

ELETRODEPOSIÇÃO PARA FABRICAÇÃO DE SUPERFÍCIES SELETIVAS PARA MITIGAÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO SEMIÁRIDO

Valeska Lisandra de Menezes (1), Ithyara Dheylle Machado de Medeiros (1),
Kelly Cristiane Gomes da Silva (2); Monica Carvalho (2)

(1) Alunas do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, emails: menezes_valeska@hotmail.com, ithyara.medeiros@cear.ufpb.br

(2) Orientadoras, Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Brasil, emails: gomes@cear.ufpb.br, monica@cear.ufpb.br

Resumo: O desenvolvimento de uma consciência ambiental criou uma demanda por produtos com menos impactos ambientais associados aos seus processos produtivos. Novas tecnologias para captação e transformação de energia renovável têm como propósito reduzir o impacto ambiental, tanto na fabricação, como na implantação e operação do sistema. O semiárido brasileiro é uma região com ótimas condições técnicas para implantação de sistemas solares para aquecimento de água, e também geração de vapor para utilização industrial. Em ambas as aplicações, utilizam-se trocadores de calor especiais para promover o aquecimento do fluido pretendido. Na busca da otimização do desempenho ambiental tantos dos filmes finos das superfícies seletivas quanto do seu processo de obtenção, este trabalho tem como objetivo desenvolver a avaliação do ciclo de vida do processo de fabricação das superfícies seletivas com aplicação do Cromo Negro (Cr_xO_y) obtidos por duas técnicas de deposição (*Sputtering e Eletrodeposição*), utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Neste sentido, foi possível observar a pegada de carbono associada às etapas do processo fabricação dos filmes pelas duas técnicas e avaliar as etapas do processo que podem ser otimizadas. A eletrodeposição apresentou menor pegada de carbono total, sem contabilizar o descarte da solução eletrolítica. Porém, observou-se que o consumo de eletricidade associado a ambos processos foi o responsável pela maior porção da pegada de carbono total.

Palavras-chave: Semiárido; Sistemas de Produção; ACV; Superfícies Seletivas; Técnicas de Deposição.

Introdução

O Brasil, que tem em torno de 95% de seu território na região intertropical do planeta e dimensões continentais, é considerado uma potência em energia solar, principalmente, o semiárido nordestino, aonde esta fonte energética natural vem possibilitando a integração de considerável população, antes isolada e/ou impossibilitada de usufruir de qualquer outra fonte de energia, aos benefícios da vida (SANTOS *et al.*, 2007). Com todo esse potencial para geração de energia solar, investir nessa alternativa energética, limpa, segura e abundante em todo o território significa expandir diversos setores da economia brasileira e principalmente aqueles diretamente relacionados com a produção de energia.

Os problemas de meio ambiente e sustentabilidade, atualmente, são vistos como oportunidades, possibilidades para crescimento e melhoria de eficiência. Segundo Curran (1999), a ACV é uma das metodologias mais adequadas para o alcance de objetivos voltados à sustentabilidade e já é uma

ferramenta internacionalmente validada e reconhecida, que avalia as consequências de construir e utilizar produtos e serviços, através da identificação e contabilização dos materiais usados e da descarga de resíduos ao meio ambiente.

Em relação às opções para aproveitamento da energia solar, a maneira mais simples e mais direta é através de sua conversão térmica, onde o calor transmitido pela radiação solar é utilizado no aquecimento de água para uso residencial e na geração de vapor para utilização industrial (SANI et al, 2012). Em ambas as aplicações, utilizam-se trocadores de calor especiais chamados de coletores solares para promover o aquecimento do fluido pretendido.

Apesar do forte potencial de geração de energia solar no Brasil, e em especial no semiárido, esta tecnologia tem encontrado alguns entraves para sua difusão. Um dos principais empecilhos para a utilização em larga escala dos sistemas de aquecimento solar é o custo de aquisição dos equipamentos deste sistema. Por outro lado, é indispensável a melhoria destes sistemas de forma a reduzir os custos de implantação e a aumentar a eficiência energética. Neste sentido, o principal aspecto a ser desenvolvido é aquele ligado ao aumento da absorção da radiação solar pelos coletores solares. Além disso, é preciso também que estes coletores resistam a elevadas temperaturas durante uma vida útil compensadora à implantação do sistema.

