

Uma abordagem sustentável a partir da eficiência e avaliação do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos

ANDRÉ MARQUES RODRIGUES

UNINOVE – Universidade Nove de Julho
andrew.rodrigues@hotmail.com

ROBERTA BEZERRA GARDIM

UNINOVE
roberta.bgardim@hotmail.com

AMANDA MIRANDA

Universidade Nove de Julho
mirandaca1@hotmail.com

ROGÉRIO BONETTE KLEPA

UNINOVE – Universidade Nove de Julho
klepao@gmail.com

A UNINOVE pela oportunidade em orientar os alunos através da Iniciação Científica.



UMA ABORDAGEM SUSTENTÁVEL A PARTIR DA EFICIÊNCIA E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Resumo

Este trabalho teve como objetivo realizar uma abordagem de estudo sobre a fabricação e/ou aplicação de módulos fotovoltaicos provenientes de resíduos da construção civil, sua eficiência e avaliação do ciclo de vida. O reaproveitamento tem como foco minimizar impactos ambientais, sociais e econômicos. Com o atual panorama mundial, entendido como desenvolvimento sustentável, eficiência energética e avaliação do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos, adotou-se uma metodologia através de pesquisa bibliográfica, banco de dados de artigos científicos, revistas, jornais e publicações relevantes. Verificou-se que não houve uma abordagem direta aos materiais que envolvessem a reutilização de resíduos da construção civil sendo utilizados em aplicações e/ou fabricação de células ou módulos fotovoltaicos. Porém, há estudos e pesquisas evidentes em laboratório com material cerâmico promissor, que além de ser reutilizável em diversas aplicações, apresentou potenciais características, tanto para absorção quanto para reflexibilidade de energia, diminuindo, com isso, emissões de gases de efeito estufa, entre eles, o dióxido de carbono (CO₂), além da redução de custos.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; material cerâmico; módulos fotovoltaicos; resíduos da construção civil.

Abstract

The objective of this work was to carry out a study approach on the manufacture and / or application of photovoltaic modules from waste from civil construction, its efficiency and life cycle evaluation. Reuse is focused on minimizing environmental, social and economic impacts. With the current world panorama, understood as sustainable development, energy efficiency and evaluation of the life cycle of photovoltaic modules, a methodology was adopted through bibliographical research, database of scientific articles, magazines, newspapers and relevant publications. It was verified that there was no direct approach to materials that involved the reuse of construction waste being used in applications and / or manufacture of cells or photovoltaic modules. However, there are studies and research in laboratory with promising ceramic material, which in addition to being reusable in several applications, presented potential characteristics both for absorption and for energy reflexivity, thereby reducing emissions of greenhouse gases between them, Carbon dioxide (CO₂), and cost reduction.

Keywords: Life cycle assessment; Ceramic materials; Photovoltaic modules; Construction waste.



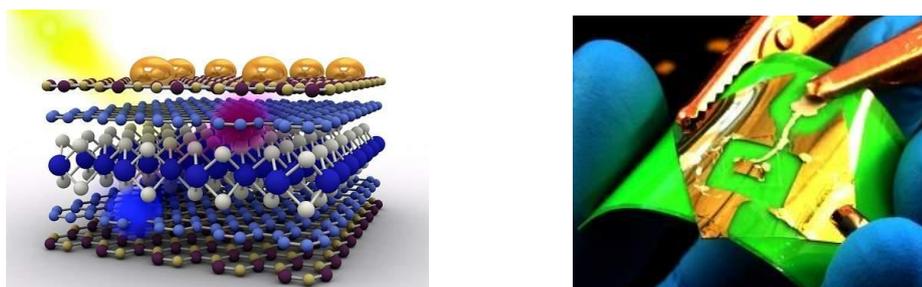
1 Introducao

Utilizar a energia solar para a obtencao de eletricidade e uma forma de reduzir as emissoes de gases do efeito estufa (GEE) e, em muitos casos, outros impactos ambientais ligados a construcao de empreendimentos energeticos. Al€m disso, a flexibilidade de instalacao nos mais diversos locais, principalmente integrada a construcoes em projetos de mini e microgeracao, faz dela uma fonte com alto potencial de expansao no pais, de forma a trazer benefcios para a rede eletrica nacional (KLEPA, et al., 2016).

