

## VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO ESTADO DO AMAPÁ: ESTUDO DE CASO EM MACAPÁ, PACUÍ, SERRA DO NAVIO E OIAPOQUE NO PERÍODO DE 2006 A 2008.

DERIVAN DUTRA MARQUES<sup>1</sup>, ALAAN UBAIARA BRITO<sup>2</sup>, ALAN CAVALCANTI DA CUNHA<sup>2</sup>,  
LEANDRO RODRIGUES DE SOUZA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá, Macapá, AP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Amapá, Macapá, AP, Brasil

derivanmarques@gmail.com, aubrito@unifap.br, alancunha@unifap.br, souzalr@msn.com

Recebido Agosto de 2009 – Aceito Novembro de 2011

### RESUMO

O objetivo do estudo foi estimar o potencial de energia solar a partir da variação da radiação solar global (RSG), no Estado do Amapá no período de 2006 a 2008. Foram utilizadas séries históricas temporais de RSG de quatro estações meteorológicas automáticas (PCD's) distribuídas numa área central do Estado. Os resultados indicaram que a distribuição da RSG anual apresentou valor máximo da ordem de 4900 Wh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> sobre a estação de Macapá, devido a sua proximidade com a linha do equador. Em Serra do Navio, Pacuí e Oiaoque foram observados valores entre 4000, 4400 e 3800 Wh.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Conclui-se que as localidades estudadas do Amapá apresentam significativo potencial para aproveitamento fotovoltaico durante todo o ano. Este potencial sugere uma viabilidade estratégica de instalação de sistemas fotovoltaicos, tanto em sistemas urbanos consolidados quanto em comunidades remotas para geração de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Energia Fotovoltaica, Radiação Solar Global, PCD's.

**ABSTRACT:** VARIATION OF THE SOLAR RADIATION OVER THE AMAPA STATE: A CASE STUDY ON MACAPA, PACUI, SERRA DO NAVIO AND OIAPOQUE DURING THE PERIOD FROM 2006 TO 2008

The objective of this study was to estimate the potential of solar energy through the variation of the global solar radiation (GSR) in the State of Amapá during two season's cycle (2006 to 2008). GSR historical time series were used from four collection data platforms (PCD's) distributed in a central area of the state. The results indicated that the distribution of RSG showed annual peak of about 4900Wh.m<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup> on the Macapá station, due to its proximity to the equator line. At Serra do Navio, Pacuí and Oiaoque cities the values observed were 4000, 4400 and 3800Wh.m<sup>-2</sup>.day<sup>-1</sup>, respectively. We conclude that the studied sites in Amapá State have significant potential for photovoltaic use during a complete annual cycle. The potential for generating electricity proved to be attractive, both for use in traditional urban systems and in isolated systems in remote communities.

**Keywords:** Photovoltaics Energy, Solar Radiation, Potential, PCD's.

### 1. INTRODUÇÃO

Durante todo o século XX a significativa oferta de energia obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis, como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial, com notáveis prejuízos ambientais, em especial contribuindo com a emissão de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa. Entretanto, nos primeiros anos do século XXI percebeu-se a necessidade de

modelos de desenvolvimento sustentáveis de geração de energia (ANEEL, 2009).

Di Lascio e Barreto (2009) asseveram que, na Amazônia, o potencial fotovoltaico disponível é alto, mas o custo elevado dessa tecnologia limita a dimensão da potência instalada, que na prática inviabiliza o uso no beneficiamento da produção, limitando seu uso para moradias isoladas e pequenas aplicações comunitárias. Além disso, segundo os mesmos autores, em razão da significativa extensão territorial e dificuldade de

acesso, somente em alguns poucos locais são encontrados dados consistentes sobre parâmetros meteorológicos. Tal deficiência de informações, que inclui a falta de dados sobre radiação solar na superfície, torna impreciso o planejamento dos sistemas fotovoltaicos, principalmente do conjunto painel-bateria, cuja consequência principal é a necessidade frequente de uso de baterias solicitadas nestes sistemas que entram em pane em prazos menores do que sua vida útil.

Contudo, o acesso à eletricidade é uma das soluções para o desenvolvimento humano, proporcionando iluminação, aquecimento, força motriz para usos produtivos e bem-estar social, especialmente para as áreas rurais (Di Lascio e Barreto, 2009). Somente no Brasil há um contingente de 12 milhões de pessoas sem energia em seus lares. E, para auxiliar na solução desse problema, especialmente na Amazônia, as microcentrais ou picocentrais elétricas descentralizadas se constituem em interessante alternativa econômica à extensão de rede, sendo consideradas fontes renováveis e menos poluentes (MME, 2007).

Como no restante da Amazônia, no Estado do Amapá também há localidades remotas sem acesso à energia elétrica, simplesmente porque não há “viabilidade” econômica de instalação de redes convencionais em regiões remotas, que atendam ao homem do campo. Este problema tem sido um dos principais fatores impeditivos para o desenvolvimento e a fixação do homem rural no campo. Seu desenvolvimento evitaria ou mitigaria o êxodo rural indesejado para os grandes centros urbanos. Com a crescente demanda por energias renováveis, em virtude da necessidade vital de melhoria da qualidade ambiental, o Brasil, inserto em grande extensão intertropical pode dispor de aproveitamento de energia solar durante o ano todo. Portanto, desperta para a “criação” de suporte técnico e científico para esta modalidade de energia com reconhecido poder de crescimento (Victoria, 2008).

Dados do Atlas de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), desenvolvido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), revelam que 40 % da população, residente no campo no Estado do Amapá, possui acesso à eletrificação rural. Para suprir demanda dos que não dispõem desse benefício, por outro lado, o Amapá conta com significativa incidência de radiação solar em sua extensão territorial, o que representa uma oportunidade de crescimento e emprego da tecnologia fotovoltaica<sup>1</sup> a partir da geração de energia elétrica (Marques et al., 2007).

Mas os desafios tecnológicos são enormes. Por exemplo, do ponto de vista histórico, o processo de estudo e caracterização do potencial solar no Estado foi interrompido por mais de duas décadas. As razões principais foram as seguidas interrupções das séries históricas monitoradas, as quais datam de 1969 a

1974 e de 1982 a 1983. E estas bases integram o cerne do Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba, 2000). Naqueles casos, o equipamento de medida da radiação foi o actinógrafo bimetálico do tipo *Robitzsch-Fuess*, com 15 a 20% de erro. Com base nestas informações, o presente trabalho tem por objetivo retomar estudos sobre radiação solar global ( $R_{SG}$ ) no Amapá, por meio de equipamentos mais precisos e em quatro diferentes localidades do Estado.

O levantamento do potencial de energia solar para fins de estudos de distribuição geográfica da radiação global no Brasil é realizado de várias maneiras, dentre as quais podem ser citadas: os instrumentos de medida, modelos e mapeamento por satélite. O emprego de equipamentos mais precisos, baseados no efeito termoelétrico, bem como de sensores de estações automatizadas (PCDs) é ainda incipiente para atender às necessidades de todo território nacional. Os actinógrafos apresentam limitações quanto à sua precisão, especialmente em dias com elevado grau de nebulosidade, estando condicionados a calibrações periódicas, as quais nem sempre são realizadas elevando as incertezas de parâmetros de projeto (Marques et al., 2007). Atualmente, têm sido normalmente utilizadas ferramentas de sensoriamento remoto para a estimativa de radiação, principalmente, pela falta de instrumentos de medida em superfície de locais remotos como na Amazônia.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização histórica da radiação solar global ( $R_{SG}$ ) no estado Amapá

No Estado do Amapá, durante os anos de 1969-1974 e de 1982-1983, medidas de radiação solar global e insolação foram realizadas somente no município de Macapá. Neste caso, foram utilizadas estações meteorológicas convencionais de superfície e tendo como sensor de quantificação o actinógrafo bimetálico do tipo *Robitzsch-Fuess* (radiação solar) e heliógrafo (insolação). Desde então não houve novas atualizações no processo de monitoramento sistemático destas variáveis.

