

ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESÍDUOS GERADOS POR UM SISTEMA FOTOVOLTAICO E UM SISTEMA TERMOELÉTRICO NO BRASIL

Marina Monteiro Lunardi – marinamlunardi@gmail.com

Fernando Soares dos Reis – f.dosreis@gmail.com

Aline Cristiane Pan – aline.pan@puccrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física e Faculdade de Engenharia

Resumo. A indústria de gestão de resíduos se torna cada vez mais importante devido à crescente responsabilidade ambiental e ao estabelecimento de regulamentos rigorosos. Além disso, há uma demanda crescente de eletricidade e um consequente desenvolvimento de novas tecnologias. Estes são os principais fatores que estimulam a pesquisa na área de energias renováveis. Neste cenário, a energia solar fotovoltaica revela-se como uma excelente alternativa para produção de energia elétrica. Este artigo objetiva analisar o processo industrial utilizado para produzir eletricidade através de módulos fotovoltaicos e comparar seus impactos com os ocorridos pela produção de energia em sistemas termelétricos. Através desta análise observou-se que os módulos solares geram uma quantidade insignificante de resíduos, mas que deve ser observada. Por outro lado, as usinas termelétricas, além de usarem uma matéria-prima não renovável, também geram quantidades alarmantes de efluentes líquidos, resíduos sólidos e, principalmente, gases de efeito estufa (GEE). No entanto, cada GWh de eletricidade produzido pela tecnologia solar fotovoltaica evita a emissão de toneladas de GEE. Através desta comparação observa-se que há uma vantagem significativa no uso de energia solar fotovoltaica. Afinal, o impacto ambiental da sua produção e uso é mínimo, tornando este tipo de energia uma tecnologia ambientalmente amigável. Analisando os resultados desta comparação, nos deparamos com dados preocupante como o fato de que o Brasil lança por ano 4,5 milhões de toneladas de carbono na atmosfera e que, com a construção de novas termelétricas, esse indicador chegará a 16 milhões até o final de 2015. Assim, a energia solar fotovoltaica se encaixa perfeitamente nos padrões de sustentabilidade que são hoje o foco principal tanto para a indústria como para o bem-estar da sociedade no Brasil e no mundo.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica, Usinas Termelétricas, Impacto Ambiental

1. INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica é um dos requisitos básicos de cidadania quando se fala em desenvolvimento social. Neste contexto a busca por novas tecnologias e diferentes fontes de energia faz-se imprescindível. Além disso, torna-se cada vez mais importante a fusão entre infraestrutura e meio ambiente, em busca de um desenvolvimento sustentável que tenha o menor impacto ambiental possível (Reis e Santos, 2015). Por outro lado, as tecnologias de transformação de energia que utilizam fontes não renováveis ainda são amplamente utilizadas no mundo. O carvão, que é a matéria prima das usinas termelétricas, atualmente atende a aproximadamente 40% da necessidade de eletricidade do mundo. É a segunda fonte de energia primária mais utilizada, depois do petróleo, e a primeira fonte de geração de energia elétrica. Desde o início do século 21, é a fonte de energia global que mais cresce. Este crescimento tem sido impulsionado pelo rápido desenvolvimento dos países emergentes, tal como a China (International Energy Agency (IEA), 2013). A projeção para 30 anos é de que estes dados se mantenham aproximadamente iguais (Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 2008).

Atualmente o Brasil possui um total de 4.245 empreendimentos produtores de energia elétrica em operação, totalizando 138.296.152 kW de potência instalada. Nos próximos anos a previsão é de que exista um aumento de 41.232.382 kW na capacidade de geração do País, pois estima-se que existam atualmente 182 empreendimentos em construção e mais 711 em empreendimentos com construção ainda não iniciada (ANEEL, 2015).

Independentemente dos benefícios econômicos, o impacto ambiental da utilização de carvão, principalmente quando se fala em emissões de dióxido de carbono (CO₂), não deve ser negligenciado. Apesar dos esforços positivos para a construção de usinas mais eficientes, para adaptar as plantas antigas e para a desativação das mais velhas — e menos eficientes — o ritmo atual está longe de ser o necessário. A captura e armazenamento de carbono é a tecnologia mais promissora para diminuir a quantidade de emissões de CO₂ a partir de grandes fontes, como as termelétricas. Porém, o desenvolvimento e a implementação desta tecnologia estão longe do nível necessário para manter as emissões de CO₂ em níveis aceitáveis (IEA, 2013).

Em oposição a esta situação, a preocupação mundial com o meio ambiente, a demanda crescente por eletricidade e o progresso constante da tecnologia são os principais fatores que estimulam a busca pela utilização de fontes renováveis de energia e as pesquisas nesta área. As técnicas de captura e utilização de radiação solar como fonte de energia elétrica são muito estudadas hoje e estão avançando consideravelmente (Lamont, 2012).

