

# Análise comparativa do balanço energético da energia solar (fotovoltaica e termossolar)

PASCOAL DO SACRAMENTO  
ARAÚJO JÚNIOR

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental e licenciado em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), especialista em Gestão Ambiental com ênfase em Gestão de Recursos Hídricos pela Universidade do Estado da Bahia (Uneb) e em Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono pela Universidade Salvador (Unifacs), especialista em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Instituto Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Secretaria do Meio Ambiente. Professor da Secretaria Estadual de Educação do Estado da Bahia. [passac2020@gmail.com](mailto:passac2020@gmail.com)

**RESPONSÁVEL** pelo desenvolvimento e a manutenção da vida na Terra, o Sol pode ser visto, de acordo com a escala de tempo e os atuais níveis de consumo de energia, como uma fonte inesgotável. Todas as fontes de energia utilizadas hoje em escala significativa – exceto a nuclear e a geotérmica – são resultantes, direta ou indiretamente, do efeito da incidência da radiação solar sobre a superfície do planeta ao longo dos tempos (RIBEIRO, 2004). Pois, na busca de aproveitamento direto e eficaz da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas para geração de eletricidade, podendo ocorrer de duas maneiras, uma indireta pelo uso do calor para gerar vapor que, expandido em uma turbina a vapor, acionará um gerador elétrico em uma central termelétrica (heliotérmica), e outra direta pelo uso de painéis fotovoltaicos (REIS, 2005).

Dessas duas tecnologias, a fotovoltaica é a que vem conquistando mais mercado nos últimos anos, representando 98% da capacidade instalada entre as duas fontes em 2014. A heliotérmica, por sua vez, por se tratar de uma planta termelétrica, apresenta maior inércia na geração, sendo menos suscetível às variações da irradiação.

A energia solar fotovoltaica é uma das alternativas consideradas pelo programa governamental Luz para Todos, que visa à universalização do acesso à energia elétrica (REIS, 2005)

Além disso, apresenta como vantagem a maior facilidade de funcionar com armazenamento ou em conjunto com outra fonte de *back up*, o que permite sua operação depois que o Sol se põe (REN21, 2015).

Estima-se que o Brasil possua atualmente cerca de 20 MW de capacidade de geração solar fotovoltaica instalada que, em sua maioria (99%), segundo a International Energy Agency (2011), se destina a projetos isolados e remotos, e a sistemas de suporte a antena de telefonia celular e a radares de trânsito. Segundo Reis (2005), isso ocorre devido ao seu elevado custo de instalação. A energia solar fotovoltaica é uma das alternativas consideradas pelo programa governamental Luz para Todos, que visa à universalização do acesso à energia elétrica (REIS, 2005). É neste contexto que, segundo Thomas e outros (1999), um sistema solar pode virtualmente ser dimensionado para suprir qualquer carga, apenas com a ressalva de que cada aplicação pode apresentar requisitos específicos. Basta que exista área suficiente para instalação dos coletores, radiação solar incidente e dinheiro. Sistemas integrados à rede elétrica implicam operações síncronas com a rede e baterias podem ser necessárias para armazenar a energia em sistemas à rede de distribuição ou para alimentar cargas em correntes alternadas (RIBEIRO, 2004).

Somente em 2012, essa modalidade de geração foi regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), através da Resolução Normativa nº 482 (BRASIL, 2012), que estabelece as condições gerais para o acesso de micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, e o sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*). Ao final de 2015, havia o registro de 1.675 sistemas fotovoltaicos conectados sob o regime da REN 482, somando 13,4 MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2016).

Um marco da entrada da energia fotovoltaica em grande escala no território brasileiro foi promovido pelo Ministério do Meio Ambiente (MME), com o Leilão de Energia de Reserva de 2014, garantindo a contratação de 890 MW de energia fotovoltaica. Em relação à energia heliotérmica, também foi incluída em alguns leilões de energia nova. No entanto, até 2015 nenhuma usina com essa tecnologia havia sido contratada (TOLMASQUIM, 2016).

Porém, do ponto de vista estratégico, o Brasil possui uma série de características naturais favoráveis, tais como, altos níveis de insolação e grandes reservas de quartzo de qualidade, que podem gerar importante vantagem competitiva para a produção de silício com alto grau de pureza, células e módulos solares, produtos estes de alto valor agregado. Tais fatores potencializam a atração de investidores e o desenvolvimento de um mercado interno, permitindo que se vislumbre um papel im-

portante na matriz elétrica para este tipo de tecnologia. Neste sentido, reconhecendo as suas vantagens, mas também os seus desafios, cabe ao Estado, em sua função de planejador, encontrar os meios de incentivar a tecnologia solar para que esta possa contribuir para o objetivo nacional de desenvolvimento econômico e de sustentabilidade da matriz energética. Dentre os instrumentos disponíveis, encontram-se modelos de contratação, modelos de financiamento, incentivos via desoneração tributária ou mesmo ofertas de tarifas-prêmio para determinadas tecnologias (TOLMASQUIM, 2012).

Na busca de aproveitamento direto e eficaz da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, uma delas leva em conta os índices de radiação solar, a oferta de água e a possibilidade de conexão ao sistema elétrico. Para isto, torna-se necessário avaliar os possíveis impactos provenientes desta fonte alternativa de energia, sendo necessário estabelecer um comparativo acerca de sua eficiência energética. Deste modo, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) visa fomentar um entendimento das causas e tipos de impactos ambientais relacionados aos produtos ou serviços, facilitando, assim, a tomada de decisão (UDO DE HAES et al., 2002). Possibilita ainda estudar os aspectos e impactos ambientais ao longo da vida de um produto, desde a extração de recursos naturais, passando por produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem e disposição (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Notoriamente, nenhuma produção de energia ou tecnologia de conversão é realizada sem riscos ou resíduos. Em algum ponto de toda a cadeia energética, desde a extração de recursos até a provisão de serviços de energia, poluentes são produzidos, emitidos ou dispostos (HOLDREN; SMITH, 2000). Neste contexto, a metodologia de ACV, estabelecida pela Organização Internacional para Normatização (*International Organization for Standardization*), tem-se destacado como um instrumento apropriado para fornecer as informações necessárias de apoio à tomada de decisões relacionadas à sustentabilidade, ao avaliar os impactos ambientais de todas as fases de uma atividade industrial, desde a aquisição de matéria-prima até sua disposição final (UTIGKAR; THIESEN, 2006).