A geração da variabilidade temporal da  $R_{SG}$  foi utilizada na proposição de dimensionamento e implantação de sistemas fotovoltaicos em localidades desprovidas de energia elétrica, em especial as rurais e remotas.

Os registros das coletas de informações que compõem o Atlas Solarimétrico do Brasil foi elaborado pelo Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco (Figura 1). Este atlas é composto por um banco de dados, que por seu turno compõe a história do recurso solar brasileiro, bem como os instrumentos que foram utilizados para quantificação da referida variável, tais como heliógrafos, actinógrafos e piranômetros.

1. Conversão direta da energia solar (luz) em energia elétrica

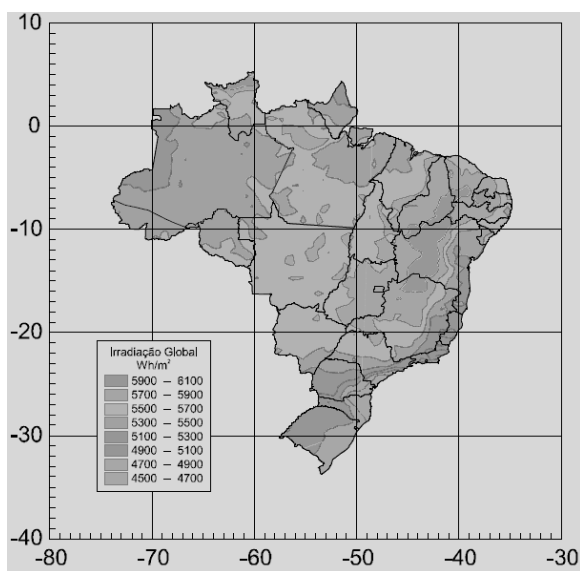


Figura 1 - Distribuição Irradiação Global, Atlas Solarimétrico do Brasil.

## 2.2 Séries atuais (2006 a 2008) obtidas de Plataformas Automáticas de Coletas de Dados (PCDs)

Para o estudo de caracterização da radiação solar no Estado, utilizou-se como instrumento solarimétrico o piranômetro fotovoltaico, sensores de radiação de solar global ( $R_{SG}$ ). Este sensor está instalado em quatro PCDs heterogeneamente distribuídas no Estado do Amapá (Figura 2a). Os sensores de radiação das PCDs são equipamentos mais precisos e modernos destinados ao monitoramento contínuo de variáveis meteorológicas, a partir do ambiente onde estão instaladas. São úteis para obter informações em sítios remotos ou dispersos em uma região muito ampla (Cunha et al., 2010).

A rede de PCDs tem sido expandida no Estado do Amapá desde o advento do Programa de Monitoramento do Tempo, Clima e Recursos Hídricos (PMTCRH) do Ministério da Ciência e Tecnologia, e são utilizadas principalmente para a previsão do tempo (Cunha et al., 2010). Os dados são coletados e automaticamente enviados via satélite ao Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Posteriormente esses dados são disponibilizados via *internet* (FTP<sup>2</sup>) e distribuídos aos usuários que acessam a rede nacional. No estado do Amapá o NHMET<sup>3</sup>/IEPA<sup>4</sup> é o órgão responsável pelo apoio e gestão das PCDs.

Na Figura 2a é apresentado um mapa com destaque à distribuição das PCDs existentes no Estado do Amapá,

2. File Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Arquivos)

3. Núcleo de Hidrometeorologia e Energias Renováveis

4. Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas do Estado do Amapá

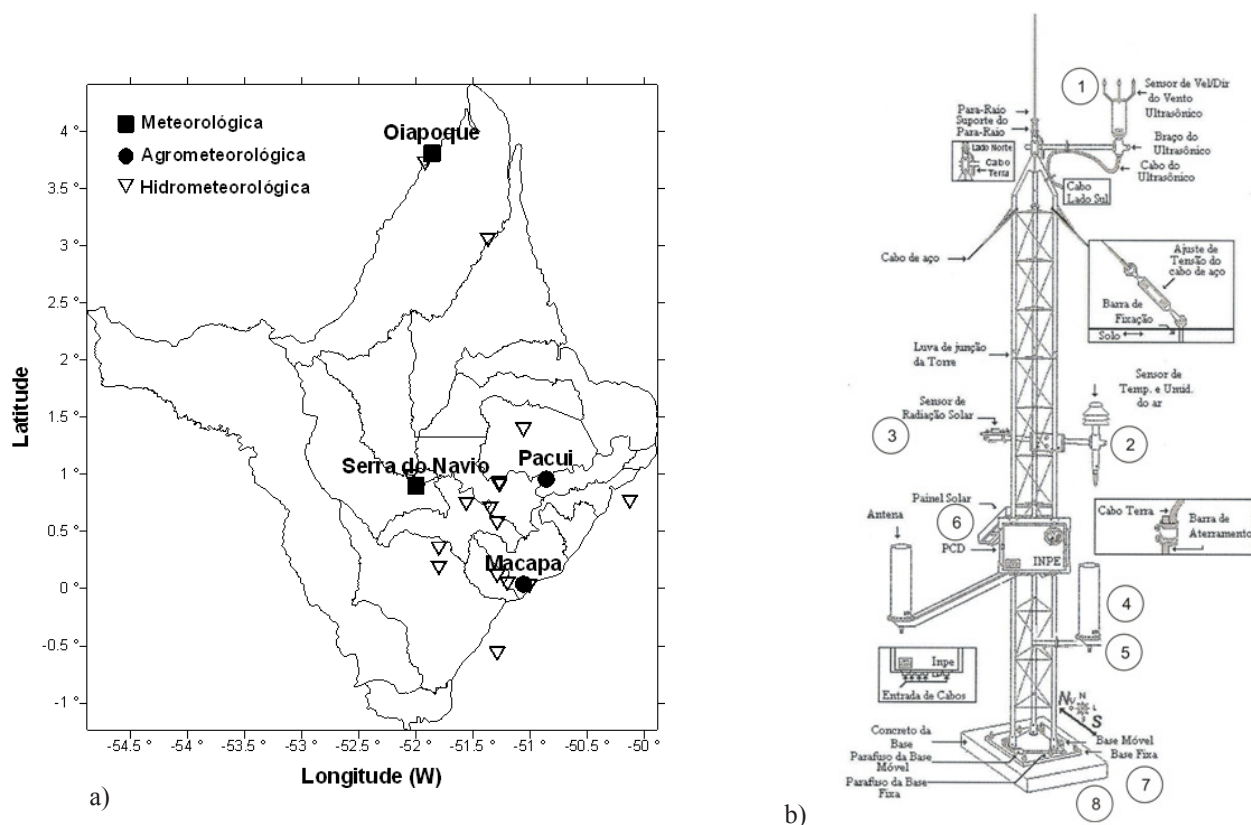
sendo três as categorias classificadas pelos sistemas de sensores: 1) Hidrometeorológica; 2) Meteorológicas e 3) Agrometeorológicas. Na Figura 2b é ilustrada uma PCD com seus respectivos sensores. Observe que os sensores são normalmente empregados no monitoramento das variáveis meteorológicas, como a radiação global. Na Tabela 1 são apresentadas as coordenadas geográficas e o tipo de estação instalada na respectiva localidade de estudo.