A energia solar fotovoltaica é um bom exemplo, esta aproveita a energia do sol convertendo de forma direta a radiação solar em eletricidade sem qualquer motor térmico (Pan *et al.*, 2010). O dispositivo que realiza esta conversão é a célula solar. Estes dispositivos têm uma vasta gama de aplicações, o que aumenta ainda mais a sua demanda (Paridaa

et al., 2011). A célula solar é um dispositivo semicondutor, comumente constituído de silício, que quando exposto à radiação solar gera uma diferença de potencial, o que resulta na produção de energia elétrica. Para seu emprego prático, as células solares são geralmente associadas eletricamente em série e encapsuladas. O conjunto de células, conexões e estrutura de proteção denomina-se módulo fotovoltaico. O tempo de vida médio dos módulos fotovoltaicos pode ser superior a 25 anos (Klugmann-Radziemska e Ostrowski., 2010), ou seja, o seu impacto ambiental quando avaliado para este período é pequeno.

Os módulos fotovoltaicos já são muito populares em países como Estados Unidos, Japão e Alemanha (Makridesa *et al.*, 2010). Atualmente, observa-se que o mercado de energia solar fotovoltaica está crescendo rapidamente (Razykova *et al.*, 2011). Há mais de 10 anos consecutivos é uma das indústrias que mais cresce no mundo, tendo taxas de crescimento anual acima de 40% ao ano. Nos últimos cinco anos este crescimento foi mais rápido na Ásia, onde a China e Taiwan juntos foram responsáveis por quase 60% da produção mundial em 2012 (Jäger-Waldau, 2012). No entanto, ainda há muito desenvolvimento que pode ser feito nesta área durante o próximo século para aumentar e melhorar estas tecnologias e seus processos de fabricação (Lamont, 2012).

Por ser uma tecnologia nova e promissora, é importante que se façam comparações com as tecnologias já utilizadas e aceitas pela sociedade. Desta forma é possível mostrar que uma fonte renovável pode ser tão eficiente quanto uma não renovável, e ainda ser ambientalmente correta, não só por utilizar matérias primas renováveis como também por ter processos de produção mais limpos e que gerem menos resíduos.

Para garantir que a uma fonte de energia se torne sustentável em um mercado competitivo, esta deve fornecer abundante energia elétrica a preços acessíveis, com impactos ambientais drasticamente inferiores aos de tecnologias convencionais (Fthenakis, 2009.). Por isso, a importância de se estudar novas formas de produção de energia elétrica que possam substituir as atuais sem prejuízos à sociedade, e com vantagens ambientais consideráveis através de uma análise dos resíduos gerados pela sua produção e utilização.

Sendo assim, o presente artigo tem como objetivo analisar o processo industrial utilizado para produção de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos e comparar os resíduos gerados — desde o processo produtivo até a geração de energia propriamente dita — com os da produção de energia através de sistemas termoeletrônicos que utilizam como matéria prima o carvão.

2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A tecnologia fotovoltaica é utilizada para captar a radiação solar e convertê-la em eletricidade. Esta produção de energia elétrica é ambientalmente vantajosa, porque seu fornecimento de energia é inesgotável, o Sol. O dispositivo que realiza esta conversão é a célula solar. As células solares fotovoltaicas são tipicamente constituídas por um material semicondutor nos quais geralmente existe uma junção pn. Quando a radiação solar incide neste dispositivo, com uma junção pn que se encontra conectada a uma carga externa, a absorção dos fótons resulta na criação de pares elétron-lacuna em excesso. O campo elétrico criado pela junção pn faz com que os elétrons em excesso migrem para a região n e as lacunas para a região p. Essa separação de cargas resulta em uma diferença de potencial na junção e uma circulação de corrente no circuito externo. Nestas condições de funcionamento, a célula solar comporta-se como um produtor de energia (Mulvaney *et al.*, 2009).

Atualmente as principais tecnologias utilizadas nas células fotovoltaicas são: silício cristalino (mono e policristalino), silício amorfo, filme fino de telúrio de cádmio (CdTe) e película fina (LU; PENG; YANG, 2013). O tipo de célula solar mais comumente fabricada hoje é a monofacial de silício cristalino (mono ou multicristalino) de estrutura n^+pp^+ , ou seja, aquela que tem a região frontal da célula dopada com fósforo (n^+) e a região posterior (p^+) dopada com alumínio (*back surface field* - BSF). O resumo de um o processo industrial típico está mostrado na Fig. 1 (Marcolino; Moehlecke; Zanesco, 2013). Depois de prontas as células solares são agrupadas e soldadas, formando o módulo fotovoltaico. Um módulo fotovoltaico convencional típico é constituído de 36 células associadas em quatro séries. Para a formação do módulo fotovoltaico as células solares prontas são soldadas em tiras através de um processo de iluminação com lâmpadas halógenas de alta potência que aquecem estas células junto com fitas de metal (cobre/estanho/prata). Já soldadas, são encapsuladas com o objetivo de protegê-las das intempéries e proporcionar resistência mecânica ao módulo. O encapsulamento é constituído de um sanduíche de vidro, acetato de etil-vinila (EVA), células solares, EVA novamente e filme plástico posterior (Tedlar® + poliéster), conforme ilustra a Fig. 2. Este processo é realizado a temperaturas nas quais o EVA torna-se líquido ocorrendo a geração de bolhas, estas são extraídas por uma bomba de vácuo. Depois deste processo, coloca-se um marco de alumínio e a caixa de conexão e, então, o módulo fotovoltaico está pronto para ser testado e posteriormente utilizado (Moehlecke e Zanesco, 2006).