Portanto, esta análise utilizará o inventário do ciclo de vida para quantificar a demanda total de energia e as eficiências energéticas relativas aos processos e produtos (ANGARITA et al., 2008). Entender a necessidade energética do ciclo de vida da energia solar é a chave para compreender se as matrizes fotovoltaica e termossolar são fontes renováveis de energia. Por isso, este trabalho objetiva estabelecer um comparativo da eficiência energética de todo o processo produtivo das energias renováveis do tipo solar (fotovoltaica e termossolar) para geração de 30

Na busca de aproveitamento direto e eficaz da energia solar, diversas tecnologias vêm sendo estudadas, uma delas leva em conta os índices de radiação solar, a oferta de água e a possibilidade de conexão ao sistema elétrico

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo que o módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema

MW de energia elétrica, facilitando a tomada de decisão de qual modelo pode melhor ser empregado para contribuir com a diversificação da matriz energética nacional.

## ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é obtida através da conversão direta da luz em eletricidade (efeito fotovoltaico), sendo que o módulo fotovoltaico é a unidade básica de todo o sistema. O módulo é composto por células conectadas em arranjos que produzem tensão e corrente suficientes para a utilização da energia. O número de células conectadas em um módulo, com arranjos que podem ser em série e/ou paralelo, depende da tensão de utilização e da corrente elétrica desejada. Para tanto é indispensável que se utilize um inversor que deve satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que não degrade a qualidade do sistema no qual se interliga o arranjo fotovoltaico.

**Célula fotovoltaica** - A conversão da energia solar em energia elétrica ocorre a partir da utilização de material semicondutor como elemento transformador, obtido pelo Processo Verde de Produção de Silício, através da utilização de insumos energéticos totalmente renováveis, o que garante um balanço favorável de carbono, com captura e armazenamento de CO<sub>2</sub> em todas as etapas. Atualmente, no Brasil, não existe a purificação de silício até o grau solar em nível comercial. Algumas empresas e grupos acadêmicos vêm desenvolvendo, em nível laboratorial, o processo de purificação através da rota térmica, ou metalúrgica, que envolve menor consumo de insumos energéticos, com resultados positivos sobre o custo final.

A produção de silício de grau metalúrgico, com 99% de pureza, consiste na mineração de formações rochosas, na forma de cristais de quartzo de alta pureza, e envolve elevados níveis de investimento e preparo técnico. Para a obtenção do silício de grau metalúrgico é necessário reduzir, em fornos elétricos, os cristais de quartzo, fazendo-os reagir com substâncias ricas em carbono, como carvão mineral ou vegetal. Para a obtenção do silício de grau solar existem duas diferentes rotas tecnológicas: a rota química ou tradicional, e a rota térmica ou metalúrgica.

As células fotovoltaicas podem ser constituídas de *wafers* ('fatias') de cristais de silício monocristalinos ou policristalinos. Os primeiros são cristais homogêneos, que resultam em células de alto rendimento energético, de produção mais difícil e mais cara. Já os policristalinos são peças com mais imperfeições, resultantes de mais de uma formação cristalina e, portanto, representam a parcela mais acessível de células solares. A principal tecnologia utilizada para a ob-

tenção do silício policristalino é a técnica de Bridgman, que envolve a fundição e a cristalização do lingote de silício de forma direcional em uma câmara.

A *wafers* obtida passa por um processo sequencial em que recebe a formatação final na célula fotovoltaica. Neste ponto, a célula é testada e incorporada ao módulo, que é montado usualmente na própria unidade de produção da célula, ou em unidades menores, próximas do mercado consumidor.

Os módulos fotovoltaicos protegem as células solares – que são conectadas em série, e às vezes também em paralelo, por pequenas tiras metálicas que fornecem também contatos externos –, encapsulando-as em materiais plásticos, normalmente EVA (acetato de vinil-etila). O lado exposto ao Sol é coberto com vidro temperado e antirreflexivo, e a parte posterior, revestida com plástico Tedlar®, vidro ou outro substrato. Uma caixa de junção é localizada normalmente na parte posterior do módulo, que, finalmente, é emoldurado com uma estrutura de alumínio anodizado, que lhe dá rigidez e proteção contra as intempéries.

**Inversores** – São dispositivos elétricos ou eletromecânicos capazes de converter um sinal elétrico CC (corrente contínua) variável produzido pelos módulos em sinal elétrico CA (corrente alternada), em tensão adequada (a mesma da rede elétrica) e com frequência e formato de onda o mais próximo da corrente da rede elétrica, no caso de sistemas interligados.

**Cabos** – São dimensionados de forma a reduzirem as perdas de potência nas instalações em função da distância entre as cadeias dos módulos fotovoltaicos e o inversor, tensão e/ou corrente. No lado da corrente contínua, os cabos geralmente têm seção transversal pequena, tipicamente entre 2,5 mm<sup>2</sup> e 10 mm<sup>2</sup>. Entre os módulos e os inversores e entre os inversores e o quadro de força devem existir esquemas de proteção, que são disjuntores, dispositivos de proteção contra surtos atmosféricos (DPS), chaves seccionadoras etc., empregados para proteger e isolar o sistema fotovoltaico para execução de reparos ou manutenção.

**Controladores de carga** – São dispositivos eletrônicos que operam a corrente contínua com a função primordial de administrar a carga e a descarga das baterias.

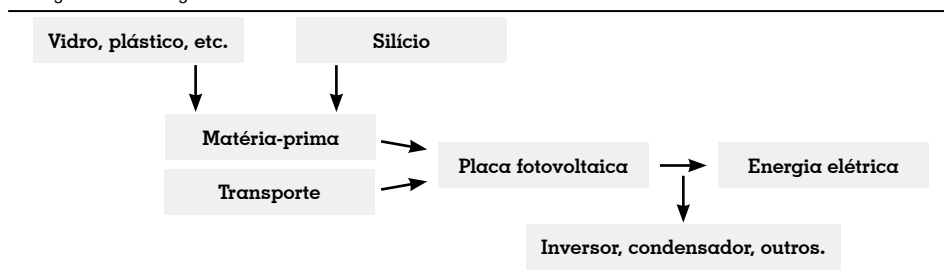
**Estrutura de suporte** – Normalmente são estruturas metálicas (alumínio anodizado ou aço inox) utilizadas para a fixação dos módulos nos telhados ou no solo.

