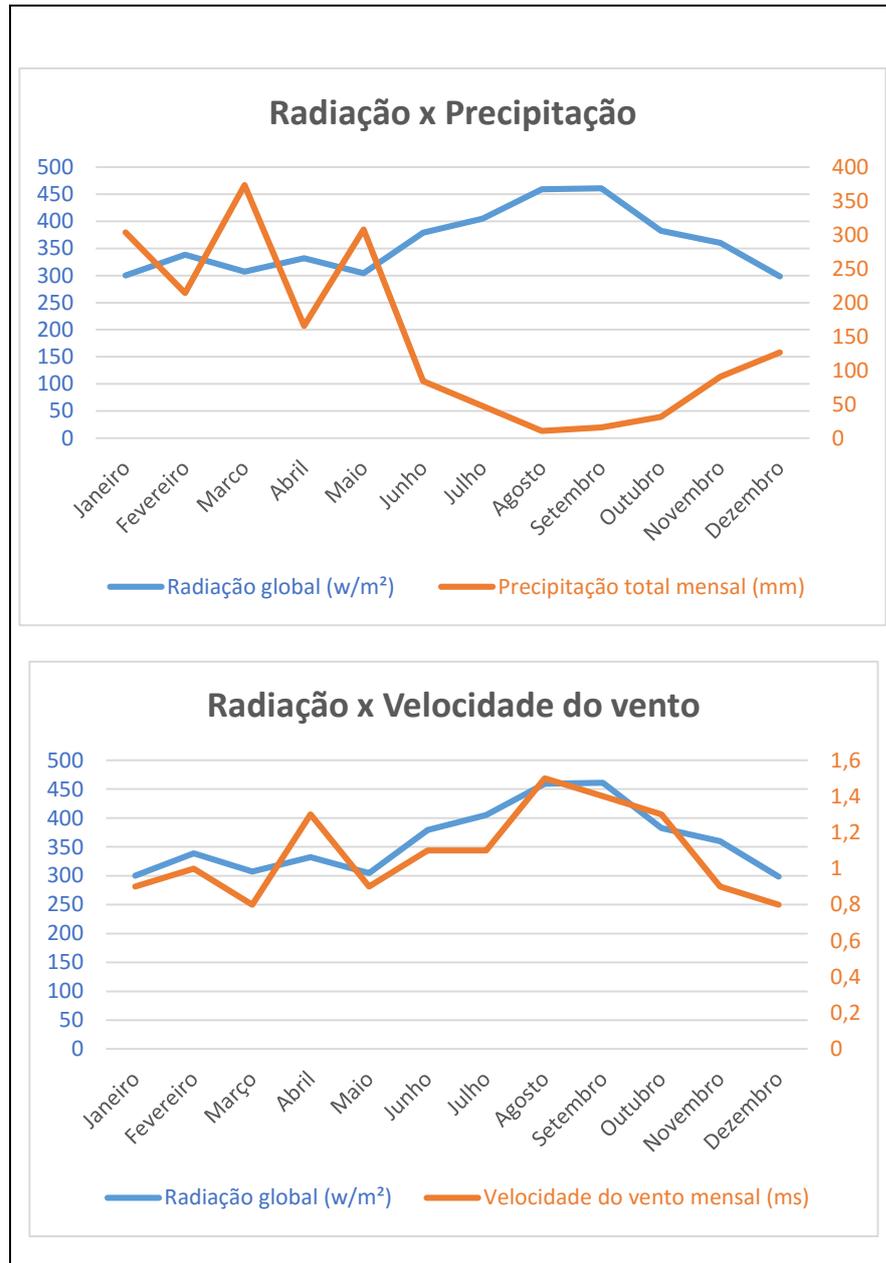
Fonte: INMET (adaptado)

Em 2014, o índice máximo de radiação solar permaneceu no mês de setembro, alcançando 430 w/m², superando o pico do ano anterior. O menor índice ocorreu no mês de fevereiro, atingindo 286,38 w/m². A precipitação total anual nesse ano foi de 2.564,0 mm, inferior ao ano anterior,

e com valores máximos e mínimos de 527,7 e 0,6 mm, respectivamente, nos meses de março e setembro. A velocidade média do vento ficou na faixa de 0,9 m/s e 1,3 m/s.

Mais uma vez as variações nas precipitações não alteraram de forma significativa os níveis de radiação, tampouco a velocidade do vento.