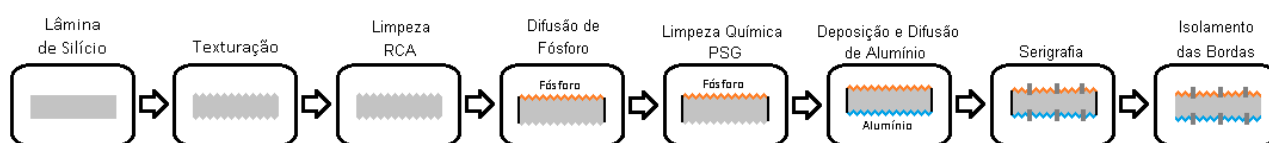


Figura 1 - Resumo do processo de produção das células solares de silício (Moehlecke e Zanesco, 2006).

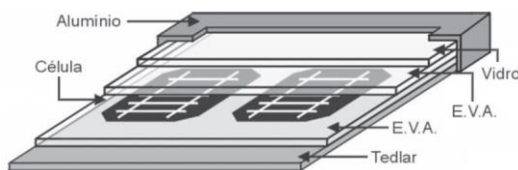


Figura 2 - Constituição do módulo fotovoltaico (Moehlecke e Zanesco, 2006).

A primeira etapa do processo é a mineração das matérias-primas (quartzo para células de silício), seguida pelo seu tratamento e purificação. A sílica (proveniente do quartzo) é reduzida em um forno até atingir o grau metalúrgico (SGM), este processo é conhecido com processo Siemens (Fthenakis et al., 2008). Para atingir um grau mais puro e poder ser utilizado na fabricação de células solares, o silício já tratado passa por mais um processo de purificação até atingir o grau eletrônico (SGE). Neste caso o método mais comumente utilizado é o Czochralski (Cz) (Wenham e Green; 1996). Contudo, as etapas de extração e tratamento do silício não serão consideradas nesta pesquisa. Pois, estas etapas se diferem para os diferentes substratos (monocristalino ou multicristalino) e técnicas de obtenção (Cz, FZ, cinta).

Durante o processo de fabricação das células solares há geração de alguns resíduos líquidos, porém existem ações que podem ser tomadas para que este impacto seja minimizado ou até mesmo eliminado. Como utilizar as práticas operacionais adequadas, incluindo o uso racional da água, medidas de segurança, práticas de eliminação de resíduos, uso de produtos químicos biodegradáveis. Além de focar na melhoria contínua dos processos (Tsoutsos; Frantzeskaki; Gekas, 2005). A etapa que pode ser preocupante em relação à geração de resíduos desta tecnologia é a de desativação dos módulos. O tempo de garantia dado pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos é de aproximadamente de 25-30 anos, mas sabe-se que não existe um tempo limite para a degradação dos mesmos. Logo, pode-se ter um módulo ativo por um tempo superior a este. Além disso, já existem tecnologias que conseguem reciclar este resíduo industrial e utilizar os materiais novamente no caso de estes chegarem ao fim de sua vida útil (Sharma *et al.*, 2009). Este fator tem ganhado grande importância nas pesquisas nesta área, pois com o aumento da demanda e o conseqüente crescimento na quantidade de módulos solares fabricados a quantidade de resíduos gerados também é maior (Appleyard, 2009).

Sendo assim, podemos dizer que a tecnologia fotovoltaica tem vantagens ambientais em relação os modos convencionais de obtenção de energia. Quando já em uso, os sistemas fotovoltaicos não produzem qualquer ruído, emissões de gases tóxicos ou de efeito estufa. A energia fotovoltaica, não só pode ajudar a atender à crescente demanda mundial por energia elétrica, como pode fazê-la sem causar prejuízos ambientais e econômicos (Tsoutsos; Frantzeskaki; Gekas, 2005).

Com a evolução desta tecnologia a questão econômica também está melhorando e se torna mais um atrativo para o consumo desta energia. Há uma constante redução do consumo de silício, uma melhoria da eficiência da célula e da tecnologia de produção de silício grau solar, o que impacta diretamente na redução do custo dos módulos fotovoltaicos. Igualmente, com o desenvolvimento desta tecnologia além de reduzir custos também irá resultar em uma diminuição no tempo de retorno do investimento de um sistema fotovoltaico (Alsema e Scholten, 2007).

3. ENERGIA TERMOELÉTRICA

A energia elétrica produzida em uma usina termelétrica é gerada a partir da queima de carvão, óleo combustível ou gás natural em uma caldeira projetada para esta finalidade específica. O funcionamento das centrais termelétricas é semelhante, independentemente do combustível utilizado na queima. Uma central nuclear também pode ser considerada uma central termelétrica, onde o combustível é um material radioativo que, em sua fissão, gera a energia necessária para seu funcionamento (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