A principal tecnologia utilizada para a obtenção do silício policristalino é a técnica de Bridgman, que envolve a fundição e a cristalização do lingote de silício de forma direcional em uma câmara

O princípio básico desta tecnologia é a utilização de uma superfície espelhada que reflete e concentra a irradiação solar direta num fluido que gera vapor d'água, que irá acionar o ciclo Rankine

Portanto, pode-se resumir o fluxo do processo na Figura 1:

**Figura 1**  
Fluxograma da energia solar fotovoltaica



Fonte: Elaboração própria.

## ENERGIA SOLAR TERMOSSOLAR

O princípio básico desta tecnologia é a utilização de uma superfície espelhada que reflete e concentra a irradiação solar direta num fluido que gera vapor d'água, que irá acionar o ciclo Rankine. As principais configurações de usinas termossolares são os concentradores cilíndrico-parabólicos (calhas) que focalizam o fluido térmico, o qual absorverá a energia da radiação solar, sendo bombeado para os trocadores de calor, onde essa energia absorvida será utilizada para o aquecimento e a vaporização da água, a ser usada posteriormente para a geração de energia através do conjunto turbina/gerador.

As usinas termossolares necessitam de um volume considerável de água para refrigeração do sistema e limpeza dos helióstatos. Assim, as áreas com baixa taxa de nebulosidade (característica de locais áridos) são as ideais para a instalação desses sistemas, mas devem ter disponibilidade hídrica suficiente para o funcionamento da usina, condições que nem sempre se obtêm simultaneamente.

**Concentradores cilíndrico-parabólicos (calhas)** - São espelhos côncavos em que, na linha focal, passa um tubo absorvedor de calor por onde circula um fluido térmico. Esse fluido, normalmente óleo sintético, tem grande capacidade térmica e é aquecido à medida que escoar pelo tubo, também chamado de HTF (sigla do termo em inglês *Heat Transfer Fluid*); é bastante poluente e, em caso de vazamentos, pode ocasionar impactos ambientais ao redor da usina. Finalmente, o fluido escorre para um trocador de calor (gerador de vapor) onde se gera o vapor d'água pressurizado que aciona o ciclo Rankine. Para aumentar a eficiência e a absorção da energia solar, os concentradores, juntamente com o tubo absorvedor, giram em torno do próprio eixo acompanhando a inclinação do Sol ao longo do dia. Essa movimentação faz com que seja necessária a utilização de juntas flexíveis nos tubos absorvedores. Os concentradores solares analisados possuem índices de eficiência que variam de 22% a 25% de aproveitamento da energia solar incidente.

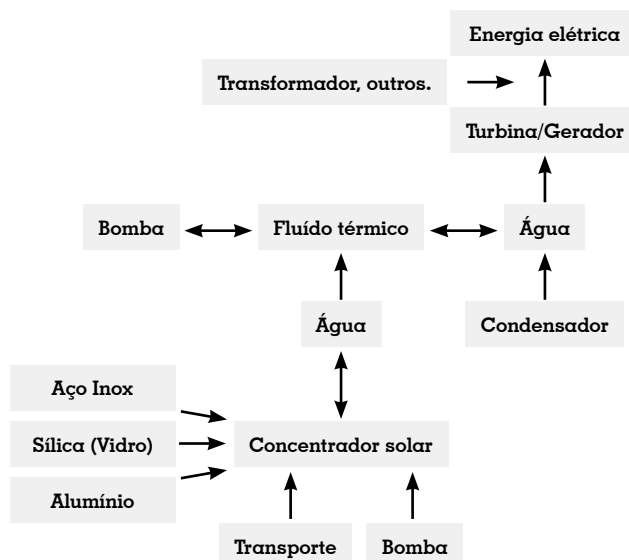
**Outros componentes das usinas** - Um conjunto turbogerador é constituído basicamente pelos seguintes equipamentos: 1) Turbina: responsável pela conversão termodinâmica da energia contida no vapor de alta pressão e temperatura em energia mecânica no seu eixo; 2) Redutor: responsável pela adequação da rotação nominal da turbina à velocidade síncrona do gerador; 3) Gerador: responsável pela conversão eletrodinâmica da energia mecânica do eixo da turbina em energia elétrica nos seus bornes; 4) Condensador: é um trocador de calor onde o vapor de exaustão da turbina é novamente convertido em água; 5) Torres de resfriamento: têm como função reduzir a temperatura da água de resfriamento que circula no condensador da turbina e em outros trocadores da central de geração, ou seja, é o elemento responsável pela rejeição de calor do sistema de geração para a atmosfera. A dissipação do calor nas torres é facilitada graças à forma construtiva destas, que possuem em seu interior um sistema de lâminas lisas que proporcionam uma distribuição uniforme da água, que cai por gravidade da parte superior das torres em contracorrente forçada com o ar puxado de baixo para cima por exaustores instalados no topo das mesmas; 6) Desaerador: é o equipamento responsável pela retirada de gases ( $O_2$  e  $CO_2$ ) dissolvidos na água oriunda do condensador da turbina, desempenhando, também, as funções de aquecimento da água de alimentação e de reservatório pulmão da caldeira. Sua operação garante o aumento da vida útil da caldeira, visto que toda tubulação estará menos sujeita à oxidação; 7) Água: serve para resfriamento das usinas, sendo que a vazão de circulação necessária para resfriamento é de  $55 \text{ m}^3/\text{h}$  para cada ciclo Rankine fechado.