Os principais sensores e parâmetros meteorológicos monitorados pelas estações estão listados na Tabela 2. No entanto, as estações automáticas possuem um total de vinte e sete parâmetros monitorados (inclusive dados do circuito interno do *Data Logger*). Destaque é dado somente à variável que atenda aos objetivos do estudo, como a radiação global. Nas Figuras 3a-3d são apresentadas fotos das PCDs instaladas em cada município de estudo.

No presente estudo foram utilizados valores de radiação solar de coletas diárias realizadas nos períodos: 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2006, 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2007 e 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2008. Ressalta-se que os dados de temperatura e umidade relativa do ar também foram coletados. Estes parâmetros influenciam na conversão direta da energia fotovoltaica em energia elétrica.

Os dados são enviados por meio de telemetria ao CPTEC/INPE e disponibilizados na via *internet* ou a partir de contas exclusivas FTP para os usuários cadastrados. Neste sistema é utilizado como meio de comunicação o sistema SCD (Sistema de Coleta de Dados). Trata-se, neste caso, de uma rede de satélites do tipo SCD1, SCD2 e CBERS2. Para manter a confiabilidade dos dados é necessária a manutenção preventiva e/ou corretiva das PCDs, abrangendo desde uma simples limpeza periódica dos sensores até a troca de algum deles. No processo de manutenção, é realizada também uma verificação e possíveis retificações de sensores, bem como das conexões dos cabos e local onde está instalada a PCD. Para tanto, visitas locais são recomendadas para manter o bom funcionamento das mesmas (Cunha et al., 2010). Durante a execução do estudo (2006 a 2008) realizou-se manutenção nas estações de Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque. Manutenção realizada em Pacuí (27 de julho de 2007), Macapá (16 de agosto de 2007), Serra do Navio (22 de julho de 2007) e Oiapoque (16 de junho de 2008) (Figura 4).

Em julho do ano de 2007 constatou-se que a estação de Serra do Navio sofreu interrupção e cessão de envio dos dados ao CPTEC/INPE. Durante a manutenção realizada em junho de 2008 foi observado que os sensores tinham sido danificados pela ação do tempo e vandalismo. Deste modo, não foi possível realizar a atualização da série histórica do ano de 2007. Esta estação retornou a operar somente no segundo semestre de 2009, após manutenção corretiva.



**Figura 2** –(a) Distribuição heterogênea das PCDs no Estado do Amapá. (b) Ilustração de uma PCD do tipo agrometeorológica. Fonte: CPTEC-INPE, 2009 e NHMET, 2008.

**Tabela 1** - Coordenadas geográficas, das PCDs dotadas de sensores de radiação solar global.

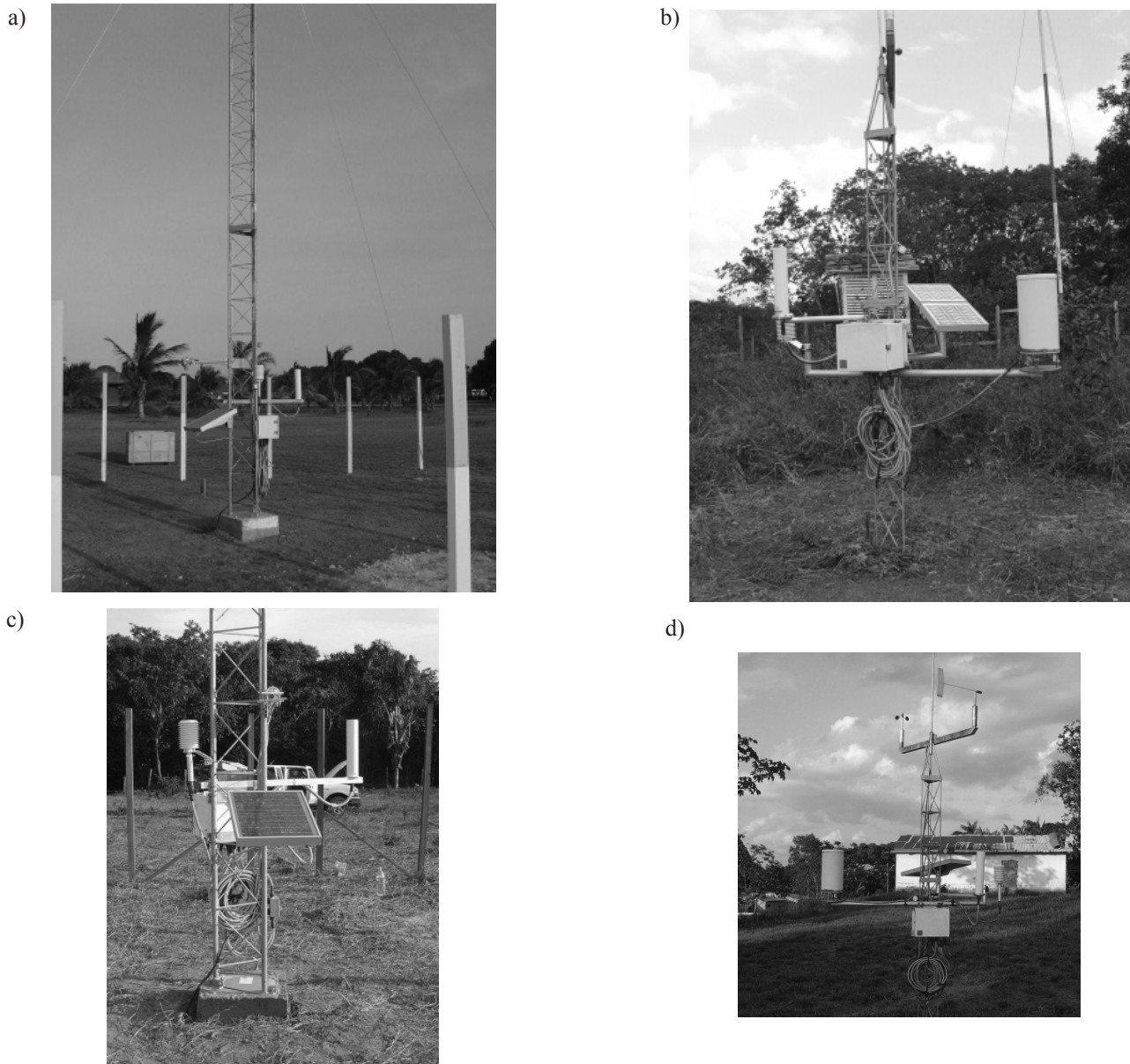
Localidade	Coordenadas Geográficas	Tipo de PCD
Macapá	Latitude 0,04°; Longitude 51,06°; altitude 16m	Agrometeorológica
Pacuí (distrito de Macapá)	Latitude 0,96°; Longitude 50,86°; altitude 17 m	Agrometeorológica
Serra do Navio*	Latitude 09,0°; Longitude 52,00°; altitude 91m	Meteorológica
Oiapoque	Latitude 3,81°; Longitude 51,86°; altitude 152m	Meteorológica

\* Desativada. Fonte: NHMET, 2008.