O funcionamento de uma usina termelétrica é simples (Fig. 3). O combustível é armazenado em parques ou depósitos e posteriormente enviado para a usina onde será queimado na caldeira. Este processo gera vapor a partir da água que circula por uma extensa rede de tubos que revestem as paredes da caldeira. A função do vapor é movimentar as pás de uma turbina, cujo rotor gira juntamente com o eixo de um gerador que produz a energia elétrica, ou seja, transforma energia mecânica em energia elétrica. Essa energia é transportada por linhas de alta tensão aos centros de consumo. O vapor é resfriado em um condensador e convertido outra vez em água, que volta aos tubos da caldeira, dando início a um novo ciclo. A água em circulação que esfria o condensador expulsa o calor extraído da atmosfera pelas torres de refrigeração, grandes estruturas que identificam essas centrais. Parte do calor extraído passa para um rio próximo ou para o mar (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

Para minimizar os efeitos contaminantes da combustão sobre as redondezas, uma usina termelétrica deve possuir uma chaminé de grande altura (aproximadamente 300 m) e de alguns precipitadores que são utilizados para reter as cinzas e outros resíduos voláteis da combustão. As cinzas são recuperadas para aproveitamento em processos de metalurgia e no campo da construção, onde são misturadas com o cimento. Como o calor produzido é intenso, devido às

altas correntes geradas, é importante o resfriamento dos geradores. O hidrogênio é melhor veículo de resfriamento que o ar; como tem apenas um quatorze avos da densidade deste, requer menos energia para circular. Recentemente, foi adotado o método de resfriamento líquido, por meio de óleo ou água. Os líquidos nesse processamento são muito superiores aos gases, e a água é 50 vezes melhor que o ar (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

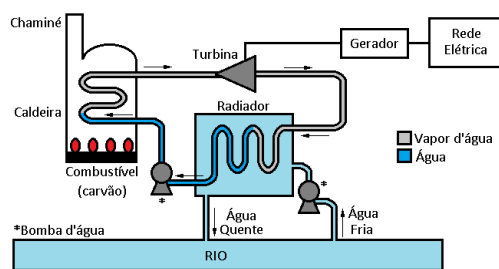


Figura 3 - Esquema do funcionamento de uma usina termoeletrica a carvão (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

Ainda que em fase de pesquisa, outros tipos de tecnologias para produção de eletricidade através de termoeletricas estão sendo desenvolvidas. O objetivo é melhorar o rendimento na combustão do carvão e diminuir o impacto sobre o meio ambiente, sendo as centrais de combustão de leito fluidificado um exemplo. Nessas centrais, queima-se carvão sobre um leito de partículas inertes (por exemplo, de pedra calcária), através do qual se faz circular uma corrente de ar que melhora a combustão (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

Como todas as fontes não-renováveis de geração de energia elétrica, a termoeletricidade causa impactos ambientais. O impacto ambiental mais importante desta forma de geração de energia é o aquecimento global causado pelas emissões de gases na atmosfera. Gases como metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3), clorofluorcarbonos (CFCs) e, principalmente, CO_2 absorvem a radiação infravermelha gerada pela radiação visível do sol que atinge a terra. Essa absorção e reirradiação impedem que parte do calor seja liberada ao espaço, causando o aumento da temperatura na superfície da Terra, ou seja, o aquecimento global (Ottinger *et al.*, 1991).

O Brasil lança por ano 4,5 milhões de toneladas de carbono na atmosfera, com o incremento na construção de usinas termoeletricas, esse indicador chegará a 16 milhões até 2015. Atualmente, as termoeletricas apresentam um alto custo de operação, em virtude do dinheiro utilizado na compra de combustíveis (Borba; Eugênio; Franklin, 2012).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Brasil existem diversas leis, resoluções e decretos que estabelecem padrões para o descarte de efluentes de qualquer natureza. Os padrões de lançamento de efluentes são propostos através da Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, complementares à Resolução 357, de 17 de março de 2005, e 397, de 03 de abril de 2008, sobre condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2011).

Considerando um módulo solar com 72 células solares de silício ($1,25 \text{ m}^2$ por módulo solar), formado de um sanduíche de vidro, EVA, Tedlar e emoldurado por bordas de alumínio e utilizando como base a análise feita em um tempo de vida de 30 anos tem-se que, para o processo de fabricação das células solares, os efluentes líquidos gerados não apresentam significativos impactos sobre o meio ambiente. Podendo ser, posteriormente a um tratamento, lançados na rede pública ou em quaisquer corpos d'água sem alterar a fauna e a flora existentes. A maior parte dos fabricantes de módulos fotovoltaicos não produz por si só todos os componentes. Materiais como vidro, alumínio e cobre são produzidos em processos convencionais por fabricantes tradicionais. Estes processos já estão desenvolvidos e definidos, ou seja, melhorias de eficiência na fabricação são difíceis de alcançar por estes processos serem considerados como praticamente ideais (Alsema e Scholten, 2006).

Nas usinas termoeletricas são gerados efluentes líquidos no sistema de refrigeração, no sistema de tratamento de água, na purga das caldeiras, efluentes da drenagem do estoque de carvão e devido aos líquidos para limpeza de equipamentos (Reis, 2001). O impacto maior em relação aos efluentes líquidos ocorre no sistema de refrigeração. A água de circulação das torres de resfriamento pode conter sais, o que gera incrustação nas paredes da torre, dificultando o processo de resfriamento. Por isso aproximadamente 20% do volume de água captado é descarregado no fundo da torre. Esta descarga, que apresenta uma alta concentração de sólidos dissolvidos, além das impurezas provenientes dos produtos químicos utilizados no processo, necessita de uma medição adequada para determinar o tratamento adequado (Departamento Técnico De Olade, 1993).

