

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DO MAR
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO MAR
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIAS DO MAR

THAIANE GAMBARRA SOARES

RECURSO SOLAR NO PORTO DE SANTOS

Santos,

Novembro de 2015

THAIANE GAMBARRA SOARES

RECURSO SOLAR NO PORTO DE SANTOS:

Estudo de caso da produção de energia elétrica fotovoltaica no Terminal Portuário da Citrosuco

Monografia submetida ao curso de Graduação em bacharelado Interdisciplinar em ciências do mar, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciências do mar. Orientador: Prof. Dr. Fernando Ramos Martins.

Santos,

Novembro de 2015

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Igor que sempre me apóia e me ajuda de maneiras até mesmo impossíveis em todos os momentos da minha vida por todos esses anos de amor e companheirismo.

Ao meus pais, Teresa e Amílcar e aos meus irmãos Amílcar Júnior e Thaise pois sem seu apoio e exemplo eu nunca teria chegado onde estou.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando Ramos Martins pela paciência, ajuda e ensinamentos durante a elaboração desta monografia. Obrigada pelos momentos de conversa, apoio e incentivos, sua orientação me proporcionou reflexões sobre a vida.

Ao Sr. Alúcio de Souza Moreira pela disponibilidade e presteza ao contribuir para o início de uma parceria entre a UNIFESP e o Porto de Santos.

Às minhas amigas Àvylla, Isabelle, Vanessa, Paula Flávia, Kelly, Gabriela, Thayane, Raíssa, Jéssica, Ana Cláudia, Juliana, Celina e Maitê por deixarem esta etapa da minha vida mais feliz com tantas risadas. Obrigada pelo companheirismo e pela amizade.

RESUMO

A sustentabilidade energética busca o uso da energia para satisfazer as necessidades atuais sem comprometer as demandas por eletricidade e energia como um todo. As fontes renováveis de energia são a resposta para o desenvolvimento sustentável, para a preservação da biodiversidade e dos ecossistemas mundiais. O Porto de Santos é atualmente o maior porto brasileiro, devido à sua expansão e contínuo crescimento, é necessário um planejamento adequado para o suprimento de sua demanda energética. O objetivo foi avaliar o potencial de irradiação solar na área do Porto de Santos, a fim de estimar a produtividade energética de forma alternativa, renovável e livre de emissões de CO₂ através da implantação de painéis fotovoltaicos. Mais especificamente, o objetivo foi estimar a irradiação solar incidente na área portuária utilizando dados observados em estações meteorológicas e fornecidos por modelos numéricos computacionais. Em um segundo momento, realizou-se um estudo de caso do terminal portuário da empresa Citrosuco, no qual obtivemos uma estimativa da potência nominal instalada e da geração de energia elétrica mensal através de uma possível instalação de painéis fotovoltaicos nas dependências deste terminal. Os valores estimados de irradiação global horizontal pelo modelo BRASIL-SR foram menores que os valores medidos pela estação automática de Moela, principalmente durante os meses de maior irradiação incidente, o que demonstra uma necessidade de aquisição de dados locais para obter valores mais precisos. A análise do telhado dos armazéns do Terminal da Citrosuco na zona portuária de Santos, permitiu a delimitação de 13.226 m² de área para instalação de um sistema fotovoltaico com potência nominal instalada de 1.984 kWp, produzindo uma energia anual de 2.346.384 kWh.

Palavras-chave: Energia solar. irradiação global horizontal. Validação de dados. Produtividade energética.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias diárias de irradiação global horizontal mensal na área do Porto de Santos.	19
Tabela 2. Médias diárias de irradiação mensal no plano inclinado na área do Porto de Santos.	20
Tabela 3. Médias de área e potência de módulos fotovoltaicos poli e monocristalinos aprovados pelo Inmetro.	23
Tabela 4. Produtividade energética mensal e anual estimada na área do Porto de Santos, com uma Pr de 0,65.	27

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Porto de Santos, localizado entre as cidades de Santos e Guarujá. Os terminais portuários ficam localizados nas duas margens do estuário de Santos. FONTE: Google Maps. 10
- Figura 2.** Variáveis climáticas da cidade de Santos-SP, dados com médias mensais dos anos de 1961 a 1990. (a) Médias mensais de insolação diária, média em horas. (b) Médias mensais compensadas de temperaturas máxima, média e mínima em °C. (c) Médias mensais de nebulosidade em décimos. (d) Médias mensais da precipitação acumulada em mm. 11
- Figura 3.** Áreas em destaque para implantação dos painéis. Visão Norte. FONTE: Google Earth. 21
- Figura 4.** Áreas em destaque para implantação dos painéis. Visão Leste. FONTE: Google Earth. 22
- Figura 5.** Valores mensais do total diário de irradiação incidente. Dados em azul correspondem aos valores estimados pelo modelo BRASIL-SR e dados em vermelho correspondem aos valores observados pela estação meteorológica automática de Moela. 25
- Figura 6.** Comparação entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação solar global e valores observados na estação automática. Os pontos em verde indicam os valores modelados com correção do MBE com valores observados na EMA localizada em Moela. 26
- Figura 7.** Produção de energia estimada mensalmente. 28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	9
3. DADOS E METODOLOGIA	10
3.1. Área de Estudo	10
Demanda Energética do Porto de Santos	12
Estudo de Caso: Terminal da Citrosuco	12
4. METODOLOGIA	14
4.1. Avaliação do Recurso Solar	14
Dados de Estações Metereológicas	14
Dados do Modelo BRASIL-SR	16
Comparação dos dados	17
Irradiação Incidente no Plano Inclinado	19
4.2. Análise da Área disponível	21
4.3. Produtividade Energética	22
Potência Nominal do Sistema Fotovoltáico	22
Estimativa da Energia Mensal produzida por um Sistema Fotovoltáico	23
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1. Avaliação do Recurso Solar	25
5.2. Produtividade Energética	26
6. CONCLUSÃO	29
7. TRABALHOS FUTUROS	30
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável - entendido como o desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades - foi concebido no Relatório Brundtland (1987). De forma bastante simplificada, a abordagem do desenvolvimento sustentável insere a dimensão ambiental nos modelos de crescimento econômico.

A sustentabilidade do crescimento econômico sempre foi a questão central dos modelos de desenvolvimento. A capacidade de geração de serviços dos ecossistemas depende da manutenção a limites específicos dos recursos do meio ambiente. Uma vez vencidos esses limites, o sistema poderá entrar em colapso e sua produtividade torna-se nula (GOLDEMBERG & LUCON, 2008).