Atualmente as tecnologias empregadas na construcao de celulas fotovoltaicas (CF) tem apresentado expressiva participacao no mercado de producao de energias renovaveis. As pesquisas e desenvolvimento (P&D) voltados para a utilizacao de nanomateriais faz aumentar o interesse de pesquisadores com o objetivo de melhorar a eficiencia e o desempenho das CF. Al€m disso, ha grande interesse em se averiguar a eficiencia dos modulos fotovoltaicos (MF), ao longo e ao termino de seu ciclo de vida.

Britnell et al. (2013) desenvolveram uma celula solar eficiente e superfina atraves de "heteroestruturas", formadas por materiais diferentes em escala atomica, empilhados no formato de um sanduiche. O empilhamento e a construcao dessa celula sao demonstrados atraves da Figura 1.

Figura 1. A heteroestrutura tem apenas 2 nanometros de espessura, e apresenta uma eficiencia quantica de 30%.



Fonte: Britnell et al. (2013).

Segundo pesquisa realizada por Yang et al. (2015 apud KLEPA et al., 2016, p.4) constataram que o material conhecido como perovskita, chamado de FDT (sigla em ingles para fluoreno-ditiofeno dissimetrico) e com apenas 20% do preo dos materiais usuais na fabricacao de celulas solares, se destacou com uma eficiencia energetica bastante significativa e exatos 20,2%, sendo bem atrativo para os investimentos em P&D.

Estudos experimentais realizados por Klepa (2012) descobriram um material ceramico promissor com potenciais caracteristicas, tanto para absorcao quanto para reflexibilidade de



energia a partir de resíduos da construção civil, juntamente com óxido de zinco (ZnO), sendo sua aplicação interessante para construção de uma célula fotovoltaica e tachas refletivas utilizadas para orientação em rodovias.

As imagens ilustradas respectivamente através da Figura 2 demonstram uma tacha refletiva e uma célula fotovoltaica.

Figura 2 – Ilustração da tacha refletiva de acordo com a Bandeirantes sinais viários e célula fotovoltaica.

tacha refletiva



Fonte: Bandeirantes (2017).

célula fotovoltaica (silício)



Fonte: Silicon solar (2017).

De acordo com Choi & Fthenakis (2010), o uso de recursos primários valiosos e a geração de emissões dos GEE no ciclo de vida das tecnologias fotovoltaicas exige um planejamento proativo de uma sólida infraestrutura de reciclagem de células fotovoltaicas CF para garantir sua sustentabilidade. Espera-se que as CF apresentem uma característica de tecnologia verde e adequadamente planejada para a reciclagem, oferecendo oportunidade para torná-la um “duplo-verde”, melhorando a qualidade do ciclo de vida ambiental. Além disso, deve ser assegurada sua viabilidade econômica e um nível suficiente de oportunidade de valor acrescentado, para estimular uma indústria de reciclagem.

O estudo do ciclo de vida do produto, neste caso, módulos fotovoltaicos no fim de vida, segundo Beuren (1997), podem servir não só como alerta para os problemas que normalmente ocorrem em cada fase, mas poderá indicar as oportunidades com antecedência, estimular a área mercadológica, planejar novos usos, características e formas de conquistar e manter clientes.

Sendo assim, este trabalho busca uma abordagem de estudos, pesquisas bibliográficas de forma sistemática sobre a fabricação e/ou a aplicação de módulos fotovoltaicos provenientes



de resíduos da construção civil, eficiência e avaliação do ciclo de vida que envolvam sua viabilidade econômica e ambiental.

1.1 Fabricação de células fotovoltaicas (CF)

Uma célula FV possui a capacidade de converter a energia solar luminosa (radiação) em corrente elétrica. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado (CRESESB, 2016).

Fontes que visem as fases de produção e utilização das CF tratam principalmente do material e da tecnologia empregados na fabricação. As CF podem ser feitas de diversos materiais ou elementos químicos, entre eles o silício, o telureto de cádmio, o disseleneto de cobre, o gálio e o índio, entre outros (RÜTHER, 2004).