**Tabela 2** - Principais sensores das PCDs meteorológicas e agrometeorológicas.

N.º	Sensor	Parâmetro	Unidade
1.	Ultrasônico de vento	Velocidade do vento	m/s
2.	Temperatura e Umidade Relativa do Ar	Temperatura do ar	°C
		Umidade Relativa do ar	%
3.	Sensor de Radiação Solar Global	Radiação Solar Global	MJ/m <sup>2</sup>
4.	Precipitação ou Pluviômetro	Precipitação (chuva)	mm
5.	Pressão Atmosférica	Pressão atmosférica ou barométrica.	mB
6.	Radiação Total Líquida	Radiação Total Líquida	W/m <sup>2</sup>
7.	Temperatura do Solo*	Temperatura do solo a 10 e 20 cm	°C
8.	Fluxo de Calor no Solo*	Fluxo de calor no solo	W/m <sup>2</sup>

\* Parâmetros coletados pelas PCDs Agrometeorológicas. Fonte: CPTEC-INPE, 2009.



**Figura 3** – (a) PCD Agrometeorológica de Macapá, (b) PCD Agrometeorológica de Pacuí. (c) PCD Meteorológica de Serra do Navio, (d) PCD Meteorológica de Oiapoque.

Fonte: NHMET, 2008.

No período de março a junho de 2008, a estação de Oiapoque, também deixou de funcionar devido a problemas na transmissão telemétrica dos dados coletados. No entanto, também voltou a enviar dados após manutenção corretiva.

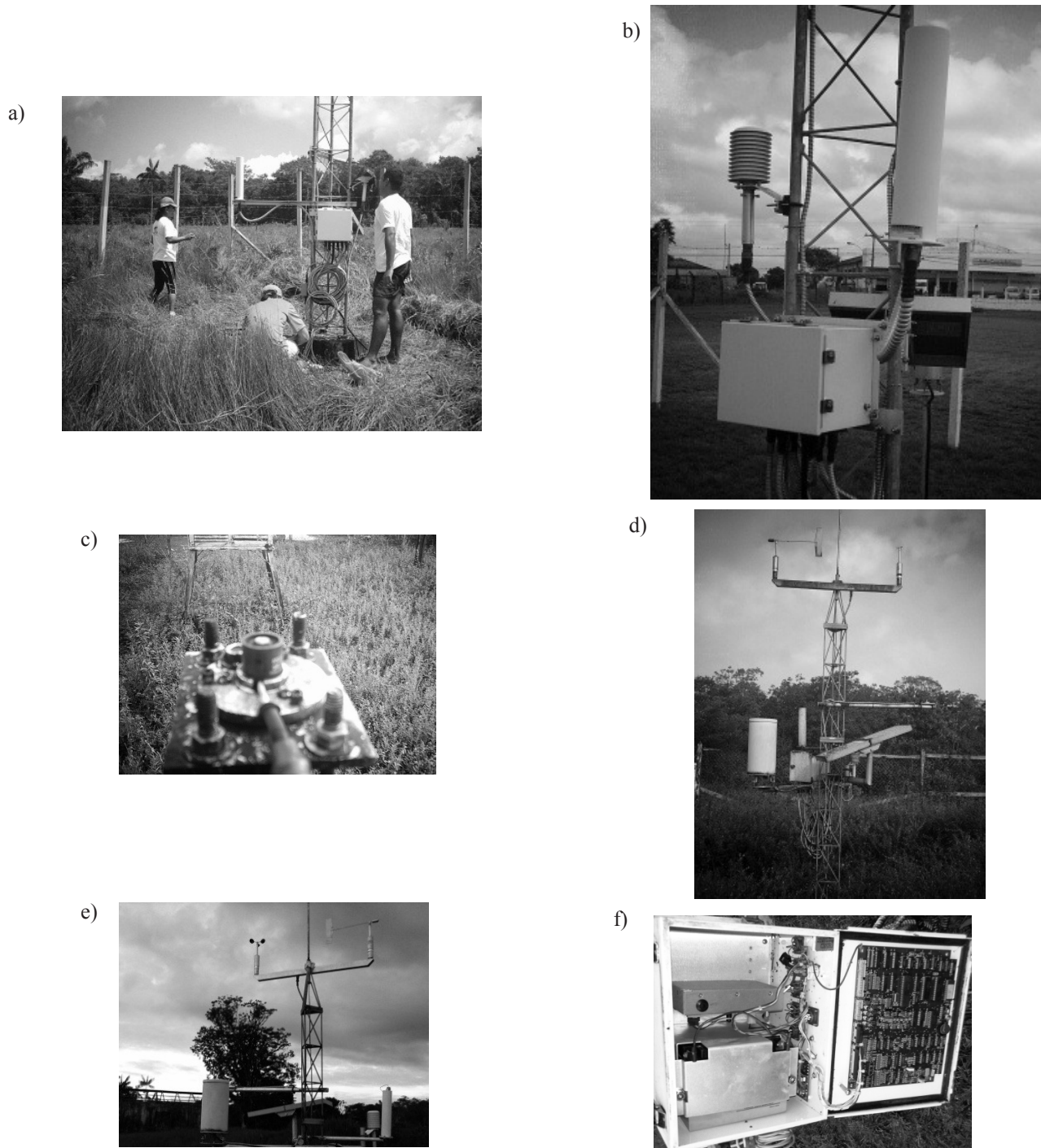
### 2.3 Tratamento dos dados

Antes da utilização dos dados foi realizada uma verificação qualitativa dos mesmos com o objetivo de verificar possíveis falhas de leituras nos sensores das PCDs e obter consistência nos valores medidos. Por exemplo,

valores negativos de radiação solar são descartados e leituras em horário que não há incidência de luz solar, também são descartadas.

Tendo em vista o elevado número de informações foi necessária a confecção de tabelas de cálculo em planilhas eletrônicas, as quais fornecem a saída dados de radiação solar na forma de valores diários e médias mensais e anuais (Tabelas 3, 4 e 5).

Por conveniência converteu-se as unidades de radiação solar em MJ/m<sup>2</sup> para Wh/m<sup>2</sup>. Na Figura 5 são apresentados graficamente esses mesmos dados para facilitar a visualização.



**Figura 4** – Manutenção em: (a) Estado atual Pacuí; (b) Estado atual Macapá; (c) Estado atual e (d) Sensor de radiação solar global, Serra do Navio; (e) Sensores e (f) Datalogger, Oiapoque.  
Fonte: NHMET, 2008.