No entanto, apesar da conversão solar térmica apresentar uma boa relação custo-benefício (INCROPERA e WITT, 1992), alguns desafios tecnológicos precisam ser superados para que esta técnica de conversão se consolide como uma maneira viável de geração de energia para processos. Um dos pontos mais críticos do campo solar é a baixa eficiência da conversão solar para aplicações de média (de 100°C a 400°C) e alta temperaturas (acima de 400°C). Estas limitações estão associadas ao fato de que quanto maior for a temperatura do coletor solar, maior será a quantidade de calor emitido por radiação (TABOR, 1961). Além disso, os materiais dos quais são feitos os coletores também precisam ter estabilidade térmica nessas faixas de temperatura.

Como a emissão de calor por radiação é um fenômeno de superfície (TABOR, 1961), (KOKOROPOULOS et al, 1980) e outros autores SHAFFER (1958) e YANGWI et al (2013) propuseram que os coletores solares fossem revestidos superficialmente com materiais que fossem bons absorvedores de radiação e por outro lado emitissem pouco calor por este mesmo mecanismo. Estas superfícies caracterizam-se por apresentarem alta absorvidade no espectro solar e baixa emissividade na faixa espectral do infravermelho. Além disso, é necessário que estas superfícies não se degradem significativamente do ponto de vista óptico durante a vida útil do coletor e sejam resistentes à temperatura de estagnação e à umidade. Diversos estudos (OREL et al, 2007),

(EHRMANN et al, 2012), (SANI et al, 2012), (JOLY et al, 2013), (MARTINS, 2010), tem se preocupado em otimizar a seletividade óptica das superfícies seletivas pela combinação de materiais que apresentem características absorvedoras da radiação solar com materiais que exibem baixa emissividade na temperatura de trabalho.

Outro aspecto importante está na maneira como os materiais seletivos opticamente são depositados sobre a superfície do coletor solar, buscando obter-se uma superfície homogênea e com uma espessura apropriada a absorção da radiação solar. A influência desses parâmetros tem sido objeto de estudo de alguns pesquisadores em todo mundo (VILELA, 1985). Na busca por superfícies seletivas mais eficientes, a otimização dos processos de fabricação se fazem necessárias.

Além da busca pela melhor seletividade óptica possível, é fundamental também concluir qual a melhor maneira de realizar a deposição do material em forma de filme sobre o substrato. Para tanto, é necessário que o material apresente propriedades que permitam sua manipulação e se adequem a variedade de técnicas de deposição existente.

Existe uma grande variedade de técnicas de deposição desde procedimentos químicos SHAFFER (1958), como Eletrodeposição, *Spray* pirólise, tintas seletivas ópticamente, etc.; físicos de vapor, como o *Sputtering* e o *Magnetron Sputtering*; e pela técnica sol-gel (SELVAKUMAR; BARSHILIA, 2012), MARTINS, (2010).

A eletrodeposição é um método muito utilizado na indústria para obtenção de revestimentos metálicos com elevada aderência, boas propriedades físicas e qualidades mecânicas e químicas (PECEQUILO, C. V.; PANOSSIAN, 2010). Porém seu processo gera resíduos, os quais necessitam serem avaliados, tais como os reagentes utilizados para a preparação das soluções eletrolíticas.

A técnica de *Sputtering* também denominada de pulverização catódica trata-se de uma técnica na qual um alvo é bombardeado por íons que foram originados em uma descarga luminescente. Depois de o alvo ser bombardeado com um gás ionizado na câmara de deposição, por uma descarga luminosa proveniente de um campo elétrico formado entre dois eletrodos (cátodo e ânodo), o alvo (cátodo) e o suporte da amostra (ânodo) são posicionados em lados opostos dentro da câmara, a qual está sob níveis de pressão em torno de 100 mTorr. A deposição dos átomos do alvo sobre o substrato é realizada por transferência de momento do feixe de íons de alta energia para o alvo KUMAR (2013).

Nesta temática, a aplicação da metodologia da ACV no processo de desenvolvimento de novas superfícies absorvedoras que venham a maximizar a eficiência dos coletores solares se faz

imprescindível para o desenvolvimento de novas tecnologias energéticas e de novas aplicações no setor produtivo com melhor desempenho ambiental.