As energias renováveis são a resposta para o desenvolvimento sustentável e a preservação da biodiversidade e dos ecossistemas mundiais (ROVERRE, 2012). A busca por uma forma limpa de produção de energia elétrica para suportar o desenvolvimento humano é necessária.

O Sol é fonte de energia renovável e inesgotável e o aproveitamento dessa energia é uma das alternativas energéticas mais promissoras no Brasil. Nosso país possui altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, matéria-prima utilizada na fabricação de painéis fotovoltaicos para conversão de energia solar em eletricidade (EPE, 2012). Contudo a avaliação do seu potencial e viabilidade econômica é um exercício cada vez mais rigoroso, devido às diversas variáveis técnicas associadas a essa tecnologia e a exigência de uma elevada rentabilidade pelos investidores (BERLENGA, 2012).

O Porto de Santos, é atualmente o maior porto brasileiro, realiza o escoamento de um grande volume de cargas oriundas de diversos estados brasileiros, sendo o Porto caracterizado por uma extensa área de influência (SEP, 2012). Em 2013, o Porto apresentou um índice de crescimento de 8,7%, sendo o segundo maior incremento dentre os portos latino-americanos.

Tendo em vista o crescimento do Porto e a expansão com a abertura de novos terminas de atracação – BTP e Emraport (CODESP, 2014), se faz necessário planejamento e implantação de investimentos com a realização de projetos que possam assegurar as operações de importação e exportação. Dentre os recursos imprescindíveis para o contínuo funcionamento das operações portuárias encontra-se a demanda energética.

A demanda atual do Porto de Santos de 230 MW e apresenta previsão de alcançar 530 MW em 2024. O alto consumo de energia do Porto, concentrado em veículos, navios, equipamentos e instalações tem como fontes primárias o petróleo e a hidráulica, onde o primeiro representa mais de 80% da matriz. O incremento tecnológico e de novos acessórios para unitização de cargas, como o contêiner, solicita, expressivamente, energia, tanto da forma de eletricidade como da térmica gerada pela combustão interna dos motores dos veículos, navios e equipamentos (CODESP, 2014b).

Além da forte demanda, as operações envolvendo contêiner solicitam intensa confiabilidade na qualidade do consumo elétrico, por abranger alta tecnologia de gerenciamento, integração e interação entre os componentes de recepção, armazenamento e expedição da carga (CODESP, 2014b). Verifica-se, portanto, uma forte solicitação de qualidade e eficiência com alternativas e melhorias de produção energética dos subsistemas do porto.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho se baseia na proposta de avaliar o potencial de irradiação solar na área do Porto de Santos, a fim de verificar a viabilidade de implantação de um sistema de produção de energia elétrica alternativo, renovável e livre de emissões de CO₂ através da instalação de painéis fotovoltaicos.

Mais especificamente, o objetivo foi estimar a irradiação solar incidente na área portuária e a disponibilidade do recurso energético para a produção de energia elétrica utilizando dados observados em estações metereológicas de superfície e fornecidos por

modelos numéricos computacionais. Em um segundo momento, realizou-se um estudo de caso do terminal portuário da empresa Citrosuco, no qual obtivemos uma estimativa da potência nominal instalada e da geração de energia elétrica mensal através de uma possível instalação de painéis fotovoltaicos nas dependências deste terminal.

3. DADOS E METODOLOGIA

3.1. Área de Estudo

O porto de Santos fica localizado no litoral do estado de São Paulo, mais especificamente na divisa entre as cidades de Santos e Guarujá (Figura 1). O Porto de Santos é coordenado pela Codesp, vinculada à Secretaria de Portos e tem por objetivo realizar a administração e a exploração comercial do mesmo. Atualmente é considerado o maior porto do Brasil e permanece em crescente expansão.

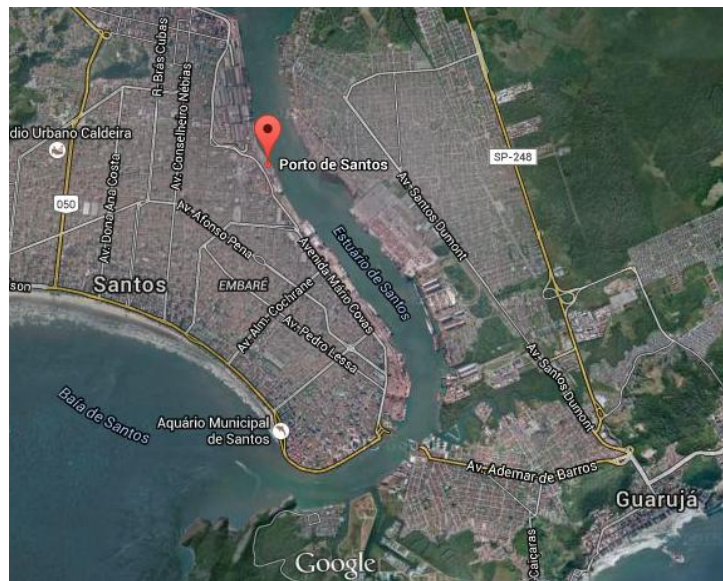
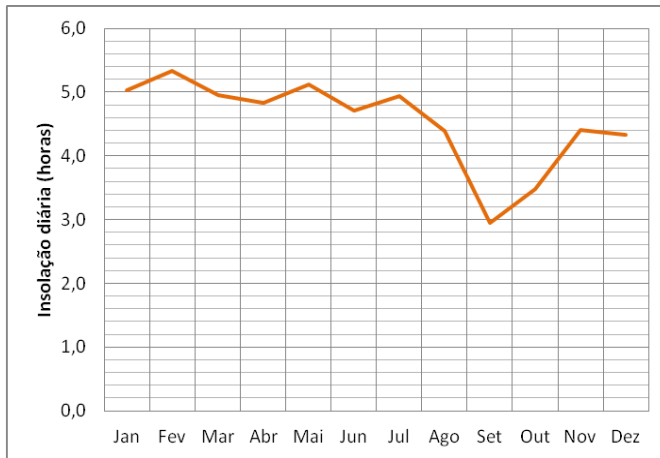


Figura 1. Porto de Santos, localizado entre as cidades de Santos e Guarujá. Os terminais portuários ficam localizados nas duas margens do estuário de Santos.