**Tabela 3** - Variabilidade mensal da radiação diária sobre o Estado do Amapá no ano de 2006.

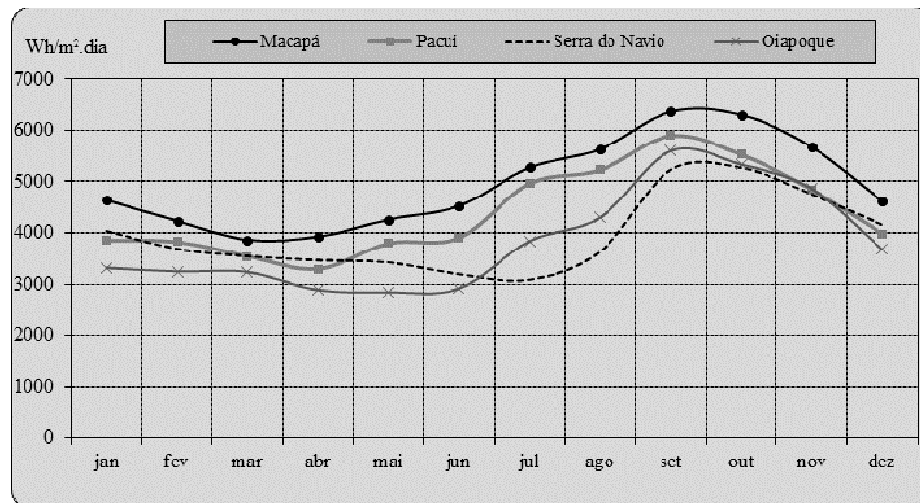
Estação/Radiação Wh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Macapá	4700	4000	4000	3600	4200	4100	5000	4800	6200	6200	5200	4700	4725
Pacuí	3700	3500	3600	3200	3900	3400	4700	4300	6000	5500	4500	4100	4200
Serra do Navio	4200	3900	4100	4000	3900	3500	4000	3600	5200	5300	4800	4200	4225
Oiapoque	3200	3700	4100	3600	3500	3700	4200	3600	5700	5200	4600	3600	4058
Média Mensal	3950	3775	3950	3600	3875	3675	4475	4075	5775	5550	4775	4150	4302

**Tabela 4** - Variabilidade mensal da radiação sobre o Estado do Amapá no ano de 2007.

Estação/Radiação Wh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Macapá	5100	4400	3900	4000	4600	5000	5400	5900	6300	6100	5800	4200	5058
Pacuí	4200	3900	3200	3300	3900	4300	5500	5500	6000	5500	5000	4000	4525
Serra do Navio	3900	3400	3000	2900	3000	2900	2200	-	-	-	-	-	3043
Oiapoque	3000	3300	2300	2200	2100	2100	2400	3400	5100	4700	4400	3400	3200
Média Mensal	4050	3750	3100	3100	3400	3575	3875	4933	5800	5433	5067	3867	3957

**Tabela 5** - Variabilidade mensal da radiação sobre o Estado do Amapá no ano de 2008.

Estação/Radiação Wh.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Macapá	4100	4300	3700	4100	3900	4500	5400	6300	6600	6600	6000	5000	5042
Pacuí	3600	4000	3800	3400	3600	4100	4700	5800	5700	5600	5000	3900	4433
Serra do Navio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oiapoque	3700	2800	3300	-	-	-	4900	5900	6000	6100	5600	4000	4700
Média Mensal	3800	3700	3600	3750	3750	4300	5000	6000	6100	6100	5533	4300	4738



**Figura 5** - Valores diários mensais entre 2006 e 2008.

Como resultado, mapas com isolinhas espaciais de radiação solar (Wh/m<sup>2</sup>.dia), mensais e anuais, foram confeccionados através do *Software* SUFER, versão 7.02. Esta versão utiliza o método do inverso ponderado da distância de interpolação espacial. A área retangular hachuriada indica o perímetro onde foram realizadas a coletas de dados.

### 2.4 Exemplo simplificado de dimensionamento de sistema fotovoltaico

Em um exemplo prático, o cálculo para estimativa da energia produzida em um sistema fotovoltaico foi realizado com base nos dados coletados pelas estações estudadas. Optou-se

por realizar as estimativas apenas para o ano de 2006, pois foi o período total em que os dados completos foram obtidos sem interrupções para todas as localidades.

Em posse dos dados, registrou-se o mês considerado extremo (“pior caso”). Ou seja, menores valores observados para cada localidade. No dimensionamento de um gerador fotovoltaico deve-se considerar a condição da potência nominal necessária ou desejada. Outro fator importante é o cálculo do número de módulos fotovoltaicos ( $N$ ), necessários para atender a potência nominal do gerador previamente calculada ou estipulada. O cálculo leva em conta a potência nominal total da instalação fotovoltaica ( $P_t$ ), em  $W_p$  (Watt pico), e a potência nominal de cada painel ( $P_p$ ), também em  $W_p$ , pela Equação 1:

$$N = \frac{P_t}{P_p} \quad (1)$$

Calculou-se a somatória dos valores diários mensais da componente  $R_{SG}$ , conforme a Tabela 6. A partir deste parâmetro determinou-se o número de horas de sol pleno (SP), o qual tem unidade de número de horas de insolação útil. Esta grandeza reflete a quantidade de horas em que a energia solar irradiada permanece constante em  $1.000 \text{ W/m}^2$  (GTES, 1999), conforme a Equação 2:

$$SP = \frac{R_{SG}}{1000} \quad (2)$$

onde:  $R_{SG}$ : Radiação solar diária ( $\text{kWh.m}^{-2}$ )

A energia gerada pode ser calculada a partir da Equação 3:

$$E_g = P_t \cdot SP \cdot \eta \quad (3)$$

onde:  $P_t$ : Potência nominal do painel;  $\eta$ : rendimento do inversor CC-CA (corrente contínua - corrente alternada). Considerou-se um rendimento para o inversor da ordem de 93%.

Neste dimensionamento foi utilizado como exemplo o painel fotovoltaico com potência nominal de  $54 W_p$ , modelo KC-50T da fabricante KYOCERA, resultando na necessidade de utilização de um arranjo com 40 módulos fotovoltaicos para o atendimento da potência nominal total fixada em  $2,16 \text{ kW}_p$ .

Não foram inclusos os valores de custos dos componentes e materiais (módulos fotovoltaicos, inversores, cabos, etc.), pois não é o objetivo deste trabalho.

### 3. DISCUSSÃO E RESULTADOS

Na distribuição temporal de  $R_{SG}$  foram obtidos valores significativos suficientes para utilizar sistemas fotovoltaicos como fonte alternativa de energia em comunidade remotas sobre o Amapá. Na Tabela 3, verifica-se o saldo de radiação para o ano de 2006. Percebe-se que os valores entre  $3200$  a  $6200 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  estão em conformidade e consistência com os do Atlas Solarimétrico no Estado. Em média anual, a estação de Macapá apresentou o maior saldo de  $R_{SG}$ , com  $4.725 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , devido sua localização geográfica ser mais próxima da linha Equador (Latitude zero) do que as demais estações estudadas. Verificou-se que a estação de Oiapoque registrou menor saldo de radiação anual, com  $3.200 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Mas não houve registro de setembro a dezembro (período de maior incidência solar sobre a região). Contudo, segundo Marques et al. (2007), não houve diferenças estatísticas significativas entre tais médias (ANOVA com Fator Único, com  $p < 0,05$ ).

Vale ressaltar que na região de Oiapoque, próximo ao litoral no extremo norte do Estado, há o sistema de brisa marítima durante o dia, que transporta umidade para aquela região. Normalmente, esta umidade ascende e forma nuvens que inibem a incidência de radiação do solo devido à reflexão difusa sobre as nuvens. Este comportamento, também, foi observado em 2007, como verificado na Tabela 4.