Desta forma, devido a variabilidade de materiais e das técnicas empregadas para a obtenção das superfícies solares e na busca do desempenho ambiental tanto dos filmes finos das superfícies seletivas quanto do processo de obtenção das mesmas este estudo tem como objetivo calcular as pegadas de carbono associadas ao processo de fabricação das superfícies com aplicação do Cromo Negro (Cr_xO_y) obtidos por duas técnicas de deposição (*Magnetron Sputtering e Eletrodeposição*) objetivando obter a pegada de carbono associada ao processo de fabricação, utilizando a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Materiais e métodos

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) fornece uma visão abrangente dos aspectos ambientais de um produto ou processo e uma imagem das verdadeiras compensações ambientais na seleção de produtos e processos (CURRAN, 1996). A metodologia da ACV está internacionalmente normatizada ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), e é considerada como umas das ferramentas mais eficazes para identificar e avaliar os impactos ambientais associados a uma atividade, produto ou processo (GUINÉE, 2001; 2002). No Brasil, a normativa internacional foi traduzida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) nas normas NBR 14040 (2009) e NBR 14044 (2009).

Para Carvalho e Freire (2014), a ACV não é uma ferramenta simples, pois requer a mobilização de uma quantidade significativa de dados assim como alto consumo de tempo e esforços computacionais. A atividade analisada deve ser descrita com o maior número possível de detalhes, que incluem as entradas (material, energia) e saídas (produto, serviço, resíduo). Mais detalhes sobre ACV podem ser consultados em Guinée (2001) e Guinée (2002).

A normativa metodológica na qual a ACV está inserida (ABNT 2014a; ABNT, 2014b) permite que diversos métodos de avaliação de impacto ambiental sejam aplicados combinadamente, para avaliar diferentes pontos de vista, como uso de energia ou material, impactos ambientais e pegada ecológica (CHERUBINI et al., 2009).

A ACV é desenvolvida seguindo quatro fases distintas (ABNT, 2014a): i) objetivos e alcance da análise; ii) inventário com a compilação de dados e modelização de sistemas; iii) análise do impacto do ciclo de vida; e iv) interpretação dos resultados.

Dentro da definição de objetivos, devem incluir-se as razões pelas quais o estudo está sendo realizado, a informação que se espera obter, como vai ser utilizada, etc. A construção do inventário é fundamentalmente um balanço de matéria e energia do sistema, e compreende a compilação dos dados e realização de cálculos adequados para quantificar as entradas e saídas do sistema estudado. A finalidade da fase de avaliação de impactos do ciclo de vida é a de interpretar o inventário, analisando e avaliando os impactos produzidos pelas cargas ambientais identificadas. Na interpretação de resultados, se combina a informação obtida na fase de inventário com a informação da avaliação de impactos para chegar a conclusões e/ou recomendações de acordo com os objetivos e o alcance do estudo.

Com o objetivo de analisar os dados de entrada e traduzi-los em cargas ambientais, dispõe-se do software SimaPro 8.3.0.0 (2017), que consiste em uma ferramenta profissional altamente especializada para ACV. Independente da complexidade da ACV, o SimaPro permite modelar e analisar de acordo com as ISO 14040 (2006) e 14044 (2006). Dentro do software há diversas bases de dados disponíveis para compor o inventário. A escolhida para este trabalho foi a Ecoinvent (2015), que contém dados sobre produção de energia, transporte, materiais de construção, produção de produtos químicos e produção de metais.

São vários os métodos para avaliação de impacto ambiental, e o adotado para este estudo foi o IPCC 2013 GWP¹ 100a, o qual contabiliza o total de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), expressando o resultado em termos de carbono equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq) para um sistema definido ou atividade (IPCC, 2014). A expressão de impactos ambientais em forma de GEE também é conhecida como pegada de carbono. Segundo Delgado e Carvalho (2017), como a pegada de carbono está intimamente relacionada ao uso da energia e devido ao extremo interesse público nas mudanças climáticas em comparação a outros problemas ambientais, este indicador é apropriado para comunicar resultados de estudos ACV, e vem recebendo visibilidade pronunciada graças a sua popularidade.

A partir do inventário entradas e saídas (matéria e energia), pode-se modelar e analisar o ciclo de vida do processo de fabricação das placas utilizando o software Simapro. A unidade funcional aqui utilizada, que relaciona todos os fluxos de entrada e saída, foi a realização de um processo de deposição: Eletrodeposição e *Sputtering*.

¹ (Global Warming Potential ou Potencial de Aquecimento Global)

Na eletrodeposição considerou-se que a composição do eletrodo foi 95% Chumbo (Pb) e 5% de Antimônio (Sb) (Peso do eletrodo: 3g). Para a composição do solução eletrolítica contabilizou-se 700ml de água destilada, 247g/l de Trióxido de Cromo (CrO₃) e 0,854g/l de Ácido hexafluorossilícico (H₂SiF₆).