De acordo com Kim et al. (2016), cada material que compõe uma célula fotovoltaica caracteriza uma tecnologia, que possui eficiência e possibilidade de integração diferenciada. Existem três gerações da tecnologia, e cada uma delas apresenta características diferentes:

- a) A primeira geração é de silício cristalino (Sc), que domina o mercado;
- b) A segunda geração são os módulos de filmes finos (FF) que, apesar da menor eficiência, permitem maior flexibilidade na instalação; e
- c) A terceira geração, composta por células orgânicas (Co) e de corantes sensibilizados, ainda não disponíveis comercialmente para a construção civil.

Os três grupos comerciais de células fotovoltaicas que podem ser fabricados com diversas tecnologias estão representados conforme Quadro 1 abaixo:



Quadro 1. Classificacao das tres geracoes de celulas fotovoltaicas.

Células Fotovoltaicas de 1ª geração	Células Fotovoltaicas de 2ª geração	Células Fotovoltaicas de 3ª geração
Silício Monocristalino (mc-Si) e silício Policristalino (p-Si), que representam mais de 85% do mercado, por ser considerada uma tecnologia consolidada e por possuir a melhor eficiência comercialmente disponível.	Comercialmente denominadas de filmes finos, são divididas em três cadeias produtivas: Silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS), e telureto de cádmio (CdTe). Possuem menor eficiência quando comparadas à primeira geração, associada à disponibilidade dos materiais, vida útil, ao rendimento das células e, no caso do cádmio, por ser tóxico.	Ainda em fase de P&D, testes e produção em pequena escala, divididas em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica de multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV – <i>Concentrated Photovoltaics</i>), células sensibilizadas por corante (DSSC – <i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>) e células orgânicas ou poliméricas (OPV – <i>Organic Photovoltaics</i>). A tecnologia CPV demonstrou um potencial para produção de módulos com altas eficiências, embora com um custo ainda não competitivo com as tecnologias que dominam o mercado.

Fonte: Klepa et al. (2016).

Kim et al. (2016) relatam que alguns documentos informam aplicações fotovoltaicas em nanoescala, voltadas para o óxido de titânio e de zinco, outros concentram-se apenas em nanomateriais, como fulerenos e nanotubos de carbono.

Neste contexto, as células solares de dióxido de titânio (TiO₂), sensibilizadas por corante (do inglês: *Dye Sensitized Solar Cells* - DSSC), conhecidas como células de Grätzel, surgidas no início da década de 90, representam uma alternativa interessante para a produção de módulos solares de baixo custo. Essas células solares apresentam valores de eficiência de até 10% em sua configuração clássica, porém este valor pode variar com a modificação dos componentes, chegando a alcançar até 13% (SONAI et al., 2015).

De modo geral, Nguyen et al. (2007 apud SANTOS, 2013, p.41) informam que a fabricação dessas células utiliza duas placas de vidro, cobertas com uma película de material condutor, resultando em um material nanoporoso, recoberto com corante sensibilizador e então unidas e seladas nas duas faces.



1.2. Eficiência energética solar

Estudos e pesquisas realizadas por Klepa et al. (2016) sobre painéis solares fotovoltaicos (FV), que recebem o Selo Procel de Eficiência Energética, necessitam ter a classificação “A” de eficiência de energia na ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia). Este selo de conformidade classifica os equipamentos, veículos e edifícios em faixas coloridas, em geral de “A” (mais eficiente) até “E” (menos eficiente), e fornece outras informações relevantes.

A eficiência dos módulos fotovoltaicos (MF) é definida através da tecnologia de fabricação das células que os compõem, ou seja, a tecnologia utilizada definirá o quanto o módulo irá aproveitar da irradiação solar incidida sobre ele para transformá-la em energia elétrica. Um módulo que apresenta eficiência de 13% consegue transformar esse percentual de irradiação solar incidida sobre ele em energia elétrica (Klepa et al., 2016).