Verificou-se que o saldo de radiação, para o ano de 2007, variou entre  $2.100$  a  $6.300 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , novamente, corroborando com os dados do Atlas Solarimétrico sobre o Amapá. Na média anual, a estação de Macapá apresentou o maior saldo de  $R_{SG}$  com  $6.300 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , enquanto que Oiapoque registrou o menor valor com  $2.100 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Em 2007 foi observada a maior amplitude do saldo de radiação (diferença entre o máximo e o mínimo). A estação de Macapá manteve-se com maior média anual com  $5.058 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Serra do Navio mostrou a menor média anual com  $3.043 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , porém não houve medição nos meses de agosto a dezembro (período de maior incidência de radiação). A falta de medidas neste período foi devido aos problemas de manutenção de rotina causada por defeito no registro, persistido durante o ano de 2008 (Tabela 5).

No ano de 2008 verificou-se o maior registro de saldo de radiação entre os anos estudados (2006, 2007 e 2008) com

**Tabela 6** - Produzida mensalmente e anualmente pelo gerador fotovoltaico par o ano de 2006.

Localidade	Mês	Dias	$\sum R_{SG}$ $\text{kWh.m}^{-2}\text{mês}^{-1}$	Horas de sol pleno	$E_g$ $\text{kWh.mês}^{-1}$
Macapá	Abril	30	107,6	3,6	216,1
Pacuí	Abril	30	96,1	3,2	193,0
Serra do Navio	Junho	30	104,0	3,5	209,0
Oiapoque	Janeiro	31	100,8	3,2	201,3



valor da ordem de  $6.600 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  em Macapá, nos meses de setembro e outubro, período considerado menos chuvoso ou de verão na região. Também, Oiapoque apresentou problemas de registro de dados. Contudo, foi resolvido. Mas, diferentemente, a PCD de Serra do Navio se manteve desativada. Na média anual, Macapá apenas confirmou ser a região que apresenta maior saldo de radiação durante o ano (nos anos monitorados), com média de  $5.042 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , porém foi na estação de Pacuí que foi registrado o menor valor de radiação, com  $4.433 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

As variações experimentais podem ser observadas nos mapas confeccionados e apresentados pelas Figuras 6a-6c. Nas figuras são apresentadas as distribuições da RSG para os meses de janeiro, fevereiro e março. Nas Figuras 7a-7c são apresentadas as distribuições da RSG para os meses de abril, maio e junho. Do mesmo modo, nas Figuras 8a-8c são mostradas as distribuições da RSG para os meses de julho,

agosto, setembro. Nas Figuras 9a-9c são também apresentadas às distribuições da RSG para os meses de outubro, novembro e dezembro. Após verificar a variabilidade mensal de radiação, observa-se na Figura 10 o acumulado anual, no qual se percebe maiores valores no entorno de Macapá devido à proximidade com o Equador, onde a incidência de radiação solar é máxima. Mas, vale ressaltar que a radiação no extremo norte do Estado é significativa, sendo uma região com potencial solar para geração de energias renováveis.

Em relação ao número de horas de sol pleno, nos casos mais extremos em cada localidade, apresentam-se valores superiores a 3 horas, como apresentados na Tabela 6. Assim, a energia gerada para o arranjo escolhido tem seu maior valor para Macapá com  $216,1 \text{ kWh.mês}^{-1}$ , e o menor valor seria para Pacuí com  $193,0 \text{ kWh.mês}^{-1}$ . Nas Tabela 7 e 8 é apresentado o número de horas de sol pleno (HSP) e a energia gerada (Eg),

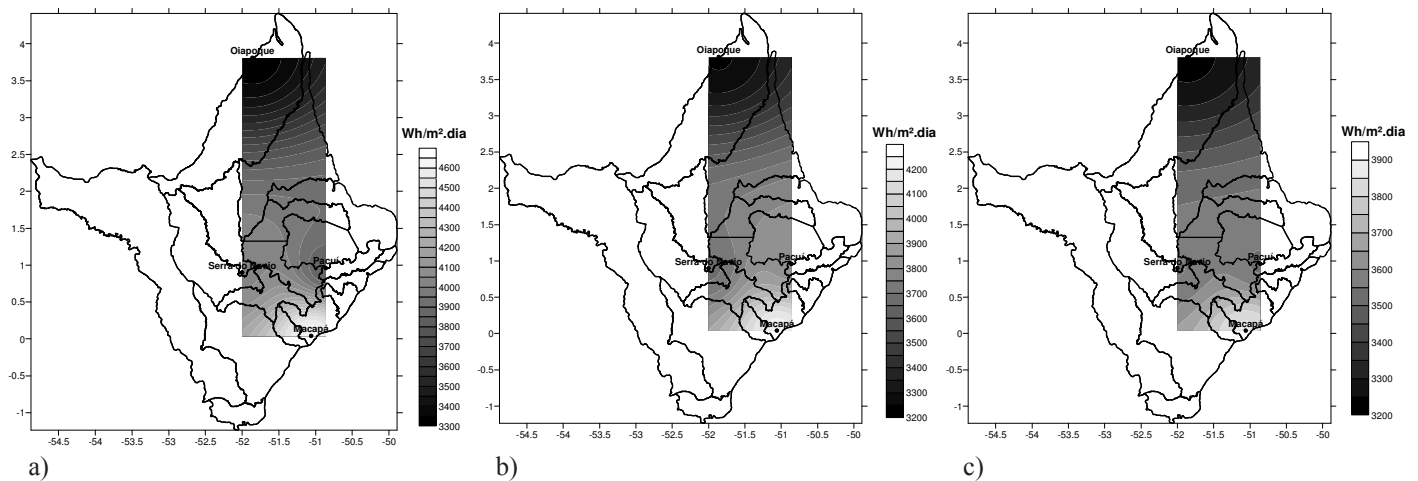


Figura 6 - Radiação solar diária, média mensal, mês: (a) janeiro; (b) fevereiro e (c) março.

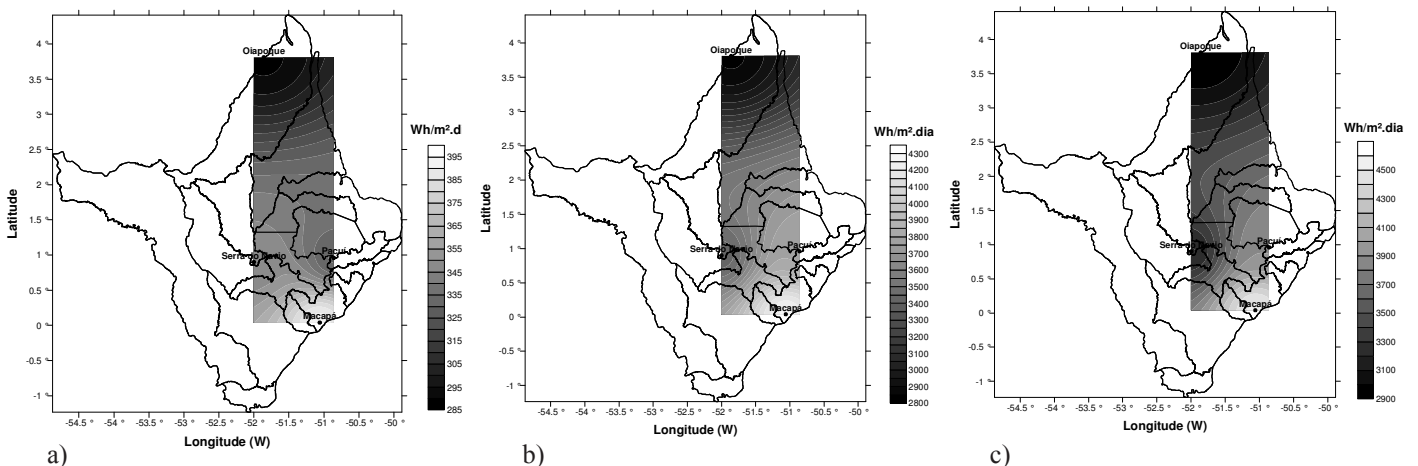


Figura 7 - Radiação solar diária, média mensal, meses: (a) abril, (b) maio e (c) junho.