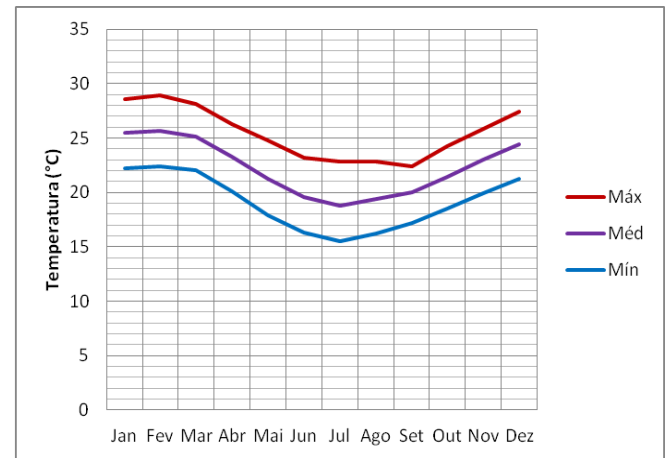
FONTE: Google Maps.

A radiação solar incidente na superfície é grandemente influenciada pela atmosfera e para sua aferição é necessário avaliar dados climatológicos da região.

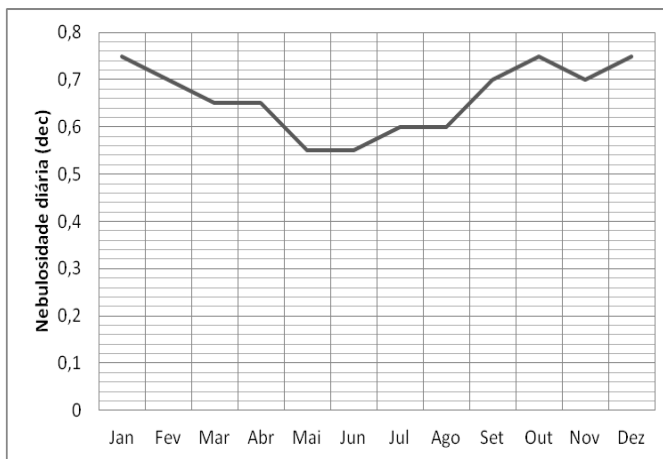
Dados das normais climatológicas de 1960 a 1990 disponibilizadas pelo INMET (INMET, 2009) foram usados para descrever algumas características climáticas da cidade de Santos, como: insolação diária; temperaturas máxima, média e mínima; precipitação acumulada e nebulosidade diária (Figura 2).



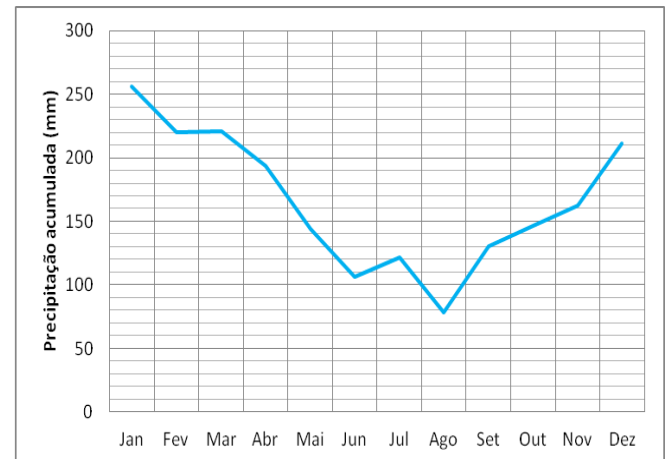
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. Variáveis climáticas da cidade de Santos-SP, dados com médias mensais dos anos de 1961 a 1990. (a) Médias mensais de insolação diária, média em horas. (b) Médias mensais compensadas de temperaturas máxima, média e mínima em °C. (c) Médias mensais de nebulosidade em décimos. (d) Médias mensais da precipitação acumulada em mm.

A cidade de Santos apresenta uma média diária anual de insolação de 4,5 horas, com os meses de agosto a outubro com os menores índices de insolação e maiores índices de nebulosidade juntamente com os meses de dezembro e janeiro. Quanto à precipitação e temperatura, pode-se caracterizar o clima típico da cidade de Santos como apresentando verão chuvoso com temperaturas elevadas e inverno seco com temperaturas mais amenas (próximas a 20°C).

Demanda Energética do Porto de Santos

O porto de Santos, até os anos de 1993, através da Pequena Central Hidrelétrica Itatinga situada na cidade de Bertioga, patrimônio sob administração e concessão da CODESP, deteve capacidade de atender toda a demanda de fornecimento de eletricidade de suas instalações, equipamentos, navios e outras atividades e empreendimentos portuários. O crescente movimento de contêiner, atividade que, em Santos, apresenta forte participação, aproximadamente, 32% de toda operação do sistema portuário nacional, a atual demanda energética do porto aumentou substancialmente em relação a esse período (CODESP, 2014b).

Em 2012 o consumo de eletricidade no porto foi de 334.753 MWh, - quatro vezes ao atendido pela Pequena Central Hidrelétrica de Itatinga (PCHI) em 2013 (85.252 MWh). Em 2024, quando as previsões de movimentação de contêiner passam, dos atuais 32%, para 50% da movimentação geral do porto, o consumo de eletricidade passa, dos atuais 334.753 MWh, para 934.553 MWh, ou seja, quase triplica, enquanto a movimentação da carga só duplica (CODESP, 2014b).

Os custos médios do Porto de Santos em 2013 com energia elétrica foram de R\$0,3728 por kWh para os custos próprios produzidos pela PCHI e de R\$0,5721 por kWh repassados à CPFL pelo consumo excedente de energia, incluindo os custos com a distribuição (CODESP, 2014b).

Estudo de Caso: Terminal da Citrosuco

A Citrosuco é uma empresa do setor de suco de laranja, que atua desde a plantação da laranja, processamento do suco, armazenagem, transporte e exportações para diversos países. A empresa possui um terminal marítimo na zona portuária de Santos, o suco é armazenado em grandes tanques, que o mantém em temperatura ideal até a chegada do navio-granel, que possui câmaras frias e modernos tanques de aço inox onde o produto é transportado.

O compromisso com a sustentabilidade é defendido pela empresa, que possui uma central elétrica localizada em Catanduva (SP) que produz energia através da queima de biomassa, entre eles o bagaço da laranja. Além disso, a empresa faz o monitoramento das emissões atmosféricas, mostrando sua preocupação com a causa. Desta forma, o terminal da Citrosuco foi o escolhido como estudo de caso para analisar a quantidade de energia elétrica a ser produzida com a instalação de um sistema fotovoltaico no telhado das suas instalações no terminal portuário de Santos.

A proposta irá contribuir para a empresa de forma a reduzir a quantidade de emissões de gases do efeito estufa, além de possibilitar uma economia na conta de energia que se estima ser de alto valor pela necessidade de manutenção de uma temperatura ideal dos tanques de armazenamento do suco de laranja.