Também são gerados efluentes da drenagem do estoque de carvão. A ação da chuva sobre os estoques de carvão ao ar livre oxida a pirita (composto de ferro e enxofre) presente, gerando uma drenagem altamente poluidora, com elevados teores de sólidos em suspensão e baixo pH, o que favorece a lixiviação (dissolução) dos elementos menores associados ao carvão. Além disso, são também gerados efluentes do arraste mecânico ou hidráulico e da disposição das

cinzas. Quando utilizado o arraste hidráulico para extrair as cinzas de fundo da caldeira, a água utilizada nesse processo deve ser tratada adequadamente ou pode se constituir em outro efluente poluidor. A disposição de cinzas em aterros também apresenta potencial poluidor, pois as cinzas tanto podem ser arrastadas pelas águas superficiais, quanto lixiviadas pela água da chuva percolada, arrastando para o lençol freático, substâncias eventualmente tóxicas que por esse meio podem atingir os mananciais de abastecimento rural ou urbano (Tissot e Missel, 2010).

A emissão de CO₂, principal contribuinte ao aquecimento global através do efeito estufa, começou a aumentar nos anos de 1800 com a conversão de florestas em área para agricultura, mas houve uma aceleração grande a partir de 1950, devido principalmente a combustão de combustível fóssil (CONAMA, 2011). Segundo o CONAMA, na resolução 03/1990 (Art. 1º), "são padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral". Algumas emissões gasosas são consideradas como "poluentes atmosféricos", por terem efeitos prejudiciais na saúde humana e no meio ambiente. Dentre eles se destacam o CO, CO₂, O₃, MP, NO₂ e SO₂. (Santana *et al.*, 2012). Logo, a queima do carvão nas usinas termoeletricas lança na atmosfera grandes quantidades de poluentes, além de ser um combustível fóssil que não se recupera.

A geração de eletricidade baseada em combustíveis fósseis tipicamente emite entre 400-1000 gCO₂-eq/kWh, dependendo do tipo de combustível e da eficiência da usina. Em um recente estudo sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionados a células solares fotovoltaicas, foi estimado que há uma geração de 52 ± 29 gCO₂-eq/kWh (Hsu *et al.*, 2012). Estes valores confirmam o potencial de redução de emissão de CO₂ da tecnologia fotovoltaica (Arvesen e Hertwich, 2012). A Fig. 4 mostra uma comparação feita entre cinco tipos mais comuns de geração de energia elétrica em relação as suas emissões de gás carbônico separando as fontes em quatro aspectos: Produção de combustível, transporte, operação e materiais. Nesta figura fica bem clara a diferença entre a utilização do carvão e das células solares como fonte de produção de energia elétrica (Fthenakis e Kim, 2011).

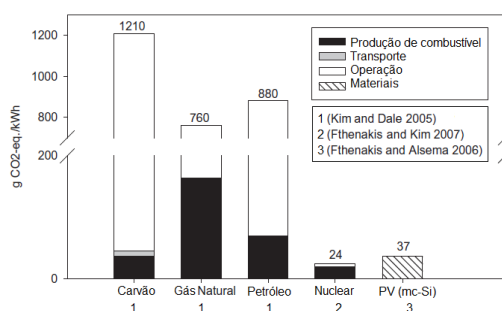


Figura 4 - Comparação das emissões de GEE entre PV e formas de geração de energia Convencionais (assumindo como base o Sul Europeu e uma ensolacao de 1700 kWh/m²/ano e desempenho da celula de 0,75 para a energia solar - PV) (Fthenakis e Kim, 2011).

Outra emissão de gás preocupante é a de óxidos de enxofre (SO_x), também gerada na combustão do carvão. O enxofre existente no carvão transforma-se em óxidos de enxofre durante sua combustão. Na atmosfera o SO₂, por exemplo, volta a se oxidar dando origem a sulfatos e ao ácido sulfúrico que, dependendo da concentração, pode ser responsável pelo surgimento de chuvas ácidas e diminuição da visibilidade. Uma solução para estas emissões são os lavadores de gases. A dessulfurização (remoção de gás por via úmida) é uma tecnologia largamente empregada no mundo todo para controle da emissão de óxido de enxofre. A neutralização deste gás é feita por meio de um processo químico que se baseia na injeção de reagentes básicos pode ser realizada utilizando como reagente materiais alcalinos como: magnésio, amônia ou calcários (Tissot e Missel, 2010).

Em relação a queima de carvão, cada gigawatthora (GWh) — que é o consumo de energia para alimentar uma carga de potência de 1 watt pelo período de um hora — de eletricidade gerada por energia fotovoltaica evitaria a emissão de cerca de 10 toneladas de SO₂, 4 toneladas de NO_x e até 1.000 toneladas de CO₂, além de 0,7 toneladas de partículas sólidas (incluindo 1 kg de cádmio e 120 kg de arsênio) (Fthenakis e Moskowitz, 2000). Em relação aos resíduos sólidos industriais, segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), estes são todos os resíduos no estado sólido ou semissólido resultantes das atividades industriais, incluindo lodos e determinados líquidos, cujas características tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água ou que exijam para isso soluções técnica e/ou economicamente inviáveis. Além disso, o CONAMA (CONAMA, 2002) considera que a disposição inadequada de resíduos sólidos constitui ameaça a saúde pública e agrava a degradação ambiental, comprometendo a qualidade de vida das populações.