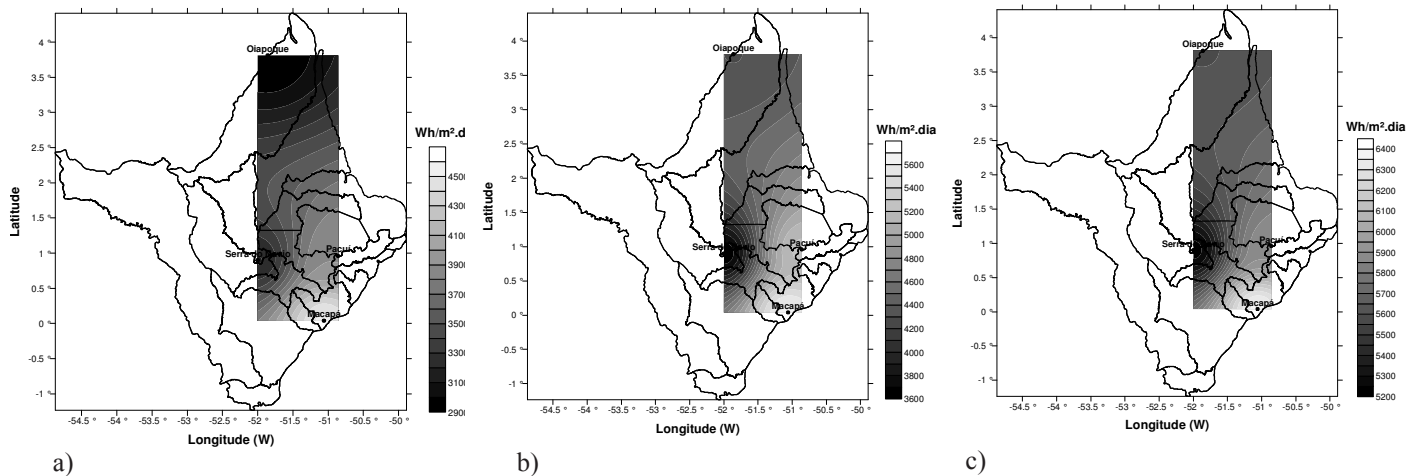


Figura 8 - Radiação solar diária, média mensal, meses: (a) julho (b) agosto e (c) setembro.

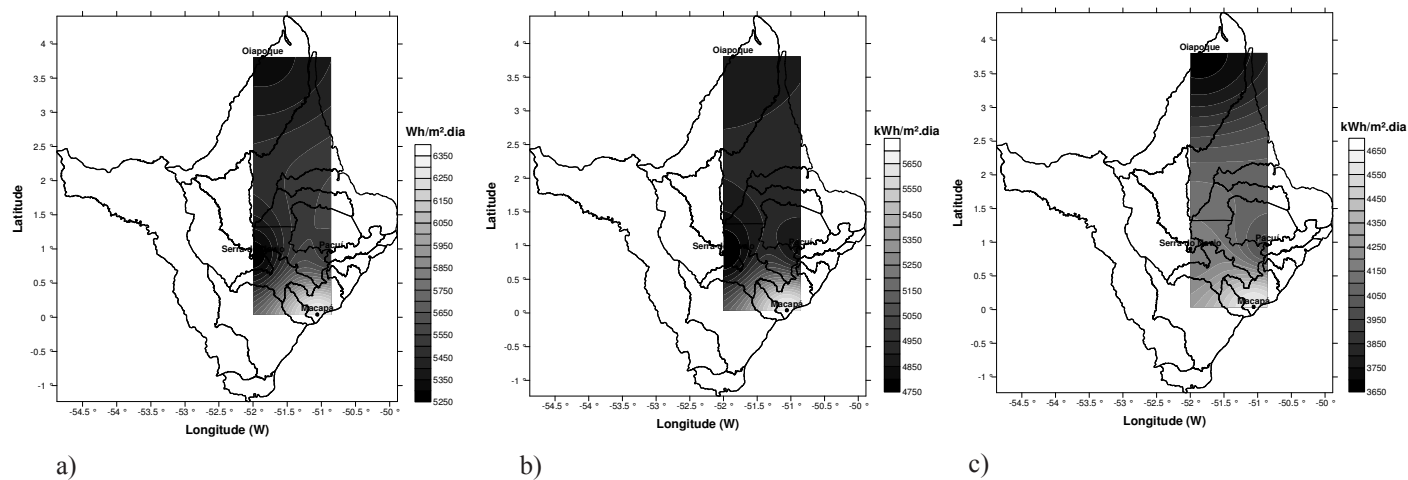


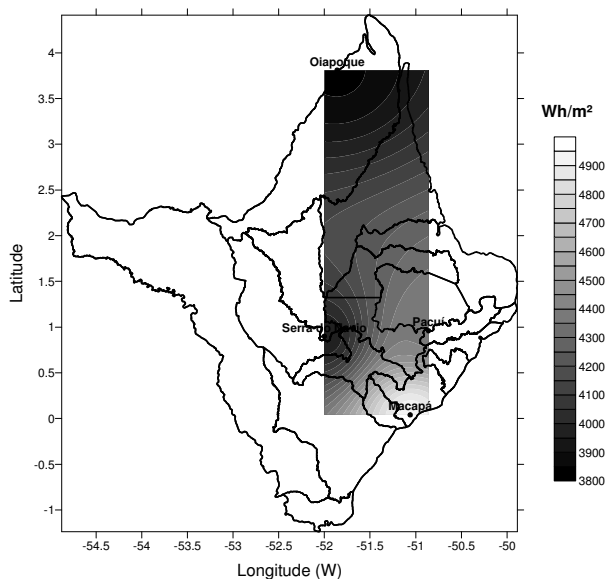
Figura 9 - Radiação solar diária, média mensal, meses: (a) outubro (b) novembro e (c) dezembro.

Tabela 7 - Número de Horas de Sol Pleno (HSP) para o ano de 2006.

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Macapá	4,7	4,0	4,0	3,6	4,2	4,1	5,0	4,8	6,2	6,2	5,2	4,7	4,7
Pacuí	3,7	3,5	3,6	3,2	3,9	3,4	4,7	4,3	6,0	5,5	4,5	4,1	4,2
Serra do Navio	4,2	3,9	4,1	4,0	3,9	3,5	4,0	3,6	5,2	5,3	4,8	4,2	4,2
Oiapoque	3,2	3,7	4,1	3,6	3,5	3,7	4,2	3,6	5,7	5,2	4,6	3,6	4,1

Tabela 8 - Energia Gerada (Eg) em kWh.mês<sup>-1</sup> para o ano de 2006.

Localidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
Macapá	292,8	225,5	248,3	216,1	263,9	245,6	310,3	296,6	374,9	387,7	314,1	289,9	288,8
Pacuí	232,0	198,9	226,4	193,0	241,6	203,1	293,1	268,3	358,8	341,5	273,0	252,4	256,8
Serra do Navio	262,1	221,6	254,0	240,5	239,8	209,0	249,5	226,5	315,0	328,1	286,3	258,7	257,6
Oiapoque	201,3	208,1	256,6	214,5	219,9	222,1	263,7	224,6	344,5	322,4	276,2	224,2	248,2



**Figura 10** - Radiação solar diária, média anual.

respectivamente, para cada localidade. Macapá apresentou valores máximos de HSP de 6,2 nos meses de setembro e outubro e energia gerada de máxima de 387,7 kWh no mês de outubro. Na estação do Oiapoque o número de horas de sol pleno de 5,7 atingiu o valor de energia gerada, em setembro, um valor de 344,5 kWh.

#### 4. CONCLUSÃO

Foi realizada uma caracterização da radiação solar ( $R_{SG}$ ) no Estado do Amapá por meio da análise de série de dados obtidos de PCDs localizadas nos municípios do Estado de Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque.

O resultado final foi a geração de mapas de isolinhas para a variável meteorológica  $R_{SG}$ . Os mapas de isolinhas de  $R_{SG}$  mostraram variações em média entre 2.800 e 6.400  $Wh.m^{-2}.dia^{-1}$ , convergindo com coerência aos dados apresentados no Atlas Solarimétrico do Brasil. Neste caso, foi constatado um período mínimo nos meses de abril-maio-junho (Figuras 7a-7c), onde as PCDs registraram intensidades de radiação na faixa de 2.800 a 4.500  $Wh.m^{-2}.dia^{-1}$ .

As máximas ocorreram no segundo semestre do ano, no período de agosto a outubro (Figuras 8b, 8c e 9a), de modo que os valores observados estavam na faixa de 3.600 a 6.400  $Wh.m^{-2}.dia^{-1}$ . No entanto, nos meses novembro e dezembro indicado pelas Figuras 9b e 9c houve uma tendência de queda para todas as regiões estudadas.

Todavia, os índices mais baixos de  $R_{SG}$  foram verificados na região de Oiapoque, acusando valores na faixa de 2.800 a 5.600  $Wh.m^{-2}.dia^{-1}$ . Mas os índices elevados foram registrados na região de Macapá, entre 3.900 e 6.400  $Wh.m^{-2}.dia^{-1}$ .

A limitação do número de PCDs disponíveis no Estado impediu a caracterização da radiação solar em toda sua extensão territorial. Por prudência científica também não se extrapolou, com maior exatidão, as informações aqui geradas para outras regiões do próprio Estado do Amapá. Nestes casos, percebe-se a real necessidade de expansão da rede de observação de superfície (PCDs) com o objetivo de atender às demandas e necessidades de avaliação do potencial solar em outras áreas do Estado.

Por outro lado, esta fase inicial do estudo desta natureza no Amapá é da mais alta relevância, porque se refere às características básicas de variação de parâmetros necessários ao dimensionamento de sistemas solar fotovoltaicos para geração de energia elétrica, com destaque às áreas rurais remotas sem quaisquer condições de receber um sistema de energização convencional.

O potencial identificado, tanto pelos registros das PCDs quanto pelo Atlas Solarimétrico, indicam que a energia fotovoltaica poderia ser uma ótima alternativa para tais comunidades.

A metodologia aqui empregada, apesar de sua simplicidade, atendeu aos objetivos iniciais do trabalho, os quais poderão ser consolidados em sua nova expansão e aprofundamento em pesquisas posteriores da área. Neste aspecto, procurou-se resgatar informações importantes concernentes a todo o processo de caracterização da radiação solar paralisado e esquecido no estado do Amapá.

Assim, seria prudente e necessário que este tipo de estudo mantivesse sua continuidade para o benefício de comunidades carentes de energia. As análises dos parâmetros físicos, ora estudados com maior profundidade, são bons e consistentes indicadores do potencial de geração de energia fotovoltaica no estado do Amapá.

Um exemplo foi apresentado para avaliar o dimensionamento de um sistema fotovoltaico isolado no Estado. Os valores médios anuais foram significativo, entre 256,8 e 288,8 kWh. Desta forma, é necessário que as políticas públicas do setor estejam mais consistentes na condução do processo de universalização do uso da energia para o desenvolvimento local.

Finalmente, conclui-se que são também necessárias atuações governamentais de apoio efetivo ao setor, tais como: a) melhoria e expansão das PCDs em outras áreas do estado, para melhor avaliar o potencial solar; e b) políticas públicas mais contundentes no apoio à instalação, manutenção e expansão de sistemas de redes isoladas, que possam utilizar os sistemas de geração de energia renovável, principalmente os sistemas fotovoltaicos.

Em síntese, o esforço científico em torno de pesquisa e desenvolvimento de uso da energia renovável no estado, carece de mais investimento na sua base. Isto é, no diagnóstico que

transcende a política energética. A expansão e manutenção de redes de observação é o princípio fundamental, a partir do qual a expansão de sistemas fotovoltaicos e sua aplicação e benefício junto às comunidades podem ser efetivados. Contudo, há muito ainda a percorrer para que se possa implementá-lo, pois o processo está apenas no início.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Amapá pelo apoio financeiro e ao Projeto REMETAP, pela manutenção das PCD's. durante a execução do projeto de pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: 2005. 214 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: 2009. 243 p.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS/INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (CPTEC/INPE). Disponível em: <www.cptec-inpe.gov.br >. Acesso em 15 maio de 2009.
- CUNHA, A. C.; SOUZA, E. B. e CUNHA, H. F. A.. **Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá**. (Orgs). Macapá, AP. IEPA. 214 p. 2010.
- DI LASCIO, M. A.; BARRETO, E. J. F. **Energia e desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira: Eletrificação de Comunidade Rural**. Ministério de Minas e Energia (MME). Brasília-DF. 190 p. 2009.
- GRUPO DE TRABALHO DE ENERGIA SOLAR. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: GTEs, 1999.
- MARQUES, D.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. C. **Caracterização da radiação solar no Estado do Amapá por meio de estações automáticas de coletas de dados**. In: Workshop Ecolab - Ecossistemas Costeiros Amazônicos, 8. 2007, Macapá. Livro de Artigos. Macapá: DIDOC, 2007. p. 400-404
- NÚCLEO DE HIDROMETEOROLOGIA E ENERGIAS RENOVÁVEIS (NHMET). Banco de imagem. Macapá, 2008.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Minicentrals hidrelétricas: turbinas hidrocinéticas**. In: Soluções energéticas para a Amazônia – eletrificação de comunidades isoladas. Secretaria de Energia, Programa Luz para Todos. 2007. 90 p.
- TIBA, C. (Coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil**: Banco de dados terrestres. 1. ed. Recife: UFPE, 2000.
- VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetro com sensores fotoelétricos**. 2008. 95 f. Dissertação (Mestrado Meteorologia). Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, RS, 2008.