A base de dados Ecoinvent (2015) precisou ser adaptada para obtenção do trióxido de cromo, combinando oxigênio e dióxido de Cromo. Cada solução eletrolítica consegue realizar 2700 eletrodeposições em substratos de 25 x 25 mm. O consumo de energia elétrica considerou a eletricidade fornecida pela rede elétrica brasileira², num total de 0,0025 kWh por processo de eletrodeposição. Cada eletrodo possui duração de 100 solução eletrolíticas (=270.000 eletrodeposições).

Para o processo via *sputtering* considerou-se que uma pastilha de cromo pesava 106,5 g, com vida útil de 1152 processos. O consumo de eletricidade associado a cada processo de *sputtering* foi de 0,020 kWh. Somente os fluxos operacionais foram considerados neste trabalho.

Resultados e discussão

Após contabilização dos fluxos de matéria e energia envolvidos em cada processo a ser estudado, procedeu-se a avaliação de impacto ambiental com a obtenção da pegada de carbono associada a cada alternativa. As Tabelas 1 e 2 mostram o detalhamento das pegadas de carbono obtidas.

Tabela 1: Pegada de carbono associada a Eletrodeposição.

Processo	Pegada de carbono g CO ₂ -eq
Solução Eletrolítica	0,292
Eletrodo	0,0000567
Consumo de eletricidade	0,573
TOTAL	0,864

Tabela 2: Pegada de carbono associada ao *Sputtering*.

Processo	Pegada de carbono g CO ₂ -eq
Pastilha de cromo	2,80
Consumo de eletricidade	4,58
TOTAL	7,38

Para a técnica de eletrodeposição, obteve-se uma pegada de carbono igual a 0,864 g CO₂-eq/processo. Para a técnica de *sputtering*, obteve-se 7,38 g CO₂-eq/processo.

² 71% hidráulica, 6% gás natural, 4% óleo, 3% nuclear, 6% biomassa (cana de açúcar e resíduos lenhosos), 2% eólica e 8% importações da Argentina, Paraguai, Uruguai e Venezuela (combinação de hidroelétricas e termelétricas a gás natural).

Análise da Tabela 1 revela que o processo que mais contribuiu para a pegada de carbono associada a eletrodeposição foi a eletricidade consumida (representando 66% da pegada de carbono total). A solução eletrolítica representou 33% da pegada de carbono total. Porém não foi levado em consideração o descarte, processo que em futuros trabalhos será avaliado.

Pela Tabela 2, observa-se que o processo que mais contribuiu para a pegada de carbono associada ao *sputtering* foi o consumo de eletricidade, que representou 62% da pegada de carbono final. A pastilha de cromo foi responsável por 38% da pegada de carbono final.

Observou-se que o consumo de eletricidade associado a ambos processos foi o responsável pela maior porção da pegada de carbono total. Utilizou-se aqui o mix elétrico (baixa tensão) brasileiro. Porém se comparado com mix de outros países, como exemplo o mix dos Estados Unidos da América, teremos uma composição com índices consideráveis de carbono (FAPESP, 2010).

Para finalizar, observa-se que a energia solar tem surgido como uma alternativa de fornecimento de energia sustentável, especialmente localidades remotas prejudicadas pela falta de investimentos na expansão da rede convencional de energia elétrica, como é o caso do semiárido brasileiro. O estudo de Barbosa et al. (2017) discutiu a situação atual e perspectivas para utilização de energia solar no semiárido brasileiro, com base em tecnologias mais atuais e considerando aspectos de viabilidade técnico e econômica. Barbosa et al. (2017) destacam ainda a viabilidade econômica de alguns dos estudos, e explicam que o semiárido conta com linhas de financiamento específicas para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos, com financiamento de até 100% do valor do investimento.

A tecnologia de aproveitamento da energia solar é um importante instrumento para a diversificação da oferta de energia, por não causar nenhum tipo de impacto ambiental negativo, proporcionando elevação da renda e do nível de conhecimento da população no semiárido brasileiro.

Conclusões

A metodologia da ACV sendo aplicada no processo de desenvolvimento de novas superfícies absorvedoras vem a maximizar a eficiência dos coletores solares se faz imprescindível para o desenvolvimento de novas tecnologias energéticas e de novas aplicações no setor produtivo com melhor desempenho ambiental.

Percebe-se a importância do estudo para o semiárido nordestino, aonde esta fonte energética natural vem possibilitando a integração e desenvolvimento de considerável população, antes isolada e/ou

impossibilitada de usufruir de qualquer outra fonte de energia, aos benefícios da vida, além da contribuição com menores índices de impacto ambiental.