A produção de resíduos sólidos na tecnologia fotovoltaica é pequena, mas acontece. No transporte dos módulos, principalmente, algumas peças podem ser danificados e se tornam inutilizáveis. Porém já existe uma solução para este tipo de resíduos que é a reciclagem dos módulos fotovoltaicos de células solares de silício, que já é feito na Europa. Este método é realizado pelas empresas associadas à PV CYCLE (PV CYCLE, 2011) e baseia-se nos processos de uma

linha de reciclagem plana. No primeiro passo as molduras de alumínio e as caixas de junção dos módulos são removidas em um processo manual. Posteriormente este resíduo é, então, colocado em uma máquina trituradora. Este processo inclui uma pré-triagem manual, o esmagamento de laminados e a separação e extração de materiais. Os materiais da linha de reciclagem são separados na saída do equipamento de acordo com as suas frações de materiais como metais, plásticos, ferro, alumínio, a célula solar e a sucata de vidro. A linha de reciclagem dos módulos requer uma energia para executar os processos (triturador, transportadores, moinho de martelo, compressor). A energia elétrica necessária é fornecida pela rede elétrica local através da geração fotovoltaica conectada à rede. Além disso, pequenas quantidades de espuma de sabão orgânico são utilizadas para reduzir a geração de poeira nos processos de trituração (Fraunhofer IBP, 2012).

Um dos impactos mais importantes das usinas termoelétricas em relação aos resíduos sólidos são as cinzas produzidas na queima do carvão. A produção de cinzas depende da qualidade do carvão utilizado e a sua deposição em bacias de estocagem leva a problemas estéticos, ocupação de terras e contaminação do solo e lençol freático (Almeida; Aguiar; Rodrigues, 2005). As cinzas podem ser leves (ou volantes) e/ou pesadas. As cinzas podem ser removidas por via hidráulica (cinza pesada) e/ou pneumática (cinza leve) para o local de disposição, o que deve ser projetado de maneira a permitir o confinamento e evitar a lixiviação de circunstanciais elementos tóxicos presentes nas mesmas. Além disso, a ação do vento nas pilhas de carvão e depósitos de cinzas pode gerar emissões de poeiras (Tissot e Missel, 2010). O problema das cinzas pode ser solucionado através da utilização de filtros. O principal tipo de filtro utilizado é o Filtro Manga. O princípio básico de funcionamento deste filtro é bastante simples, os gases de combustão passam em um compartimento onde há uma determinada quantidade de mangas. A eficiência de remoção das cinzas é elevada, atingindo valores acima de 99,9% (Tissot e Missel, 2010). Além disso, a intensificação do uso da matéria-prima energética tende a aumentar o problema de gestão destes resíduos gerados em várias partes do mundo e que constituem problemas ambientais. Pode haver desvantagens potenciais e limitações técnicas, ambientais e econômicas para o uso dos chamados produtos da combustão de carvão (Basu *et al.*, 2009). A construção civil é, de longe, o setor mais importante para a utilização das cinzas. As indústrias cimenteiras brasileiras utilizam as cinzas volantes em grandes quantidades, a ponto de esta matéria-prima ser alvo de disputa entre as indústrias consumidoras. Este é o potencial para a aplicação das cinzas leves analisadas neste estudo, que têm características adequadas ao mercado, e cuja produção nas usinas em questão já se destina às indústrias cimenteiras, tornando-se uma solução para este resíduo de grande impacto ambiental (Sabadot *et al.*, 2011).

5. CONCLUSÃO

O estudo da gestão de resíduos de um processo produtivo é de extrema importância quando se fala em sustentabilidade e em consciência ambiental. As tecnologias para produção de energia que utilizam fontes não renováveis ainda são amplamente utilizadas no mundo todo, e para que estas sejam substituídas por novas, e mais sustentáveis, tecnologias é importante que se façam comparações relacionadas aos resíduos gerados não só na produção como também durante todo o tempo de utilização destas energias. É importante também que estas novas tecnologias renováveis sejam economicamente viáveis, visto que o mundo atual necessita de grande produção de energia elétrica a baixos custos para poder competir com as tradicionais (não-renováveis).

Os módulos fotovoltaicos são muito inovadores e ecologicamente sustentáveis, porém é essencial ter atenção aos resíduos que o processo de fabricação das células solares origina, bem como as formas corretas de descarte e sua possível minimização. Neste estudo verificou-se que a geração de efluentes líquidos existe, porém com diversos estudos nesta área, já se consegue neutralizá-los e torná-los pouco significativos como impacto ambiental. Em relação aos resíduos atmosféricos, focando principalmente nos gases de efeito estufa (CO, CO₂, O₃, MP, NO₂ e SO₂), verificou-se que tanto na produção das células e módulos solares não há qualquer impacto sobre o meio ambiente e à saúde humana e ambiental, tornando esta tecnologia ambientalmente correta. O impacto considerado mais importante na tecnologia fotovoltaica é a geração de resíduos sólidos, que mesmo que pequena, deve ser considerada. Porém já existe uma solução para este tipo de resíduos que é a reciclagem destes módulos fotovoltaicos, feito na Europa pelas empresas associadas à PV CYCLE.