4. METODOLOGIA

4.1. Avaliação do Recurso Solar

Dados de Estações Meteorológicas

Os dados foram cedidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através das redes de estações meteorológicas automáticas. A estação meteorológica automática (EMA) coleta, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar) representativas da área em que está localizada (INMET, 2011). Os dados são disponibilizados gratuitamente, em tempo real através do site do INMET (www.inmet.gov.br).

Para o presente trabalho, foram utilizados dados coletados entre 2008 e 2013 na estação automática localizada na Ilha Moela, que está mais próxima da região portuária (24°02'S; 46°15'W; 45 m de altitude). Apenas as observações realizadas nos horários de 9 as 22 UTC estão disponíveis.

Os dados meteorológicos, reportados em intervalos de hora, passaram por um controle de qualidade com objetivo de identificar e descartar dados suspeitos. As validações basearam-se em parâmetros descritos pelo Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais - SONDA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (SONDA, 2015). O controle de qualidade foi realizado com a criação de um algoritmo no programa estatístico R Studio®. A lógica do algoritmo é descrita a seguir:

1. Importar os dados disponíveis por ano em forma de matriz, 14 colunas representando horários de registro dos dados observados de radiação e 365 linhas para cada dia do ano.

2. Criação de matriz de qualificação para valores máximos de irradiação no topo da atmosfera, 14 colunas representando horários de registro dos dados observados de radiação e 365 linhas para cada dia do ano.

3. Comparação das matrizes, os dados presentes na matriz de dados observados não podem ser maiores que os valores presentes na matriz de qualificação e nem menores que o valor mínimo estabelecido para cada validação.

4. Geração da matriz qualificada.

Este processo foi realizado em duas etapas, a primeira para verificar os valores fisicamente possíveis e a segunda para valores extremamente raros. Para criação da matriz com valores máximos fisicamente possíveis foi feita a seguinte estimativa de irradiação no topo da atmosfera:

$$Rp = S_0 \times E_0 \times 1,5 \times \cos \theta_0^{1,2} + 100, \text{ onde}$$

Rp: Radiação Global Horizontal fisicamente possível, S_0 : Constante Solar, E_0 : Fator de correção da excentricidade da Terra $(r_0/r)^2$, θ_0 : ângulo zenital, também chamado de distância zenital, posição angular do Sol em relação ao eixo vertical, não pode ser maior que 90° (IQBAL,1983). O valor mínimo da primeira validação foi de -4 Wm^{-2} .

A segunda etapa da qualificação baseou-se na seguinte fórmula para valores associados à eventos extremamente raros,:

$$Rr = S_0 \times E_0 \times 1,2 \times \cos \theta_0^{1,2} + 50, \text{ onde}$$

Rr: Radiação Global Horizontal extremamente rara. O valor mínimo da segunda validação foi de -2 Wm^{-2} .

Para calcular a média mensal do total diário de radiação do local, foi necessário realizar uma terceira etapa com intuito de selecionar valores diários de radiação incidente que fossem representativos da característica típica do ciclo diário de insolação na superfície. Desta maneira, realizou-se uma análise dos dados que encontravam-se indisponíveis pela estação meteorológica juntamente com aqueles removidos após as etapas anteriores. Para tanto, foi desenvolvido um algoritmo com objetivo de descartar os dias que atendessem aos seguintes pré-requisitos:

- os dados de dias nos quais existiram mais de 2 dados nulos nos períodos entre 9 e 11 UTC ou entre 19 e 22 UTC não foram considerados para o cálculo da média mensal.
- os dados de dias nos quais existiram dados nulos no período entre 12 e 18 UTC não foram considerados para o cálculo da média mensal.

Após realizadas as três etapas de qualificação, foram calculadas as médias mensais do total diário de radiação incidente de cada ano e a seguir a média mensal final dos anos de 2008 a 2013.

Dados do Modelo BRASIL-SR

A estimativa do fluxo de radiação solar incidente é obtida através do tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite, posteriormente solucionando a equação de transferência radiativa e calculando cada uma das componentes do fluxo de radiação solar: global, direta e difusa com uso do Modelo BRASIL-SR. O banco de imagens de satélite é composto por imagens do satélite GOES-EAST fornecidas pela Divisão de Satélite Ambientais do CPTEC/INPE (PEREIRA *et al.*, 2006).

O modelo de transferência radiativa apresenta como produto final mapas solarimétricos com valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar. Os mapas apresentam resolução espacial de 10km x 10km (PEREIRA *et al.*, 2006).

Os dados estimados foram disponibilizados através do Atlas Brasileiro de Energia Solar de 2006, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em colaboração com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O mapa solarimétrico com dados de radiação global horizontal em Wh/m²/dia foi manipulado e analisado com auxílio do programa QGIS[®] v.2.8.1, *software* livre utilizado para criar, editar e analisar dados geoespaciais.

Os valores de irradiação solar na superfície foram extraídos do Atlas tomando como referência as coordenadas geográficas 24°02'S; 46°15'W, referente a posição da estação meteorológica automática operando em Moela localizada na Baía de Santos.

Duas células com as seguintes coordenadas geográficas foram utilizadas para a obtenção do valor da irradiação mensal estimado pelo modelo BRASIL-SR: 23°57'S; 46°17'W e 24°2'S; 46°17'W. Os valores de irradiação mensais das duas células foram interpolados para a posição geográfica da EMA ponderado pelo inverso do quadrado da distância. Para isto, foi desenvolvido um algoritmo no programa estatístico RStudio®:

- Estabelecimento da variável distância de cada coordenada do mapa até a coordenada de Santos através da equação:

$$d_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}, \text{ onde}$$

d_n é a distância, x e x_n correspondem aos valores da latitude de Santos e da coordenada do mapa, respectivamente e y e y_n aos valores da longitude de Santos e da coordenada do mapa, respectivamente.

- Criação de dois vetores com os valores da radiação de cada mês para cada coordenada do mapa.
- Cálculo dos valores interpolados das médias mensais de irradiação através da equação:

$$R = \frac{(R_1 \times d_2) + (R_2 \times d_1)}{(d_1 + d_2)}, \text{ onde}$$

R é o vetor com os valores médios de radiação para cada mês do ano, R_1 e R_2 são os valores de radiação mensal das coordenadas escolhidas no mapa solarimétrico.

O resultado final foi a obtenção de valores médios de irradiação global horizontal para cada mês do ano.

Comparação dos dados

Os dados fornecidos pelo modelo BRASIL-SR (dados modelados) precisam ser comparados com valores de radiação incidente observados em estações

meteorológicas, para que seja aferida sua precisão. Para modelos de radiação solar, alguns testes estatísticos são utilizados para testar os desvios entre os dados estimados e os dados observados (IQBAL,1983). Dentre eles:

Desvios Médios – MBE

O desvio médio é o cálculo da média de desvios entre os valores do modelo e os valores dos dados observados. É definido pela equação:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)}{N}, \text{ onde}$$

m_i é o dado do modelo, o_i é o dado observado na EMA e N o número de observações. Idealmente, o valor mais próximo de zero deve ser obtido.