Okigami (2015 apud KLEPA et al., 2016, p. 5), em sua pesquisa, constata que o PBE (Plano Brasileiro de Etiquetagem) fornece informações sobre o desempenho dos equipamentos, considerando a eficiência energética (EE), o ruído e outros critérios. O Brasil os utiliza para a promoção da EE, complementados pela distinção promovida pela etiquetagem e Selos Procel, Ence e Conpet. Estas classificações que um módulo fotovoltaico (MF) pode possuir, classificados de A a E, são distinguidas através do material que são fabricados, podendo ser silício cristalino (SC), mono ou policristalino e com filmes finos (FF), sendo A o mais eficiente indicado pelo INMETRO e E o menos eficiente.

A Tabela 1 ilustra os selos Procel e Ence, importantes para determinação da eficiência dos módulos fotovoltaicos.

Tabela 1 - Articulação entre o PBE, os Selos e a Lei de Eficiência Energética

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica	ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
 <p>Selo PROCEL</p>	
Tem por finalidade informar a	Uma ferramenta simples e eficaz, que



eficiencia energetica e/ou o desempenho termico de sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica.	permite ao consumidor conhecer equipamentos mais eficientes e que consomem menos energia.
---	---

Fonte: Klepa et al. (2016)

A Eficiencia Energetica (EE) e dada pela porcentagem da potencia de saida pela potencia de entrada, conforme a Equacao 1.

$$EE(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (1)$$

Onde: **EE (%)** Eficiencia energetica em porcentagem; **P_{out}** (Potencia de saida do modulo fotovoltaico); **P_{in}** (Potencia de incidencia de radiao solar no modulo fotovoltaico);

1.3. Tecnicas de reciclagem de CF (celulas fotovoltaicas)

Dada a quantidade de paineis fotovoltaicos ja instalados e previstos, a quantidade de residuos oriundos de paineis fotovoltaicos e estimada em 9,57 milhoes de toneladas em 2050 (BIO INTELLIGENCE SERVICE, 2017).

A reciclagem de residuos de CF representara um desafio para as estacoes de tratamento do futuro. As dificuldades relacionadas com a gestao do fim do ciclo de vida dos paineis, incluindo a desmontagem e a logistica reversa, serao cada vez maiores, especialmente considerando a grande distribuicao heterogenea de paineis em escala urbana (CELLURA et. al., 2012).

Segundo Corcellia et al. (2016), um dos processos de reciclagem testados para a tecnologia de silicio cristalino e o tratamento termico, com o objetivo de separar as celulas fotovoltaicas do vidro, atraves da remocao da camada AVE (Acetato de Vinil de Etileno). Naturalmente, este tratamento pode implicar que alguns componentes perigosos, tais como Cd (cadmio), Pb (chumbo) e Cr (cromo), sejam libertados para o ambiente, e requerem um manuseamento muito preciso.

Com relacao a extracao e reciclagem, a "First Solar", empresa de reciclagem de modulos fotovoltaicos, alegou ser capaz de utilizar 95-97% da CdTe-PV (*Cadmium Telluride Photovoltaic*) na producao das celulas solares (MARWEDE & RELLER, 2012).

A reciclagem, no fim do ciclo de vida das CF, nao e apenas uma questao ambiental, mas tambem economica e de viabilidade, sendo igualmente relevante na implementacao. A



viabilidade econômica da reciclagem de CF é discutida em profundidade através do artigo *Economic feasibility of recycling photovoltaic modules* (CHOI & FTHENAKIS, 2010).

Para Kim (2016), os principais desafios que devem ser contabilizados para a viabilidade do sistema de reciclagem são:

- Concentração geográfica dos sistemas fotovoltaicos;
- Sua proximidade para as instalações de reciclagem; e/ou
- Conteúdo, transporte entre pontos de coleta e instalações de reciclagem e as taxas de aterro incorridas largamente discutidas.

2. Metodologia

A metodologia utilizada foi realizada através de uma busca em base de dados científicos da produção e aplicação de células fotovoltaicas (CF), que prima desde a sua fabricação, eficiência, até o término de seu ciclo de vida e uma possível aplicação através da reutilização de resíduos da construção civil.

Buscaram-se aspectos conceituais que caracterizam as vantagens do uso das células fotovoltaicas, quanto à eficiência energética (EE) das células ou módulos fotovoltaicos (MF). A pesquisa foi realizada inicialmente com um estudo horizontal da literatura e de documentos públicos, com a finalidade de compreender a estrutura dos módulos fotovoltaicos e a necessidade do uso de energia fotovoltaica na atual realidade mundial.