Figura 7 – Radiação solar global x Precipitação total mensal / Velocidade média do vento 2015

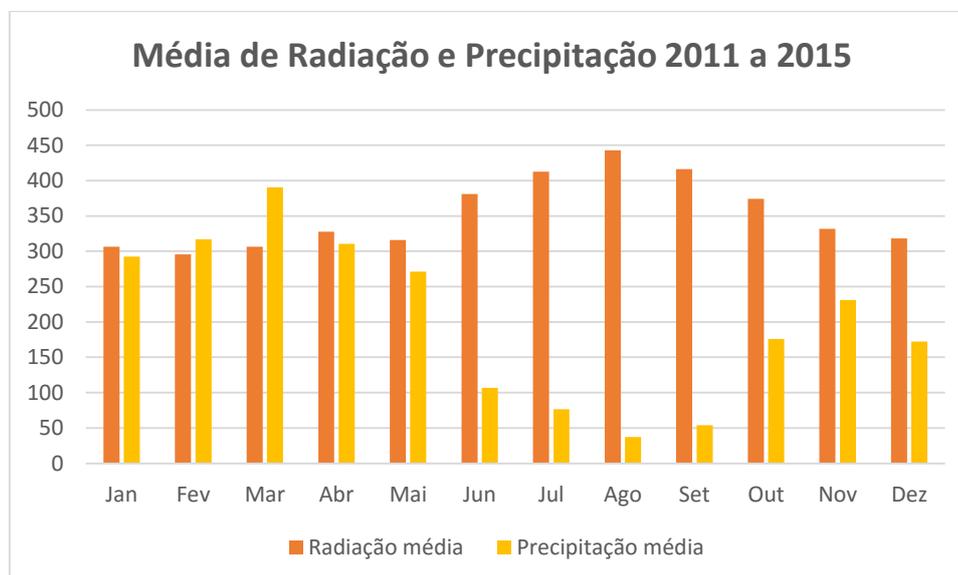


Fonte: INMET (adaptado)

Neste ano, o índice máximo de radiação solar permaneceu no mês de setembro, alcançando 460,83 w/m². O menor índice passou para o mês de dezembro, atingindo 298,33 w/m². A precipitação total anual nesse ano foi de 1.735,7 mm, bem abaixo do ano anterior, e com valores

máximos e mínimos de 373,7 e 10,7 mm, respectivamente, nos meses de março e agosto. A velocidade média do vento oscilou entre 0,8 m/s em março e dezembro a 1,5 m/s, em agosto.

Figura 8 – Radiação solar e precipitação média 2011 a 2015



Fonte: INMET (adaptado)

A partir da Figura 8 percebe-se uma sazonalidade natural nos índices de radiação, causada pela maior incidência de chuvas no período de novembro a maio, quando os índices de radiação ficaram na média de 300 w/m², enquanto que nos períodos de menor precipitação o índice de radiação alcançou 450 w/m², sendo os meses de junho a setembro o período com maior radiação no período estudado.

Percebe-se que os maiores índices de radiação ocorreram nos meses com menor precipitação, entre os meses de junho e setembro. Pôde-se constatar uma incidência de radiação solar sem variações extremas ao longo dos meses, em cada ano analisado, sendo esta uma condição excelente no dimensionamento da utilização da energia solar via sistema fotovoltaico para geração de eletricidade.

Os índices de precipitação apresentaram variação extrema entre os valores mês a mês, prevalecendo os valores baixos. No entanto, percebe-se que mesmo com variação significativa no regime de chuvas não houve alterações relevantes nos índices de radiação solar, sendo este ponto fundamental também para a utilização da energia solar para geração de eletricidade.

Do mesmo modo, pôde-se constatar que a velocidade média do vento também não exerceu nenhuma influência sobre os índices de radiação em nenhum dos anos no período analisado.

Isso pode ser justificado pela localização da cidade de Manaus em uma área de planície, logo, que não recebe influência do mar nem de montanhas, somente da radiação solar, que no período estudado não influenciou a variável de forma significativa.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Medições de radiação solar realizadas em Manaus, capital do Estado do Amazonas, e apresentadas neste trabalho comprovaram o alto potencial para geração de energia elétrica a partir da fonte solar.