Desvios Médios Quadráticos - RMSE

O RMSE é a medida da variação entre os valores modelados e os valores observados. É definido a seguir:

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (m_i - o_i)^2}{N} \right\}^{1/2}, \text{ onde}$$

m_i é o dado modelado, o_i é o dado observado e N o número de observações. O RMSE é sempre positivo, entretanto um valor mais próximo de zero é o ideal. Pode ser observado que poucos valores com grandes variações podem resultar em um aumento substancial do valor do RMSE.

As médias mensais do total diário de irradiação global horizontal finais utilizadas para este estudo foram determinadas tomando as médias mensais fornecidas pelo modelo BRASIL-SR mais o valor obtido no desvio médio (MBE). Os resultados encontram-se descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Médias diárias de irradiação global horizontal mensal na área do Porto de Santos.

Mês	Wh/m ² /dia
Jan	5648
Fev	5623
Mar	5148
Abr	4678
Mai	3713
Jun	3463
Jul	3638
Ago	4218
Set	4463
Out	5313
Nov	5268
Dez	5923

Irradiação Incidente no Plano Inclinado

Geralmente a radiação global é medida em uma superfície horizontal, mas para aplicações de energia solar, o conhecimento da radiação da superfície inclinada é requerido. Para o cálculo do ângulo de inclinação do painel fotovoltaico no hemisfério sul, utiliza-se a latitude do local, devendo o mesmo ser apontado para o norte geográfico. Segundo Nijegorodov et al. 1994, essa inclinação permite a melhor média de irradiação incidente para os meses de menor incidência, evitando os picos de geração no verão e compensando a baixa incidência no inverno.

O método utilizado para calcular a irradiação incidente em um plano inclinado é descrito a seguir (Duffie & Beckman, 1980):

$$H\beta = H \left(1 - \frac{Hd}{H}\right) Rb + Hd \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + H\rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right), \text{ onde}$$

$H\beta$ é a radiação global em um plano inclinado em W/m^2 , H é a radiação global em uma superfície horizontal em W/m^2 , Hd é a radiação solar difusa em uma superfície horizontal em W/m^2 , Rb é o fator geométrico (razão entre a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada e a radiação solar direta sobre um plano horizontal), β é o ângulo de inclinação da superfície inclinada e ρ é o albedo.

O valor da radiação solar difusa em uma superfície horizontal foi modelado por Page em 1961, é a forma mais usada para o cálculo:

$$Hd = 1 - 1,13Kt, \text{ onde}$$

Kt é o índice de claridade do céu, determinado pela razão entre a radiação global em uma superfície horizontal (H) e a radiação no topo da atmosfera (Ho).

O valor da radiação no topo da atmosfera foi calculado pela equação (Datta *et al.*, 2013):

$$Ho = \frac{24 \times 3600 \times So}{\pi} \left(1 + \cos \left(\frac{360d}{365} \right) \right), \text{ onde}$$

So é a constante solar ($1367 W/m^2$), d é o número do dia do ano e Ho é dado em J/m^2 .

Tabela 2. Médias diárias de irradiação mensal no plano inclinado na área do Porto de Santos.

Mês	Wh/m ² /dia
Jan	5104
Fev	5346
Mar	5295
Abr	5340
Mai	4597
Jun	4528
Jul	4667
Ago	4981
Set	4724
Out	5171
Nov	4833
Dez	5255

4.2. Análise da Área disponível

Foi realizado o estudo da área do Terminal da Citrosuco localizado na zona portuária de Santos. Com auxílio da ferramenta Google Earth foram delimitadas áreas dos telhados dos armazéns pertencentes à Citrosuco que estivessem livres para uma possível implantação de um sistema fotovoltaico, de forma que não sofressem influencia de sombreamento. As figuras 3 e 4 mostram a delimitação das áreas escolhidas, todas somam um total de 13.226 m².



Figura 3. Áreas em destaque para implantação dos painéis. Visão Norte. FONTE: Google Earth.



Figura 4. Áreas em destaque para implantação dos painéis. Visão Leste. FONTE: Google Earth.

4.3. Produtividade Energética

Potência Nominal do Sistema Fotovoltáico

Potência nominal é definida como a potência máxima entregue pelo gerador solar nas condições padrões de irradiação ($1000\text{W}/\text{m}^2$) e temperatura (25°C).

Para determinar a potência nominal de um sistema fotovoltaico foi necessário estabelecer um tamanho e potência média de módulos fotovoltaicos encontrados no mercado brasileiro. Para isto foram selecionados módulos de silício policristalino e monocristalino vendidos no mercado brasileiro devidamente certificados e classificados pelo Inmetro como A em eficiência energética e com potência acima de 200 Wp. Foi feita uma média da área ocupada pelo módulo e da potência de cada módulo (Inmetro, 2015).

Tabela 3. Médias de área e potência de módulos fotovoltaicos poli e monocristalinos aprovados pelo Inmetro.

	Amostra	Área (m²)	Potência (Wp)
	Poli	109	1,7073
	Mono	58	1,6267
	Total	167	1,6793

Fonte: Inmetro, 2015.

O cálculo da potência nominal instalada a partir de uma área disponível para implantação de um sistema fotovoltaico foi realizado de acordo com a equação:

$$Pn = \frac{A \times Pp}{Ap}, \text{ onde}$$

Pn é a potência nominal instalada no sistema fotovoltaico em Wp, A é área disponível para instalação dos módulos em m², Ap é área de um único painel fotovoltaico em m² e Pp é a potência nominal de um único painel em Wp.

Estimativa da Energia Mensal produzida por um Sistema Fotovoltaico

A energia entregue por um sistema fotovoltaico, em corrente alternada, pode ser determinada através da equação (Lorenzo, 2002):

$$E = \frac{Pn \times It \times Pr \times Fs}{G}, \text{ onde}$$

E é a energia produzida por mês em kWh; Pn é a potência nominal do sistema fotovoltaico em Wp; It é a irradiação mensal global efetiva incidente num plano inclinado em kWh/m²; G é a irradiância que determina a potência nominal dos módulos, normalmente 1000 W/m²; Pr corresponde ao desempenho global do sistema e Fs é o fator de sombreamento, sendo nulo quando a luz não atingir o painel e igual à unidade quando não houver sombra. Para este estudo foi considerado ausência de sombra.