Basicamente, alguns artigos visam a possibilidade de recursos que possam ser reutilizados no processo da fabricação, não obstante o descarte após a sua utilização. Outros, porém, cobrem tópicos específicos quanto ao tipo de material utilizado na fabricação. No entanto, não é o objetivo desta pesquisa detalhar com profundidade os tipos de materiais, mas sim, uma abordagem com recursos de materiais que permitam uma preocupação do ponto de vista do custo, da eficiência e ambiental.

Com isso, o objetivo desta pesquisa bibliográfica é investigar através de documentos, artigos científicos e base de banco de dados, as possíveis tecnologias para a fabricação de CF provenientes de resíduo da construção civil, custos, eficiência e avaliação do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos (MF).

3. Resultados e Discussões

Assumindo que a previsão de resíduos advindos de painéis fotovoltaicos é de 9,57 milhões de toneladas em 2050, fica evidente que devemos realizar estudos seguindo um



planejamento, a logística reversa dos MF voltados para o fim do ciclo de vida, a viabilidade econômica, a redução de custos, os investimentos em P&D (pesquisa de desenvolvimento) sobre quais tipos de resíduos possam vir a captar a energia solar e, claro, a destinação correta e sustentável desses resíduos.

Outra forma seria a contribuição voltada para sustentabilidade econômica, social e ambiental, através da correta utilização de equipamentos que portem a etiqueta de eficiência energética (EE) com classificação “A” do PBE (Plano Brasileiro de Etiquetagem) e, com isso, obter redução de custos com a energia elétrica convencional.

Um dos grandes problemas encontrados na sociedade é o descaso com resíduos sólidos sem tratamento, porém a P&D realizada por Klepa (2012) relata que é possível tratar resíduos sólidos da construção civil, além de apresentar potenciais aplicações para construção de uma célula solar, ou tacha refletiva, mais conhecida como “olho-de-gato”.

A maior das discussões relaciona-se ao fim ciclo de vida das CF, cujo descarte, em curto prazo, será abundante, devido à sua crescente utilização. De acordo com a análise, é importante um processo de fabricação que facilite a reciclagem.

4. Conclusão

O tipo de matéria-prima escolhido, a técnica a ser empregada na fabricação, o transporte, um estudo que relacione desenvolvimento e implementação de tecnologias com infraestruturas de menor impacto em custo, benefício ambiental na reciclagem e logística no fim do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos são, sem dúvida, a melhor solução.

Sendo assim, é necessário um desenvolvimento de estudos físicos experimentais, laboratoriais que possam comprovar eficiência na geração de energia elétrica através da luz solar, utilizando resíduos da construção civil ou outros resíduos relevantes, levando-se em consideração os tipos de materiais descartados, se pertencem ao quadro de materiais que compõem a captação e conversão de energia solar, o impacto econômico, a eficiência energética, a logística no fim do ciclo de vida e a reciclagem.

Estimular e incentivar as empresas públicas e privadas a adotarem essa prática sustentável através de P&D, estudos, planejamentos, ações, propagandas e investimentos voltados para grandes e pequenos empreendimentos, seria um começo para barrar o grande problema enfrentado, que é a falta de planejamento energético.

**Referências**

BANDEIRANTES, **Bandeirantes sinais viários.** Disponível em < <http://www.bandeirantessinais.com.br/tachas/> > Acesso em 21 de abril de 2017.

BEUREN, I. M.; SCHAEFFER, V. Análise dos custos do ciclo de vida do produto: uma abordagem teórica. *ABEPRO (Associação Brasileira de Engenharia de Produção)*, 1997.

BIO INTELLIGENCE SERVICE, ***Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE directive – Final report, 2011.*** <<http://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Study%20on%20PVs%20Bio%20final.pdf>> Acesso em 21 de maio de 2017.

BRITNELL L.; RIBEIRO R. M.; ECKMANN A.; JALIL, R.; BELLE, B. D.; MISHCHENKO, A.; KIM, Y. J.; GORBACHEV, R. V.; GEORGIOU, T.; MOROZOV, S. V.; GRIGORENKO, A. N.; GEIM, A. K.; CASIRAGHI, C.; CASTRO NETO, A. H.; NOVOSELOV, K. S.; Strong Light-Matter Interactions in Heterostructures of Atomically Thin Films. *Science*, v. 340, p. 1311-1314, jun. 2013.