A dissipação do calor nas torres é facilitada graças à forma construtiva destas, que possuem em seu interior um sistema de lâminas lisas que proporcionam uma distribuição uniforme da água

Portanto, pode-se resumir o fluxo do processo na Figura 2:

**Figura 2**

Fluxograma da energia solar termossolar



A metodologia desta pesquisa baseia-se em análise de dados secundários em artigos, livros e internet, sendo inteiramente norteada pela série de normas ISO 14040

## METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa baseia-se em análise de dados secundários em artigos, livros e internet, sendo inteiramente norteada pela série de normas ISO 14040 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009), sobre sistema de produção, direta ou indiretamente, da energia solar, tendo como unidade funcional 30 MW de energia elétrica produzida pelas fontes fotovoltaica e termossolar, e vida útil de 30 anos, sendo utilizadas duas análises de tipos de eficiência energética (ANGARITA et al., 2008). A primeira, denominada de eficiência global ou “eficiência energética do ciclo de vida”. E a segunda é o que se define como “relação energia fóssil”, também conhecida como relação energia renovável-energia fóssil ou relação output/input (ANGARITA et al., 2008).

A eficiência energética do ciclo de vida é a simples relação entre a energia total do combustível (energia produzida)<sup>1</sup> e a energia primária total<sup>2</sup>:

$$\text{Eficiência energética do ciclo de vida} = \frac{\text{Energia produzida}}{\text{Energia primária total}}$$

A relação de energia fóssil ou output/input mostra se a fonte de energia é renovável ou não. É definida pela relação entre a energia final produzida e o total de energia gasta durante todo o processo<sup>3</sup>.

$$\text{Relação output/input} = \frac{\text{Energia produzida}}{\text{Energia gasta no processo}}$$

Se esse índice for igual a 0 (zero), então o combustível é completamente não renovável, mas também não produz energia útil. Se o índice for igual a 1 (um), ainda assim o combustível é considerado não renovável. Um índice infinito indica que o combustível é completamente renovável e que qualquer valor maior do que 1 (um) reflete que ele é renovável num certo grau.

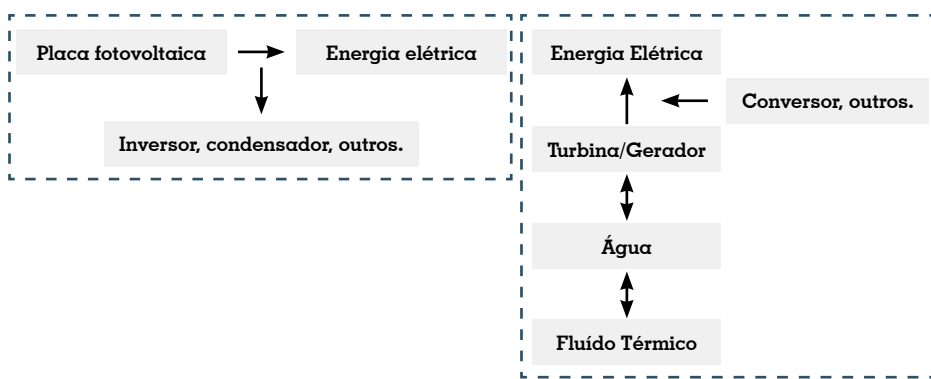
Para esta análise, foram utilizados dados secundários, obtidos na literatura específica do assunto, porém, rastrear uma vasta cadeia produtiva produziria inúmeros fluxos de materiais e energia, representando um enorme desafio. Neste sentido, foi apresentado o limite do sistema analisado nas figuras 3 e 4, para a energia solar fotovoltaica e termossolar.

- 1 É a energia contida no produto final e que está disponível para produzir trabalho em um motor.
- 2 É a energia que pode estar contida em toda matéria-prima extraída do ambiente. Na estimativa de energia primária total de todo o ciclo de vida de cada combustível são considerados os conteúdos energéticos de todos os recursos extraídos do ambiente.
- 3 É o maior subconjunto de energia primária. É toda energia utilizada no processo, excluindo-se a energia da matéria-prima, ou seja, é a energia extraída do ambiente necessária à extração e ao processamento da energia, que não é incorporada ao produto final.



**Figura 3 e 4**

Fluxogramas delimitando o sistema de análise para energia solar fotovoltaica e termossolar



Fonte: Elaboração própria.

## Características técnicas

**a) Arranjo fotovoltaico** - Foi definido um arranjo de 20 painéis/módulos em série por string, 13 strings em paralelo formando um painel, 18 mesas de painéis formando um arranjo, totalizando 30 arranjos. Assim, usinas com 30 MW contêm 30 arranjos. E assim por diante. Importante destacar que, para cada um destes arranjos, haverá após um inversor e um transformador para aumento da tensão, de 220 volts AC para 13,8 kV volts AC. O inversor, modelo E-FORCE PV-1000 (Magnetek), é o responsável pela conversão do sinal elétrico em corrente contínua (DC) do gerador fotovoltaico para um sinal elétrico em corrente alternada (AC), além de fornecer o ajuste necessário da frequência e do nível de tensão da rede.

**Módulo fotovoltaico** - A placa utilizada para a composição das mesas e, por fim, dos arranjos, será o modelo CHSM6609P Series, da Astronergy, composta de 54 células fotovoltaicas, conforme Tabela 1.

**Tabela 1**

Dados da placa solar

	Potência máxima	215 Wp
Número de células		54
Máxima tensão no sistema (células ligadas em série)		600 V
Corrente máxima		6,67 A
Tensão de circuito aberto		33,88 V
Corrente de curto circuito		8,53 A
Comprimento		1,50 M
Largura		0,99 M
Espessura		4,5 cm
Peso		18,00 Kg

Fonte: AcoSolar.<sup>4</sup>

Foi definido um arranjo de 20 painéis/módulos em série por string, 13 strings em paralelo formando um painel, 18 mesas de painéis formando um arranjo, totalizando 30 arranjos. Assim, usinas com 30 MW contêm 30 arranjos

4 Global AcoSolar é uma empresa online de distribuição e venda de equipamentos para instalação de projetos solares.

Cada campo fotovoltaico de 1 MW (1.095.120 Wp) é composto por 16 subcampos fotovoltaicos de 68,445 kWp, ou seja, 8.112 módulos fotovoltaicos

- **Inversor** - Para realizar a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede AC (ou carga AC) utilizar-se-á o inversor solar modelo E-FORCE PV-1000 da Magnetek, conforme dados de entrada e saída do inversor apresentados nas tabelas 2 e 3.