O desempenho global do sistema fotovoltaico é determinado pela *Pr – Performance Ratio* que considera as perdas energéticas associadas à conversão de corrente contínua para corrente alternada, ao fato de que o rendimento das células solares são muitas vezes inferiores aos indicados pela potência nominal e está relacionado a fatores como a temperatura do módulo, sujeira, incompatibilidade e perda nas fiações (Lorenzo, 2002).

Segundo Marion et al. (2005) o valor médio da taxa de desempenho de uma célula à temperatura nominal é de 0,731, já o CRESESB no manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos indica um fator de perda de 25% em locais com inclinação ideal em que os painéis estejam diretamente apontados para o Norte.

Analisando as áreas do terminal da Citrosuco, a inclinação e azimute dos painéis estão sujeitos ao posicionamento dos telhados dos armazéns, portanto a *Pr* utilizada para os cálculos de produção de energia elétrica foi de 0,65. Devido à localização na zona portuária de Santos, onde há a constante movimentação de grãos, existe uma maior emissão de material particulado na região, o que provoca uma maior deposição de poeira, corroborando para a utilização de uma *Pr* abaixo do recomendado pela literatura.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliação do Recurso Solar

Os resultados obtidos mostram que os valores estimados pelo modelo BRASIL-SR foram menores que os valores medidos pela estação automática de Moela, principalmente durante os meses de maior irradiação incidente (Figura 5).

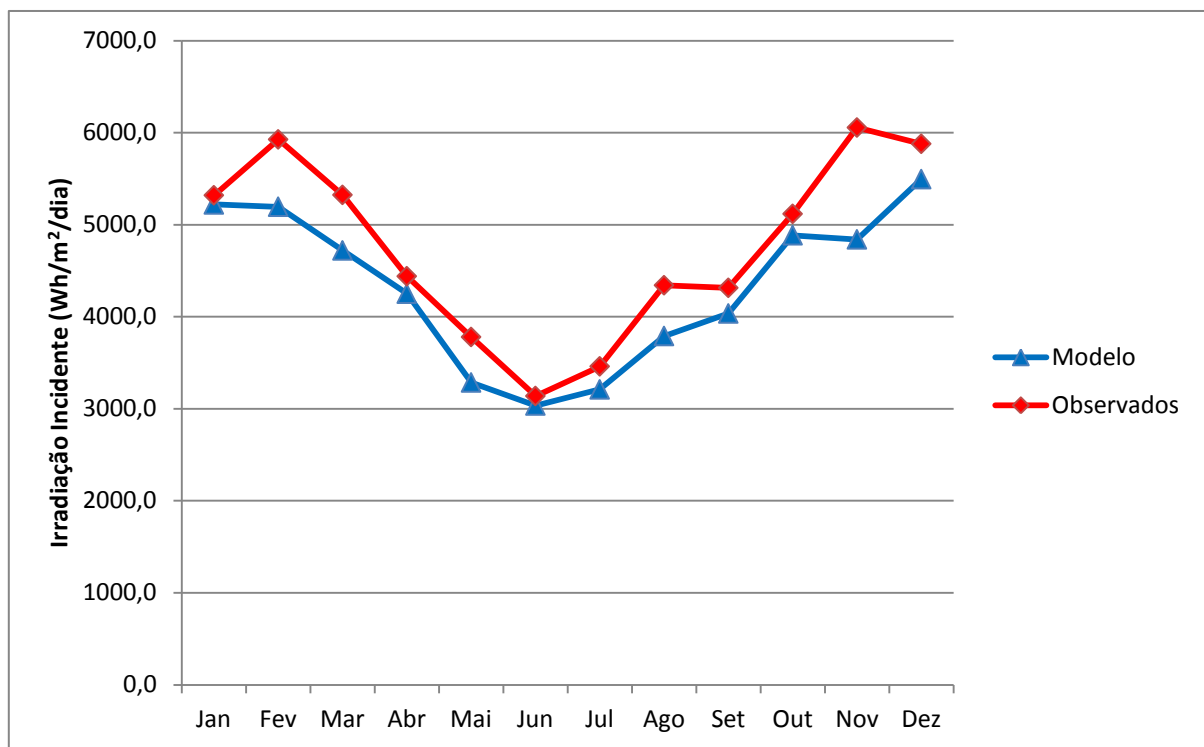


Figura 5. Valores mensais do total diário de irradiação incidente. Dados em azul correspondem aos valores estimados pelo modelo BRASIL-SR e dados em vermelho correspondem aos valores observados pela estação meteorológica automática de Moela.

Os desvios médios (MBE) e os desvios médios quadráticos (RMSE) obtidos demonstram que o modelo BRASIL-SR subestimou os valores de irradiação incidente (Figura 6). Isso demonstra a necessidade de uma avaliação do recurso solar mais

criterosa para estudos nos quais os valores de irradiação incidente devem ser mais precisos, viabilizando uma estimativa de geração energética mais fidedigna.

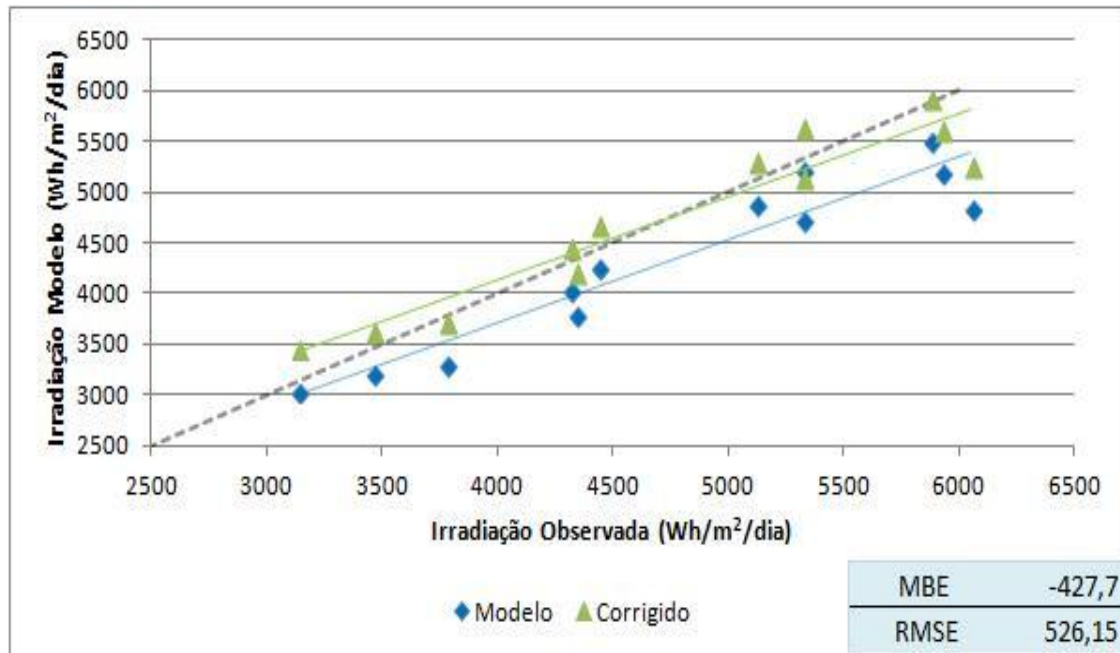


Figura 6. Comparação entre as estimativas do modelo BRASIL-SR para o total diário de irradiação solar global e valores observados na estação automática. Os pontos em verde indicam os valores modelados com correção do MBE com valores observados na EMA localizada em Moela.