A comparação das técnicas de deposição dos filmes o consumo de eletricidade associado a ambos processos foi o responsável pela maior porção da pegada de carbono total. Podendo então ser melhorado utilizando a energia solar fotovoltaica, como também o descarte dos resíduos não foi avaliado sendo de suma importância seu estudo futuro para obtenção de menores índices de pegada de carbono total.

Trabalhos futuros das autoras incluem a consideração do cenário final (descarte) dos materiais, e análises de sensibilidade quanto a origem da eletricidade consumida.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura:** NBR ISO 14040. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações:** NBR ISO 14044. Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014b.

BARBOSA, R. R. *et al.* **Energia solar fotovoltaica no semiárido:** potencial, cenário atual e perspectivas. In: Congresso Internacional da Diversidade no Semiárido, 2., Campina Grande, 2017. *Anais...* Campina Grande: [s.n.], 2017.

CARVALHO, M; FREIRE, R.S. **Quantificar, reduzir, evidenciar:** uma nova prática para empresas sustentáveis. XVI ENGEMA - Encontro Internacional sobre gestão empresarial e meio ambiente. São Paulo, SP, 2014.

CHERUBINI, F.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Life Cycle Assessment (LCA) of waste management strategies:** landfilling, sorting plant and incineration. *Energy*, v. 34, p. 2116-2123, 2009.

CURRAN, M. **The status of LCA in the USA.** *International Journal of Life Cycle Analysis*, v.4, n.3, PP. 123-124. 1999.

_____, editor. **Environmental life cycle assessment.** New York: McGraw-Hill; 1996.

DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M. **Potencial da energia solar fotovoltaica em geração distribuída para manutenção da pegada de carbono do mix elétrico brasileiro.** In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade - Congestas, 2016, João Pessoa.

DELGADO, D. B. M.; CARVALHO, M. **Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the brazilian electricity matrix.** Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida, v.1, n.1 [no prelo], 2017.

ECOINVENT. **Ecoinvent:** Implementation of Life Cycle Impact Assessment Method. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Suíça, 2015.

FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo). **Um futuro com energia sustentável:** iluminando o caminho. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2010. 300 p.: il.

INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. **Fundamentos da transferência de calor e massa.** 3ª Edição. Rio de Janeiro. LTC, 1992.

IPCC. **International Panel on Climate Change.** 2014.

ISO 14040. **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.** International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.

ISO 14044. **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.** International Organization for Standardization (ISO), Genebra, 2006.

GUINÉE, J.B. (ed) **Life Cycle Assessment:** An operational guide to the ISO Standards; LCA in Perspective; Guide; Operational Annex to Guide. Centre for Environmental Science, Leiden University: The Netherlands, 2001.

GUINÉE, J.B. **Handbook on life cycle assessment:** operational guide to the ISO standards. Kluwer Academic Publishers: Boston, 2002.

KUMAR, S. K.*et al.* **Nanostructured CuO Thin Films Prepared through Sputtering for Solar Selective Absorbers.** Journal of Solar Energy, 2013.

MERCATELLI, L. *et al.* **Ultra-High Temperature Ceramics for solar receivers:** spectral and high-temperature emittance characterization. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, v. 7, article number 12052, 2012.

OREL, B.*et al.* **Estudo do mecanismo de eletrodeposição do cobre a partir do HEDP por meio da técnica eletroquímica de medição do potencial de circuito aberto.** In: 30., 2010, Congresso Brasileiro de Corrosão, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza, 2010.

PRÉCONSULTANTS. **SIMAPRO.** Disponível em: < Acesso em março 2017.>

SAIC – Scientific Applications International Corporation. **Life cycle assessment:** principles and practice. Cincinnati (Ohio, USA): National Risk Management Research Laboratory, US Environmental Protection Agency; 2006.

SANTOS, E.C.*et al.* **Energia solar na fruticultura irrigada familiar.** Tecnologia & Ciências Agropecuárias. João Pessoa, v.1, n.2, p.1-7, dez. 2007.

SELVAKUMAR, N.; BARSHILIA, H.C. **Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications.** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 98, p. 1-23, 2012.

SILVA, Z. E. **Obtenção de superfície seletiva em Ni sobre Al para conversão térmica de energia solar.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, João Pessoa, 84p, 1985.

TABOR, H. **Solar collectors, selective surfaces and heat engines.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 47, p. 1271–1278, 1961.

VODLAN, M.; KOHL, M. **Silicone-based thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints as selective paint coatings for coloured solar absorbers (Part I).** Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 91, p. 93–107, 2007.