Foi verificado que os resíduos gerados por um sistema termoelétrico são mais significativos que os resíduos gerados em um sistema fotovoltaico, quando comparados. Os efluentes líquidos são gerados em diversas etapas da produção da energia termoelétrica (principalmente no sistema de refrigeração, no sistema de tratamento de água, na purga das caldeiras, efluentes da drenagem do estoque de carvão e devido aos líquidos para limpeza de equipamentos). Alguns destes efluentes são tratados, mas as tecnologias de tratamento ainda devem ser estudadas e melhoradas. O mais preocupante impacto ambiental é a geração de gases de efeito estufa na queima do carvão, que lança na atmosfera grandes quantidades de poluentes, além de ser um combustível fóssil que não se recupera, impacto que deixa a energia termoelétrica em grande desvantagem quando comparada com a fotovoltaica. Além disso, há uma considerável geração de resíduos sólidos que são as cinzas produzidas na queima do carvão, estes são utilizados, principalmente, pelas indústrias cimenteiras, minimizando seu impacto ambiental.

A geração de energia termoelétrica é mais barata, e por isso ainda é tão utilizada no mundo todo. Porém com os avanços contínuos, e rápidos, na tecnologia de produção e pesquisa em energia solar fotovoltaica o tempo de retorno do investimento vem diminuindo consideravelmente a cada ano, o que, em breve, tornará esta energia competitiva economicamente.

Mediante a comparação da geração de resíduos tanto na produção quanto na utilização dos dois tipos de tecnologias (fotovoltaica e termoeétrica), pode-se notar uma significativa vantagem na utilização da energia solar fotovoltaica. O impacto ambiental na sua produção e utilização é mínimo, tornando este tipo de tecnologia ambientalmente correta. Além de, se enquadrar perfeitamente nos padrões de sustentabilidade que hoje são o foco principal tanto das indústrias como da sociedade em geral no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição, Brasília, parte III, Capítulo 9, 2008, pp. 129 – 142.
- Agência Nacional de Energia Elétrica. Banco de Informacoes de Geracao. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Atualizado em: 24/08/2015. Acesso em 25 ago 2015.
- Almeida, J.R.; Aguiar, L.A.; Rodrigues, M.G. Impactos Ambientais de Usinas Termoeletricas a Gas. Estudo de Caso da UTG Duque de Caxias. Associação Educacional Dom Bosco (AEDB), II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia (SEGET), 2005.
- Alsema E.A.; Wild-Scholten M.J. Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production. 13th CIRP - International Conference on Life Cycle Engineering, Lovaina, Bélgica, 31 mai – 2 jun, 2006.
- Alsema, E. A.; Scholten, M. J. Reduction of Environmental Impacts in Crystalline Silicon Photovoltaic Technology - An Analysis of Driving Forces and Opportunities. Materials Research Society Fall 2007 Symposium, Boston, U.S.A., 26-30 nov. 2007.
- Appleyard, D. Light cycle: recycling PV materials. Renewable Energy World Magazine 12, v.2, 2009, pp. 28-36.
- Arvesen A, Hertwich Eg. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: a review of present knowledge and research needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(8), 2012, pp. 5994–6006.
- Basu, M. *et al.* Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. Progress in Natural Science, v. 19, 2009, pp. 1173-1186.
- Borba, A., Eugênio, G., Franklin, J. Energia: Previsão do aumento de carga na região em decorrência do incremento populacional e industrial que o Porto do Açu irá proporcionar. Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, v. 2, n. 1, 2012, pp. 227-237.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 308, de 21 de março de 2002, Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte. Publicada no DOU de 29 de julho de 2002.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº430, de 13 de maio de 2011, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011.
- Departamento Técnico de Olade. Guia para la evaluacion de impacto ambiental de centrales termoelectricas. Organizacion Latino Americano de Energia, Quito, Equador, 1993.
- FRAUNHOFER IBP. Life Cycle Engineering (GaBi), Life Cycle Assessment (LCA) screening of the Maltha recycling process for Si-PV modules, 2012.
- Fthenakis, V. M.; Moskowitz, P. D. Photovoltaics: Environmental, Health and Safety Issues and Perspectives. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 8, 2000, pp. 27-38.
- Fthenakis, V.M., Kim, H.C., Alsema, E..Emissions from photovoltaic life cycles. Environmental Science & Technology vol. 42, 2008, pp. 2168– 2174.
- Fthenakis, V. M. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 2746–2750, 2009.
- Fthenakis, V.M.; Kim, H.C. Photovoltaics: Life-cycle analyses. Center for Life Cycle Analysis, Solar Energy, 85, 2011, pp. 1609–1628.
- Hsu D.D., Odonoughue P., Fthenakis V., Heath Ga, Kim Hc, Sawyer P, Choi J-K, Turney De. Life cycle greenhouse gas emissions of crystalline silicon photovoltaic electricity generation. Journal of Industrial Ecology, vol. 16, 2012, pp 122–135.
- International Energy Agency. Topic: Coal. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/coal/>>. Acesso em 04 nov 2013.
- Jäger-Waldau, A. Overview of the Global PV Industry. Comprehensive Renewable Energy, v. 1: Photovoltaic Solar Energy, 2012, pp. 161–177.
- Kim H. C., Fthenakis V, Choi J-K, Turney D. Life cycle greenhouse gas emissions of thin-film photovoltaic electricity generation. Journal of Industrial Ecology, vol. 16, 2012, pp. 110–121.
- Klugmann-Radziemska, E.; Ostrowski, P. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 35, 2010, pp. 1751–1759.
- Lamont, L.A. Comprehensive Renewable Energy, Vol. 1: Photovoltaic Solar Energy, Capítulo 1.04 – History of Photovoltaics, Petroleum Institute, Abu Dhabi, UAE, 2012, pp. 31–45.
- Reis L. B., Santos E. E. C. Energia elétrica e sustentabilidade: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. Editora Manole, 2015.
- Lu, L., Peng, J., Yang, H. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 19, 2013, pp. 255–274.