**Tabela 2**

Dados de entrada do inversor

Dados de entrada	
Faixa de tensão MPP	450 – 850 V
Corrente contínua máxima (Iccmax)	2302 A

Fonte: AcoSolar.<sup>5</sup>

**Tabela 3**

Dados de saída do inversor

Dados de saída	
Potência nominal	1000 KW
Corrente AC máxima	2396 A
Tensão AC nominal	265 V
Frequência AC nominal	50/60 Hz
Distorção Harmônica Total (THD)	< 5%
Fator de potência	± 0.95 (referente à pot. nominal)
Eficiência máxima (rendimento)	97.00%

Fonte: AcoSolar.

As estações de média tensão são equipadas pelo sistema de proteção e controle, para a conversão da corrente contínua (CC) em baixa tensão (450 a 820 V) gerada pelos campos fotovoltaicos de 1 MW, em corrente alternada (CA) a média tensão de 20kV. Cada campo fotovoltaico de 1 MW (1.095.120 Wp) é composto por 16 subcampos fotovoltaicos de 68,445 kWp, ou seja, 8.112 módulos fotovoltaicos. Portanto, com os módulos policristalinos acoplados ao sistema de rastreadores, a produtividade é de 1.999Wh/Wp/ano.

**Transformador** - Um sistema de corrente alternada opera, em cada uma de suas partes, com a tensão mais conveniente, tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico. Esta flexibilidade é obtida através dos transformadores, também chamados de trafos. Sendo um componente que transfere energia (potência) de um circuito elétrico para outro, o transformador toma parte nos sistemas de potência para ajustar a tensão de saída de um estágio do sistema à tensão de entrada do seguinte. O transformador poderá também assumir outras funções, como isolar eletricamente circuitos entre si, ajustar a impedância do estágio seguinte à do anterior, ou todas estas finalidades citadas ao mesmo tempo. O modelo ainda está em definição.

5 Global AcoSolar é uma empresa online de distribuição e venda de equipamentos para instalação de projetos solares. Mesma referência para a tabela 3.

## b) Arranjo termossolar

### Dados principais:

- Capacidade nominal de produção de vapor: 140 ton/h para cada uma
- Combustível utilizado: radiação solar
- Pressão nominal de operação da caldeira: 6,5 MPa
- Temperatura nominal do vapor produzido: 673K
- Potência nominal do turbogerador: 1 x 30 MW
  
- Tipo: condensação
  
- Medidas: comp. 2.5 m; larg. 1.5 m; alt. 2 m
  
- Peso: 4.500 kg
  
- Modelo: "MINI" / SST-050 (SANTOS, 2012)
  
- Eficiência da turbina solar: 30,6% (KALOGIROU, 2009)
  
- Redutor
  - Potência nominal: 1 x 30MW
  - Rotação eixo de alta: rotação da turbina
  - Rotação eixo de baixa: 1.800 rpm
  - Fator de serviço:  $\geq 1,2$
  
- Gerador
  - Potência nominal: 1 x 37,5MW
  - Fator de potência: 0,8
  - Tensão nominal: 13,8 kV
  - Frequência nominal: 60 Hz
  - Rotação: 1.800 rpm

### Localização do empreendimento

Para este artigo são levados em conta os índices de radiação solar, a oferta de água e a possibilidade de conexão ao sistema elétrico (região de consumo). O município de Itaguaçu da Bahia mostra-se como um dos melhores pontos para a instalação de usinas termossolares e, conseqüentemente, fotovoltaicas. A cidade está localizada a 475 km de Salvador. Saindo da capital, utiliza-se a BR-324 até Feira de Santana, em seguida passa-se a utilizar a BA-052, Estrada do Feijão. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Itaguaçu da Bahia contabilizou 13.209 habitantes para ano de 2010 (CENSO DEMOGRÁFICO, 2010).

O município de Itaguaçu da Bahia mostra-se como um dos melhores pontos para a instalação de usinas termossolares e, conseqüentemente, fotovoltaicas

O potencial de radiação solar da cidade de Itaguaçu da Bahia foi caracterizado com fator DNI (*Direct Normal Incidence*), Radiação Direta Normal de aproximadamente 6,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia

A partir da base de dados de medições solares do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito e Centro de Pesquisas de Energia Elétrica do Sistema Eletrobrás (2004) bem como as medições solares do Solar and Wind Energy Resources Assessment (SWERA) – Programa para o Meio Ambiente das Nações Unidas, o potencial de radiação solar da cidade de Itaguaçu da Bahia foi caracterizado com fator DNI (*Direct Normal Incidence*), Radiação Direta Normal de aproximadamente 6,1 kWh/m<sup>2</sup>/dia.

Com essa magnitude de radiação, e levando-se em conta os índices de nebulosidade da região em questão, torna-se viável a instalação de empreendimento termossolar e fotovoltaico de capacidade mínima de 30MW, conforme as figuras 5 e 6.