CELLURA, GANGI, A. DI.; LONGO, S.; ORIOLI, A. *Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study.* Renewable and Sustainable Energy Reviews. v. 16, pp. 2041-2052, 2012.

CHOI, J.K.; FTHENAKIS, V. *Economic feasibility of recycling photovoltaic modules.* Journal of industrial Ecology, v. 14, n. 6, pp. 947-964, 2010.

CORCELLIA, F.; RIPA, M.; LECCISI, E.; CIGOLOTTI, V.; FIANDRA, V.; GRADITI, G.; SANNINO, L.; TAMMARO, M.; ULGIATI, S. *Sustainable urban electricity supply chain – Indicators of material recovery and energy savings from crystalline silicon photovoltaic panels end-of-life.* Ecological Indicators, 2016.

YANG, MENGJIN; YUANYUAN ZHOU, YINING ZENG, CHUN-SHENG JIANG, NITIN P. PADTURE, KAI ZHU. SquareCentimeter Solution-Processed Planar CH₃NH₃PbI₃



Perovskite Solar Cells with Efficiency Exceeding 15%. *Advanced Materials*, v. 27, p. 6363 – 6370, nov. 2015.

KIM, J.; RIVERA, J. L.; MENG, T. Y.; LARATTE, B.; CHEN, S. Review of life cycle assessment of nanomaterials in photovoltaics. *Solar Energy*, v.133, p. 249 -258, 2016.

KLEPA, R. B.; PRAZERES, K. C. ; SILVA, T. A. F. ; SANTANA, J. C. C. . *Compara3o entre os M3dulos de C3lulas Fotovoltaicas classificados pelas Normas Brasileiras*. In: XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produ3o - ENEGEP 2016, 2016, Jo3o Pessoa - PB. Anais do ENEGEP 2016. Rio de Janeiro - RJ:: ABEPRO, 2016. v. 1. p. 1-10.

KLEPA, R. B. *Uma abordagem sustent3vel no desenvolvimento de um material com alta capacidade reflexiva a partir de res3duo da constru3o civil*. S3o Paulo: UNINOVE, 2012. 77 p. Disserta3o (Mestrado) – Programa de P3s-Gradua3o em Engenharia de Produ3o, Faculdade de Engenharia, Universidade Nove de Julho, S3o Paulo, 2012.

MARWEDEA, M.; RELLER, A. *Future recycling flows of tellurium from cadmium telluride photovoltaic waste*. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 69, pp. 35-49, 2012.

RÜTHER, R. *Edif3cios solares fotovoltaicos: O potencial da gera3o solar fotovoltaica integrada a edifica3es urbanas e interligada 3 rede el3trica p3blica no Brasil*. Editora UFSC / LABSOLAR, 1ª edi3o, 114 p., 2004.

SANTOS, I. P. *Desenvolvimento de ferramenta de apoio 3 decis3o em projetos de integra3o solar fotovoltaica 3 arquitetura*. Florian3polis: UFSC, 2013. 278 p. Tese (Doutorado)- Programa de P3s Gradua3o em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina , Florian3polis 2013.

SILICON SOLAR. **Silicon Solar innovative solar solutions**. Dispon3vel em < <http://www.siliconsolar.com/> > Acesso em 14 de maio de 2017.

SONAI, G. G.; MELO JR, M. A.; NUNES, J. H. B.; MEGIATTO JR, J. D.; NOGUEIRA, A. F. C3lulas solares sensibilizadas por corantes naturais: um experimento introdut3rio sobre energia renov3vel para alunos de gradua3o. *Qu3mica Nova*, v. 38, n. 10, p. 1357-1365, 2015.



VI SINGEP

Simposio Internacional de Gestao de Projetos, Inovacao e Sustentabilidade
International Symposium on Project Management, Innovation and Sustainability

ISSN: 2317-8302

V ELBE

Encontro Luso-Brasileiro de Estrategia
Iberoamerican Meeting on Strategic Management