Apesar de os gráficos de precipitação demonstrarem a variação extrema entre os valores mensais, a incidência da radiação solar não apresentou variações extremas ao longo dos meses, tampouco com relação a velocidade do vento, constatando que a cidade possui condições excelentes no dimensionamento da utilização da energia solar para geração de eletricidade.

No entanto, para que essa prática tenha êxito são necessárias ainda uma série de políticas para desbloquear o potencial de energia solar existente no Brasil e possibilitar o planejamento adequado do sistema. Com a expansão do mercado fotovoltaico no país e a consequente redução de custos, a energia solar fotovoltaica poderá se tornar economicamente competitiva nos próximos anos.

Este estudo teve como objetivo servir de inspiração para futuras pesquisas sobre a difusão da energia renovável, especialmente a solar, no contexto do desenvolvimento sustentável, como complemento ao sistema elétrico existente. Como sugestão para trabalhos futuros, há a necessidade de aprofundar a análise e aplicá-la a um maior número de locais. Assim, será possível identificar as características de medições meteorológicas a partir de diferentes localidades e sua influência sobre o funcionamento satisfatório dos sistemas fotovoltaicos.

6. REFERÊNCIAS

AHMAD, Salman, and Razman Mat Tahar. "Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia." *Renewable energy* 63 (2014): 458-466.

ALVARES, Clayton Alcarde, et al. "[Köppen's climate classification map for Brazil](#)." *Meteorologische Zeitschrift* 22.6 (2013): 711-728.

ARISTIZÁBAL, J., et al. "Operation Results of a Photovoltaic System Interconnected to the Low Voltage Grid in Bogotá, Colombia." *Journal of Clean Energy Technologies* 4.2 (2016).

ATLAS SOLARIMETRICO DO BRASIL. Banco de dados solarimétricos / coordenador Chigueru Tiba... et al.- Recife : Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. : il., tab., mapas.

- BAZILIAN, Morgan, et al. "Re-considering the economics of photovoltaic power." *Renewable Energy* 53 (2013): 329-338.
- BEN (2015). Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2015.
- BLOCK, Pedro, et al. "Power quality analyses of a large scale photovoltaic system." *Renewable Energy Congress (IREC), 2014 5th International*. IEEE, 2014.
- BOTKIN, Daniel B., Edward A. Keller, and Dorothy B. Rosenthal. *Environmental science*. Wiley, 2012.
- CALAZANS, Alvaro, et al. "Economic analysis of a photovoltaic system connected to the grid in Recife, Brazil." *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*. IEEE, 2015.
- CANEPPELE, Fernando de Lima, and Luís Roberto Almeida Gabriel Filho. "Current overview of the use of solar energy in Brazil." *UNOPAR Científica. Ciências Exatas e Tecnológicas* (2014): 69-74.
- CHOWDHURY, Sanjeeda, et al. "Importance of policy for energy system transformation: Diffusion of PV technology in Japan and Germany." *Energy Policy* 68 (2014): 285-293.
- COMMONER, Barry. *Poverty of Power: Energy and the Economic Crisis*. Knopf, 2015.
- DE FARIA, Haroldo, Federico BM Trigoso, and João AM Cavalcanti. "Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2016).
- DE MARTINO JANNUZZI, Gilberto, and Conrado Augustus de Melo. "Grid-connected photovoltaic in Brazil: Policies and potential impacts for 2030." *Energy for Sustainable Development* 17.1 (2013): 40-46.
- DEVABHAKTUNI, Vijay, et al. "Solar energy: Trends and enabling technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013): 555-564.
- ELLABBAN, Omar, Haitham Abu-Rub, and Frede Blaabjerg. "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (2014): 748-764.
- ENTREPRENEURS TOOL KIT. "Energia solar fotovoltaica no Brasil!". Disponível em: http://www.entrepreneurstoolkit.org/index.php?title=Energia_solar_fotovoltaica_no_Brasil. Acesso em: 06 jan 2017.
- GARCIA, Thiago Junior Furtado et al. *Geoestatística aplicada às normais climatológicas de temperaturas médias compensadas no Brasil*. 2015.
- HOSENUZZAMAN, M., et al. "Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015): 284-297.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Novembro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>. Acesso em: 01 jun 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Temperatura Média Compensada (°C)**, maio, 2014. Disponível em: <http://www.webcitation.org/6PKaRSv98>. Acesso em: 24 ago 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Umidade Relativa do Ar Média Compensada (%)**, maio, 2014. Disponível em: <http://www.webcitation.org/6PKdMcCAX>. Acesso em: 24 ago 2016.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Precipitação Acumulada Mensal e Anual (mm)**, maio, 2014. Disponível em: <http://www.webcitation.org/6PKd8wWgW>. Acesso em: 24 ago 2016.
- KAZEM, Hussein A., Tamer Khatib, and Kamaruzzaman Sopian. "Sizing of a standalone photovoltaic/battery system at minimum cost for remote housing electrification in Sohar, Oman." *Energy and Buildings* 61 (2013): 108-115.