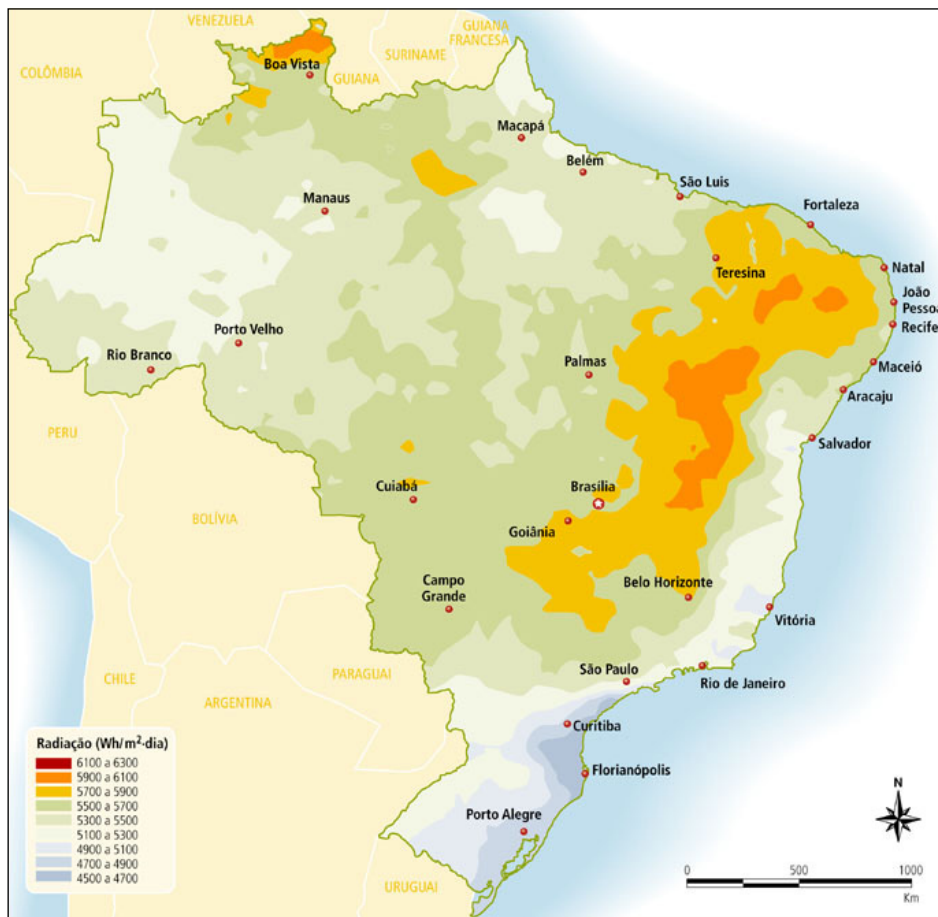
**Figura 5**  
Localização do município de Itaguaçu da Bahia



Fonte: Abreu (2006).

**Figura 6**

Média anual de insolação do Brasil (horas)



Fonte: Tiba (2000).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o estudo feito por Dones e Frischknech (1998), para a produção de um painel fotovoltaico foram considerados: a metalurgia do silício monocristalino (MG-Si) com um custo energético de produção de 14KWh/Kg; a produção de lâminas de silício de 0,67Kg, a um custo energético de 1,57KWh por cada unidade produzida; a confecção de células de 1,3KWh por cada célula produzida, e a energia de 11KWh para produzir um painel. Todos os valores em KW/h foram transformados em Megajoule (MJ) através do produto entre os valores em KW/h por 3,6, conforme dados da Tabela 4.

Todos os valores em KW/h foram transformados em Megajoule (MJ) através do produto entre os valores em KW/h por 3,6

Para a quantidade de energia a ser produzida, considerando um cenário de 30MW em 30 anos, torna-se necessário 29.160 células em um arranjo de 540 placas de 54 células cada uma, e peso de 18 Kg, conforme especificação técnica do fabricante

**Tabela 4**

Fase de extração e beneficiamento da matéria-prima para a produção do painel fotovoltaico

Matéria-prima	Quantidade	Energia (KWh)	Energia em MJ
MG-Si <sup>[5]</sup>	1 Kg	14	50,4
Produção de lâminas de silício <sup>[5]</sup>	0,67 Kg	1,57	5,7
Produção de células <sup>[5]</sup>	1	1,3	4,7
Produção de painel <sup>[5]</sup>	1	11	39,6

[5] Fonte: Dones e Frischknech (1998).

Para a quantidade de energia a ser produzida, considerando um cenário de 30MW em 30 anos, torna-se necessário 29.160 células em um arranjo de 540 placas de 54 células cada uma, e peso de 18 Kg, conforme especificação técnica do fabricante.

A Tabela 5 apresenta o cálculo do consumo energético da placa fotovoltaica no período de 30 anos.

**Tabela 5**

Energia consumida no processo de produção do módulo fotovoltaico

Matéria-prima	Quantidade total	EE(Mj)	EE(KWh)
Produção de célula	29.160	1.154.736	320,76
Produção de painel	540	21.384	5,94
Somatório		1.176.120	326,7

Fonte: Elaboração própria.

O trajeto a ser considerado é o transporte terrestre do painel, da cidade de São Paulo (SP) até o município de Itaguaçu da Bahia (BA), perfazendo um total de 1.470 Km, realizado por carreta com capacidade para 28t e gasto energético da ordem de 5,36 MJt Km (TAVARES, 2006). Na Tabela 6 encontram-se o cálculo do consumo energético do transporte da placa fotovoltaica.

**Tabela 6**

Energia consumida no transporte do módulo fotovoltaico

Fases	Componentes	Quantidade	EE (Mj)	EE (KWh)
Produção	Painel solar	540	1.176.12	326,7
Transporte	Painel solar	540	23.004	6,39
Somatório			24.180,12	333,09

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o estudo feito por Dones e Frischknech (1998), para a produção de um concentrador solar (calha) com capacidade para produzir 30MW de potência, foram considerados: a matéria-prima do aço inox refletivo e não reflexivo com um custo energético de produção de 15,7KWh/Kg (concentrador e suporte), o alumínio com custo energético de produção de 1,0 KWh/Kg (bordas do concentrador) e 1,3 KWh/Kg de cobre para o tubo focal. Todos os valores em KW/h foram transformados MJ através do produto entre os valores em KW/h por 3,6. Dados representados na Tabela 7.

**Tabela 7**

Fase de extração e beneficiamento da matéria-prima para produção do concentrador solar parabólico (calha)

Matéria-prima	Quantidade	Energia (KWh)	Energia em Mj
Aço inox <sup>[6]</sup>	0,58 Kg	15,7	57
Alumínio <sup>[6]</sup>	0,38 Kg	1	3,60
Silica (vidro) <sup>[6]</sup>	0,58 Kg	0,7	2,5
Cobre <sup>[6]</sup>	0,74	1,3	4,7
Produção do concentrador solar <sup>[7]</sup>	1	15	54

<sup>[6]</sup> Fonte: Dones e Frischknech (1998).<sup>[7]</sup> Kalogirou (2009).

O consumo energético do concentrador solar é de 74.520 Mj (EEMj = 74.520)

A quantidade de energia que o concentrador solar parabólico (calha), adquiridos em Nagoya (Japão), precisa para produzir 30MW é de, aproximadamente, 1.380 coletores, ou 476 fileiras (PÉREZ, 2011), com peso de 18 Kg, eficiência solar-elétrica de 15%, conforme especificação (KALOGIROU, 2009). Portanto, o consumo energético do concentrador solar é de 74.520 Mj (EEMj = 74.520).