- Makridesa, G. *et al.* Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, 2010, pp. 754–762
- Marcolino, J. B., Moehlecke, A., Zanesco, I. Desenvolvimento e análise de células solares com campo retrodifusor formado por pasta de alumínio e difusão em forno de esteira. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 2013.
- Moehlecke, A., Zanesco, I. Planta Piloto de Produção de Módulos Fotovoltaicos com Tecnologia Nacional. Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica, Faculdade de Física, PUCRS, 2006.
- Mulvaney D. *et al.* Toward a Just and Sustainable Solar Energy Industry. San Jose, CA: Silicon Valley Toxics Coalition, 2009.
- Ottinger, R. L. *et al.* Environmental costs of electricity. Pace University center for environmental legal studies. Nova Iorque, 1991.
- Pan, A.C. *et al.* Enhancement of up-conversion efficiency by combining rare earth-doped phosphors with PbS quantum dots. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 94, n. 11, 2010, pp. 1923-1926.
- Paridaa, B., Iniyamb, S., Goicc, R. A review of solar photovoltaic *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 15, 2011, pp. 1625–1636.
- PV CYCLE Association, IBC SOLAR España, Valência, Espanha, 2011.
- Frischknecht, R. *et al.* Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency, PVPS Task 12, Report T12-04:2015.
- Razykova, T.M. *et al.* Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, v. 85, 2011, pp. 1580–1608
- Reis, L. B. Geração de Energia Elétrica. 2ª edição, São Paulo, p. 203, 2001.
- Wenham S. R., Green, M. A. Silicon Solar Cells. *Progress in photovoltaics: research and applications*, vol 4, 1996, pp. 3-33.
- Sabedot, S. *et al.* Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termoelétricas. III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011.
- Santana E., Cunha K. B., Ferreira, A. L., Zamboni, A. Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia. 1o edição, Instituto de Energia e Meio Ambiente, Brasília, 2012.
- Sharma, A., Chen, C. R., Nguyen, V. L. Solar energy drying systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, 2009, pp. 1185 – 1210.
- Tissot, R. C. M., Missel, R. L. Tratamento dos efluentes atmosféricos da UTE charqueadas. Tractebel Energia S.A., III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Gramado, Rio Grande do Sul, 2010.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., Gekas, V. Environmental impacts from the solar energy technologies. Theocharis (Centre for Renewable Energy Sources), v. 33, 2005, pp. 289–296.

COMPARATIVE ANALYSIS OF WASTE GENERATED BY A PHOTOVOLTAIC AND A THERMOELECTRIC SYSTEM IN BRAZIL

Abstract. *The waste management industry is becoming progressively important due to increasing environmental responsibility and the establishment of strict regulations. In addition, there is a growing demand for electricity and the consequent development of new technologies. These are the main factors that stimulate renewable energy research. In this scenario, solar photovoltaic energy turns out to be an excellent alternative for the production of electricity. In this scenario, this article aims to analyze the industrial process used to produce electricity through photovoltaic modules and compare the impact occurred with those from the production of energy in thermoelectric systems. Through this analysis it was found that the solar modules generate an insignificant amount of waste but which must be observed. On the other hand, thermoelectric plants, besides using non-renewable raw materials, are also generating alarming amounts of wastewater, solid waste, and especially greenhouse gases (GHG). However, each GWh of electricity produced by photovoltaic solar technology avoids the emission of tons of greenhouse gases. Through this comparison it is observed that there is a significant advantage in the use of photovoltaic solar energy. After all, the environmental impact of their production and use is minimal, making this type of energy an environmentally friendly technology. Analyzing these results, we have faced an alarming data that Brazil launches annually 4.5 million tons of carbon in the atmosphere and that with the construction of new power plants, this indicator will reach 16 million by the end 2015. Thus, the photovoltaic solar energy fits perfectly in the sustainability standards that are now the main focus for both the industry and the welfare of society in Brazil and worldwide.*

Key words: *Photovoltaic Solar Energy, Thermal Power Plants, Environment*