A estação meteorológica escolhida para obtenção dos dados observados, estação de Moela, fica a aproximadamente 10 km do local de estudo de caso – Terminal da Citrosuco, fato este passível de gerar diferenças nos valores de irradiação incidente, sendo necessários estudos posteriores para medir a radiação incidente no local afim de se obter dados mais precisos.

5.2. Produtividade Energética

O valor obtido de produtividade energética anual foi de 1.183 kWh/kWp, sendo o menor valor encontrado no mês de junho e o maior valor no mês de março.

Apesar de utilizar um valor de Pr abaixo do recomendado pela literatura, a estimativa de produtividade energética é bastante promissora, já que o valor anual de 1183 kWh/kWp é superior à maior produtividade estimada anualmente na Alemanha – 788 a 1088 kWh/kWp (Tiepolo *et al.*, 2014). A Alemanha possui uma rede elétrica com suporte na geração fotovoltaica bastante consolidada mesmo com valores de radiação solar incidente inferiores aos da região sudeste do Brasil.

Tabela 4. Produtividade energética mensal e anual estimada na área do Porto de Santos, com uma Pr de 0,65.

Mês	kwh/kwp
Jan	103
Fev	97
Mar	107
Abr	104
Mai	93
Jun	88
Jul	94
Ago	100
Set	92
Out	104
Nov	94
Dez	106
Total	1183

A análise do telhado dos armazéns do Terminal da Citrosuco na zona portuária de Santos, permitiu a delimitação de 13.226 m² de área para instalação de um sistema fotovoltaico com potência nominal instalada de 1.984 kWp.

A energia mensal estimada variou de 175.163 kWh no mês de Junho a 211.683 kWh no mês de Março (Figura 7). O total de energia estimado anualmente foi de 2.346.384 kWh.

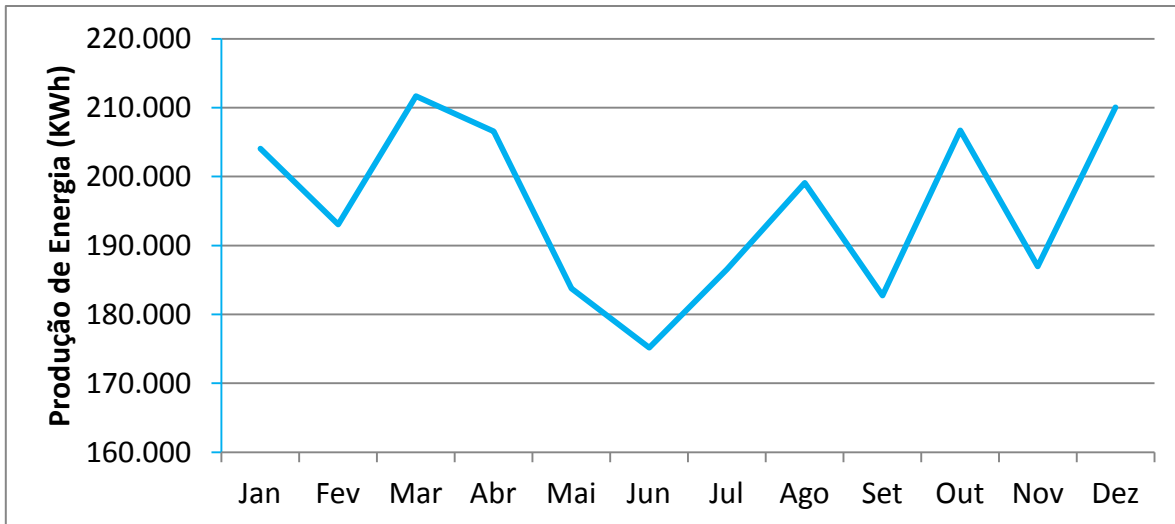


Figura 7. Produção de energia estimada mensalmente.

Analisando um gerador elétrico convencional com a mesma potência nominal e com rendimento de 80%, o mesmo produziria 13.028.310 kWh ao ano, sendo a energia fotovoltaica gerada apenas 18% desse valor. As diferenças na geração de energia elétrica entre um gerador convencional e um gerador fotovoltaico está principalmente na eficiência. Os painéis fotovoltaicos de silício monocristalino e policristalino disponíveis no mercado brasileiro devidamente certificados e classificados pelo Inmetro como A possuem uma eficiência que varia entre 13,7-17,5% (Inmetro, 2015). Portanto, a busca por materiais que permitam uma maior eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica ainda deve ser o fator primordial para garantir a disseminação da energia solar no mercado mundial.

A proposta de geração de energia através de painéis fotovoltaicos se apresenta como um rendimento econômico ao atender parte das necessidades de consumo de energia elétrica do Terminal da Citrosuco, mas mais que isso é o benefício ambiental promovido pela redução da emissão de gases do efeito estufa. Aliado a este melhoramento do meio ambiente, com a instalação fotovoltaica contribui-se para a uma geração energética sustentável, sendo ainda impulsionada pelo marketing que pode ser gerado a partir de um selo verde associado à venda do suco de laranja.

6. CONCLUSÃO

O código de validação de dados observados em estações meteorológicas desenvolvida em um programa livre (RStudio®) neste trabalho se mostrou um método viável com facilidade de reprodução.

A avaliação do recurso solar mostrou que os dados obtidos com o modelo BRASIL-SR e apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006) são menores que os valores observados pela estação meteorológica. A comparação desenvolvida entre a irradiação incidente obtida com uso do modelo e a observada na estação meteorológica permite uma correção da série temporal de dados, possibilitando a obtenção de valores mais precisos, viabilizando uma estimativa de geração energética mais fidedigna.