Para o cálculo de transporte de produtos foi considerado o meio hidroviário, por navio de carga oceânico modelo Bulk Commodity Carrier/10000 to 20000dwt/Ocean (GLO), citado no estudo de Monteiro (2008), com consumo energético de 0,13MJtKm, (TAVARES, 2006), do porto de Nagoya (Japão) até o porto de Santos (SP), no Brasil, perfazendo 21.681,36 km. E deste, até a cidade de Itaguaçu da Bahia, conforme dados explicitados no cálculo para os painéis solares, porém, devido ao tamanho, à quantidade e à forma de armazenamento, estes valores serão multiplicados por dois, correspondendo ao número de viagens necessário ao transporte total de concentradores cilíndricos necessários ao projeto, conforme Tabela 8.

**Tabela 8**

Energia consumida no transporte do concentrador solar

Fases	Componentes	Quantidade	EE (Mj)	EE (Mj)
Produção	Concentrador solar	1378	74.412	20,67
Transporte terrestre	Concentrador solar	1378	58.704	16,31
Transporte hidroviário <sup>[8]</sup>	Concentrador solar	1378	863.976.438,08	239.993,45
Somatório			997.092.438,08	276.973.45

<sup>[8]</sup> Lacerda (2004).

Nota: Lacerda e sua posterior conversão em Km (uma milha náutica equivale a 1,852Km).

A quantidade de energia do sistema termossolar da turbina geradora para o cenário de produção de 30MW, com capacidade nominal de produção de vapor de 140 ton/h, peso de 4500 kg, Modelo: "MINI"/SST-050 da Siemens, tem eficiência estimada de 30,6%. O transporte da turbina geradora será realizado com as mesmas características descritas (origem, destino, distância e veículo) para a placa fotovoltaica, representadas na Tabela 9.

**A Relação de Energia Fóssil (REF) ou *output/imput* mostra se a fonte de energia é renovável ou não, sendo definida pela relação entre a energia final produzida e o total de energia gasta durante todo o processo**

**Tabela 9**

Energia consumida na produção e no transporte da turbina

Fases	Componentes	Quantidade	EE (Mj)	EE (KWh)
Produção	Turbina	1	98.039.216	27.233.116
Transporte terrestre	Turbina	1470	10.650,15	2.958,38
Somatório			98.049.866	30.191.491

Fonte: Elaboração própria.

O cálculo do consumo energético total para o sistema fotovoltaico, na produção do arranjo composto do total de placas solares formando o arranjo total, e do consumo do transporte necessário a sua implantação foi de 30.191.491 KWh. E o do sistema termossolar, formado com o arranjo total dos concentradores de energia e a turbina\gerador, foi de 307.161.612,23 KWh, conforme Tabela 10.

**Tabela 10**

Consumo energético total dos sistemas fotovoltaico e termossolar

Etapas	Consumo energético dos materiais (Mj)	Consumo energético do transporte (Mj)	Consumo energético total (Mj)	Consumo energético total (KWh)
Produção de arranjo fotovoltaico	1.176.120	1.199.124	2.375.244	659.790
Etapas	Consumo energético dos materiais (Mj)	Consumo energético do transporte (Mj)	Consumo energético total (Mj)	Consumo energético total (KWh)
Produção do arranjo termosol	74.412	922.680.438	997.092.438	276.970.121,67
Turbina\Gerador	98.039.216	10.650,15	108.689.366	30.191.490,56
Somatória			1.105.781,80	307.161.612,23

Fonte: Elaboração própria.

Para este cálculo foi considerada como energia produzida a energia requerida nos dados apresentados: 30 MW = 3000 KWh = 10.800 Mj, portanto, a Eficiência Energética do Ciclo de Vida (EECV) do sistema fotovoltaico é observada pela simples relação entre a energia total do combustível e a energia primária total (10.800 - 1.176.12 = -1.068.120 Mj ou 3.000 - 320.765.94 = - 2.679.234,06 KWh). Para o sistema termossolar, foram encontrados os seguintes resultados: 10.800 - 74.412 + 98.039.216 = - 98.102,828 Mj ou 3.000 - 20,67 + 27.233.116 = - 27.232.183 KWh. Dados demonstrados na Tabela 11.

A Relação de Energia Fóssil (REF) ou *output/imput* mostra se a fonte de energia é renovável ou não, sendo definida pela relação entre a energia final produzida e o total de energia gasta durante todo o processo que, para a o sistema fotovoltaico, foi de 10.800 - 23.004 = 12.204 Mj ou 3.000 - 6,39 = 2.993,61KWh. E, para o sistema termossolar, foi de 10.800 - 933.330.589 = - 922.530.58 Mj ou 3.000 - 242.968.132 = - 239.968.132 KWh. Dados resumidos na Tabela 11.



**Tabela 11**

Eficiência Energética do CV e da REF dos sistemas fotovoltaico e termossolar

Sistema	EECV		REF	
	EE (Mj)	EE (KWh)	EE (Mj)	EE (KWh)
Fotovoltaico	-1.068.120	-2.679.234,06	12.204	2.993,61
Termossolar	-64.451.216	-24.253.758	-825.330,589	-239.968.132

Fonte: Elaboração própria.

A análise dos resultados mostra que os dois sistemas são renováveis, porém, é preciso avançar tecnologicamente no mercado interno, o que alavancaria uma série de estudo mais aprofundados em busca de solução tecnológica nacional. O melhor aproveitamento da matéria-prima disponível no mercado interno e no meio ambiente e o incentivo à reciclagem de materiais por ora descartados, podem aumentar o passivo ambiental nas cidades, nas indústrias e no comércio.

A análise estabelece ainda que todo o processo precisa de melhorias contínuas, investimento e descobertas de novas matérias-primas, ou melhor, utilização das existentes, e a energia solar, seja ela fotovoltaica ou termossolar, precisa avançar muito neste quesito, pois, países que não dispõem das condições ambientais do Brasil estão na vanguarda de toda e qualquer alternativa renovável de energia. Atualmente, as políticas públicas de incentivos a fontes renováveis ainda são bem modestas no Brasil, que se aprimorou nas hidrelétricas, com soluções remotas e sistemas isolados de energia solar, precisando de um incentivo mais contundente e políticas mais audaciosas. Com mudança de paradigma, estas fontes se tornariam mais competitivas e melhor aproveitadas, a partir de uma gestão equilibrada dos custos de oportunidade associados a três objetivos fundamentais – disponibilidade de energia, proteção ambiental e crescimento econômico.