- KHATIB, Tamer, Azah Mohamed, and Kamaruzzaman Sopian. "A review of photovoltaic systems size optimization techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22 (2013): 454-465.
- LACCHINI, Corrado, and João Carlos V. Dos Santos. "Photovoltaic energy generation in Brazil—Cost analysis using coal-fired power plants as comparison." *Renewable energy* 52 (2013): 183-189.
- LANZAFAME, Paola, Gabriele Centi, and Siglinda Perathoner. "Catalysis for biomass and CO₂ use through solar energy: opening new scenarios for a sustainable and low-carbon chemical production." *Chemical Society Reviews* 43.22 (2014): 7562-7580.
- LISBOA, Daniela da Silva. "Dimensionamento de um SFVCR: Estudo de caso do Prédio Central do Campus Universitário de Tucuruí – PA". 2010. Monografia (Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Para, Tucuruí, 2010.
- MACÊDO, Wilson, et al. "Revitalization and analysis of operation of the autonomous photovoltaic system of the Uacari Floating Lodging House, Amazon-Brazil." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21.4 (2013): 765-778.
- MACÊDO, Wilson, et al. "Revitalization and analysis of operation of the autonomous photovoltaic system of the Uacari Floating Lodging House, Amazon-Brazil." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 21.4 (2013): 765-778.
- MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA - MME. Programa de Incentivo às Fontes alternativas de energia elétrica, caminho limpo para o desenvolvimento. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>. Acesso em: 18 jul 2016.
- PEREIRA, Amaro Olimpio, et al. "Perspectives for the expansion of new renewable energy sources in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013): 49-59.
- PORTAL SOLAR. Simulador solar. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>. Acesso em 01nov 2016.
- RIVEROS-ROSAS, D., et al. "Analysis of a solarimetric database for Mexico and comparison with the CSR model." *Renewable Energy* 75 (2015): 21-29.
- SAHU, Bikash Kumar. "A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015): 621-634.
- SÁNCHEZ, A. S., E. A. Torres, and R. A. Kalid. "Renewable energy generation for the rural electrification of isolated communities in the Amazon Region." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49 (2015): 278-290.
- SCANLON, B. R., et al. "Drought Impacts on Reservoir Storage and Hydro-electricity Production in Southeastern Brazil." *AGU Fall Meeting Abstracts*. 2015.
- SILVEIRA, Jose Luz, Celso Eduardo Tuna, and Wendell de Queiroz Lamas. "The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013): 133-141.
- SINGH, Girish Kumar. "Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review." *Energy* 53 (2013): 1-13.
- TAZVINGA, Henerica, Xiaohua Xia, and Jiangfeng Zhang. "Minimum cost solution of photovoltaic–diesel–battery hybrid power systems for remote consumers." *Solar Energy* 96 (2013): 292-299.
- URBANETZ, Jair, Priscila Braun, and Ricardo Rütther. "Power quality analysis of grid-connected solar photovoltaic generators in Brazil." *Energy Conversion and Management* 64 (2012): 8-14.
- VIANA, Dione Viero, and Eliane Ignotti. "A ocorrência da dengue e variações meteorológicas no Brasil: revisão sistemática." *Revista Brasileira de Epidemiologia* 16.2 (2013): 240-256.

XAVIER, G. A., D. Oliveira Filho, and J. C. Carlo. "Photovoltaic solar energy in the world and in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.6 (2012): 2696-2706.

WEATHERBASE. Climate Summary- Manaus. Disponível em: <http://www.weatherbase.com/weather/weather-summary.php3?s=23328&cityname=Manaus%2C+Amazonas%2C+Brazil&units=>. Acesso em 24 ago 2016.

ZHANG, Y., Song, J., Hamori, S. (2011). Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation. *Energy Policy*, v.39, n.4, p. 1958-1964.