Foi estimado através de um estudo de caso, a possibilidade de geração de 1.984 kWp caso utilizado a área dos telhados do Terminal portuário da empresa Citrosuco para geração elétrica fotovoltaica, com uma geração anual de cerca de 2.346.384 kWh. Foi assumido uma “*Performance Ratio*” do sistema fotovoltaico igual a 0,65, menor do que o normalmente utilizado na literatura, em função da orientação da iluminação (sistema não estar voltado para o Norte) e da quantidade de particulado presente na atmosfera.

A proposta de geração de energia através de painéis fotovoltaicos se apresenta como um rendimento econômico ao atender parte das necessidades de consumo de energia elétrica do Terminal da Citrosuco. Além disso, há um benefício ambiental promovido pela redução da emissão de gases do efeito estufa.

7. TRABALHOS FUTUROS

A disposição dos telhados e a alta quantidade de emissão de material particulado no Porto de Santos foram as motivações para utilizar uma *performance ratio* inferior ao recomendado pela literatura. Como forma de mitigar essa problemática é proposto para pesquisa futura a coleta de dados de produtividade energética no local, onde seria possível determinar uma Pr mais consistente com as condições ambientais existentes na área portuária.

Aliado a dados de consumo elétrico e custos de energia elétrica pagos à distribuidora pela Citrosuco, se almeja realizar um estudo de viabilidade econômica determinando a taxa de retorno de investimento com a instalação de módulos fotovoltaicos nos telhados do Terminal Portuário.

A parceria estabelecida com o Coordenador do Grupo de Trabalho designado para avaliar a falta de energia elétrica do Porto, Sr. Aluísio de Souza Moreira permitiu o início do desenvolvimento de uma série de trabalhos que visam o planejamento e análise da viabilidade de instalação de fontes alternativas de energia no Porto de Santos. Além disso, segue como sugestão do próprio coordenador o surgimento de parcerias com os terminais portuários, como para o caso aplicado neste trabalho, com o Terminal da Citrosuco, afim de se realizar uma análise mais concreta e realista da inserção de uma matriz energética fotovoltaica no local.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERLENGA, J.F.F. **Estudo de viabilidade de uma instalação fotovoltaica num edifício existente**. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa, 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**, 2012. Disponível em:
<http://www.epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf>
Acesso em: 17 Nov 2014.
- CODESP. Relatório Anual 2013: Porto de Santos. **Companhia do Estado de Docas de São Paulo**, 2014a. Disponível em:
<<http://201.33.127.41/down/relatorio/Relatorio2013.pdf>> Acesso em: 17 Nov 2014.
- CODESP. RESOLUÇÃO DP N.º 39.2014 - Usina de Itatinga: 1º Relatório do Grupo de Trabalho. **Companhia do Estado de Docas de São Paulo**, 2014b.
- CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro: **Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL**, 2014. Disponível em:
http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 27 Out 2015.
- DATTA, D. et al. Modeling monthly average daily diffuse radiation for dhaka, bangladesh. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 02, nº 12, p. 540-544, 2013.
- EPE. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. **Rio de Janeiro, 2012**.
- INSTITUTO PARA O DESENVOLVIMENTO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS NA AMÉRICA LATINA (IDEAL). **O mercado brasileiro de geração distribuída**

fotovoltaica – Edição 2015. Florianópolis, 2015. Disponível em:

http://issuu.com/idealeco_logicas/docs/2015_ideal_mercadogdfv_150901_final. Acesso em: 02 Nov 2015.

LORENZO, E. La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red: El mito del 1300 y “el cascabel del gato”. **Revista Era Solar**, n. 107, p. 22-28, 2002.

INMET. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Brasília, DF, 2009. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> > Acesso em: 04 jun 2015.

INMET. Informações sobre amostragem e parâmetros medidos por uma Estação Meteorológica Automática (EMA). **NOTA TÉCNICA Nº**

001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET, 2011. Disponível em: <

http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf> Acesso em: 17 Nov 2014.

INMETRO. **Tabela de eficiência energética - sistema de energia fotovoltaica - módulos - edição 06/2015.** Disponível em:

http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/tabela_fotovoltaico_modulo.pdf. Acesso em: 02 Nov 2015.

IQBAL, M. An Introduction to Solar Radiation. Toronto: **Academic Press Canada**, 1983.

MARION, B. et al. *Performance Parameters for Grid-Connected PV Systems*. **Golden**, Colorado, 2005.

NASCIMENTO, L. R.; RÜTHER, R.. A avaliação de longo prazo de um sistema fotovoltaico integrado à edificação urbana e conectado à rede elétrica pública. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 5, n. 1, p. 73-81. Julho de 2014.

NIJEGORODOV, N.; DEVAN, K. R. S.; JAIN, P. K.; CARLSSON, S. Atmospheric Transmittance Models and an Analytical Method to Predict the Optimum Slope of an Absorber Plate, Variously Orientated at Any Latitude, **Renewable Energy**, Vol. 4, No. 5, 1994, pp. 529-543.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento. São Paulo: **Editora da Universidade de São Paulo**, 2008.

PAGE, J.K. The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. **Proc. U.N. Conf. New Sources Energy**, Vol. 4, No. S98, pp. 378-390, 1961.

PEREIRA, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S.; Rüther, R.: **Atlas Brasileiro de energia solar**, São José dos Campos, 1ª Edição. 60pp. 2006.

ROVERE, E.L.L. Alternativas energéticas no Brasil: uma herança favorável à economia verde. p. 95-106. In: CGEE (org.). *Economia verde para o desenvolvimento sustentável*. Brasília: **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos-CGEE**, 2012.

SEP. **Pesquisas e Estudos para a Logística Portuária e Desenvolvimento de Instrumentos de Apoio ao Planejamento Portuário**: Atualização do Plano Mestre - Porto de Santos. UFSC/LabTrans: Florianópolis, 2012. Disponível em: < <http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/pnpl/arquivos/planos-mestres-versao-completa/porto-de-santos-atualizacao.pdf>> Acesso em: 17 nov 2014.

SONDA. Validação de dados pela **BSRN** (Baseline Surface Radiation Network), 2015. Disponível em: < <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/validacao.html>>. Acesso em: 04 jun 2015.

TIEPOLO, G.M. et al. Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no estado do paraná com alemanha, itália e espanha. **V Congresso Brasileiro de Energia Solar**. Recife, 2014. Disponível em: <http://www.escriptorioverdeonline.com.br/wp-content/uploads/2012/08/R0204-1.pdf>. Acesso em: 20 de nov 2015.

VIANA, T. S. et al. Sistema fotovoltaico de 2 kWp integrado a edificação: análise do desempenho de 14 anos de operação. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES**. São Paulo, SP.: [s.n.], 2012. p. 6.

WCED. Our common future. United Nations, The World Commission on Environment and Development (**The Brundtland Report**). 1987.