A maior dificuldade encontrada para aplicação da metodologia adotada é a carência de dados específicos e precisos sobre a temática ACV estudada, pois, quando se encontram os dados, estes diferem de autor para autor, sendo necessário citar a referência adotada e o equipamento utilizado, pois existe uma enorme variação de forma, tamanho e função dentro do mesmo sistema. Por tudo isso há prejuízo da análise já que esta também toca nos chamados segredos industriais, visto que determinado equipamento ou tecnologia não está disponível para consulta pública.

Atualmente,  
as políticas  
públicas de  
incentivos  
a fontes  
renováveis  
ainda são bem  
modestas no  
Brasil, que se  
aprimorou nas  
hidrelétricas,  
com soluções  
remotas e  
sistemas  
isolados de  
energia solar,  
precisando  
de um  
incentivo mais  
contundente e  
políticas mais  
audaciosas

## CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos no balanço energético do ciclo de vida, do ponto de vista da eficiência energética, a energia solar fotovoltaica e a termossolar são parecidas, consideradas renováveis, sendo que, para o sistema fotovoltaico, o maior consumo energético está no processo de fabricação das partes integrantes ao sistema, e para a termossolar, o maior consumo está justamente no transporte dos equipamentos e peças de suporte, pois, mais de 70% do peso do concentrador solar está na estrutura de suporte e não na parte de concentração de energia.

Duas preposições são de fundamental importância para o aumento da participação da energia solar na matriz energética: a) estudar a criação de incentivos fiscais e tributários para a modernização industrial e a eficiência energética; b) elaborar, em parceria com o setor industrial, programas focados na eficiência de processos térmicos industriais e em projetos de cogeração.

## REFERÊNCIAS

ABREU, R. L. Map locator of Bahia's Itaguaçu da Bahia city. Sept. 2006. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1132928>>. Acesso em: 5 de dez. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Geração distribuída amplia número de conexões em 2015. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=9044&id\\_area=](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9044&id_area=)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

ANGARITA, E. E. Y. et al. Produção de óleos vegetais e biodiesel: tecnologia e análise do ciclo de vida. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. (Org.). Biomassa para energia. Campinas, SP: UNICAMP, 2008. p. 531-568.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de micro geração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 19 abr. 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2017.

CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 5 dez. 2017.

CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro: CRESESB, 2004. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2004.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf)>. Acesso em: 5 dez. 2017.

DONES, R.; FRISCHKNECH, R. Life-cycle assessment of photovoltaic systems: results of swiss studies on energy chains. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 117-125, Mar./Apr. 1998.

HOLDREN, J. P.; SMITH, K. R. Energy, the environment and health. In: UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. World energy assessment: energy and the challenge of sustainability. New York: UNDP, 2000. chap. 3, p. 65-104.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Trends in photovoltaic applications: survey report of selected IEA countries between 1992 and 2010. Paris: IEA, 2011. Disponível em: <[http://www.ieapvps.org/index.php?id=1&elD=dam\\_frontend\\_push&docID=898](http://www.ieapvps.org/index.php?id=1&elD=dam_frontend_push&docID=898)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

KALOGIROU, S. A. Solar energy engineering: processes and systems. San Diego, EUA: Academic Press Elsevier, 2009.

LACERDA, S. M. Navegação e portos no transporte de contêineres. Revista do BNDES, Rio de Janeiro, v.11, n. 22, p. 215-243, dez. 2004. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/.../bndes.../revista/rev2209.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

MONTEIRO, M. F. Avaliação do ciclo de vida do fertilizante superfosfatado simples. 2008. 179 f. Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008. Disponível em: <[http://www.teclim.ufba.br/site/material\\_online/dissertacoes/dis\\_marcio\\_monteiro.pdf](http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_marcio_monteiro.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

PÉREZ, M. S. Planta solar termoeétrica de 50MW com coletores cilindro-parabólicos em Sonora-México-I. [S.l.: s.n.], Mayo 2011. Disponível em: <<http://renewablengineering.blogspot.com.br/2011/05/planta-solar-termoelectrica-de-50-mw.html>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

REIS, L. B. dos; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável. São Paulo: Manole, 2005. p. 59-95.

REN21. Renewables 2015: global status report. 2015. Disponível em: <[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN21-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN21-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf)>. Acesso em: 5 dez. 2017.

RIBEIRO, C. M. Universalização do serviço de energia elétrica, eletrificação rural e o papel da energia solar fotovoltaica. In: TOLMASQUIM, M. T. Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil. Rio de Janeiro: Relume Dumará: COPPE: Cenergia, 2004.

SANTOS, J. B. Energy power generation. 2012. Disponível em: <<http://www.siemens.co.ao/pool/events/connect-to-siemens-angola/produthoo-e-gerathoo-de-energia.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

TAVARES. S. F. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. 2006. 225 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

THOMAS, M. G.; POST, H. N.; DEBLASIO, R. Photovoltaic systems: an end-of-millennium review. Progress in Photovoltaics West Sussex, UK, v. 7, p. 1-19, 1999. Disponível em: <[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-159X\(199901/02\)7:1%3C1::AID-PIP251%3E3.O.CO;2-X/full](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-159X(199901/02)7:1%3C1::AID-PIP251%3E3.O.CO;2-X/full)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

TIBA, C. (Coord.). Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2000. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. Estudos avançados, São Paulo, v. 26, n. 74, 2012. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10636/71178>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil. Rio de Janeiro: Relume Dumará: COPPE: CENERGIA, 2004.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UDO DE HAES, H. A. et al. Life-cycle impact assessment: striving towards best practice. Flórida, USA: SETAC, 2002. 272 p.

UTGIKAR, V.; THIESEN, T. Life cycle assessment of high temperature electrolysis for hydrogen production via nuclear energy. International Journal of Hydrogen Energy, [S.l.], v. 31, n. 7, p. 939-934, June 2006.