



SIMULAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA UTILIZANDO O SOFTWARE DE MODELAGEM DINAMICA DE SISTEMAS POWERSIM – UMA ABORDAGEM DIDÁTICA

Paulo Irineu Koltermann – paulo.koltermann@ufms.br
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Curso de Engenharia Elétrica
Campus Universitário – Cx Postal 549
79070-900 – Campo grande – MS

Murilo Miceno Frigo – murilofrigo@uft.edu.br
Universidade Federal do Tocantins, Curso de Engenharia Elétrica.
Avenida NS 15, 109 Norte - Plano Diretor Norte
77001-090 – Palmas – TO

Eduardo Contar – eduardo.contar@ufms.br
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Curso de Engenharia Elétrica
Campus Universitário – Cx Postal 549
79070-900 – Campo grande – MS

***Resumo:** Com a crise dos combustíveis fósseis dos anos 70 intensificou-se o estudo de novas formas de produção de energia, fazendo com que as fontes renováveis passassem a ser consideradas como uma alternativa a mais para suprir a demanda energética, fato reforçado pela crise energética que atingiu o país em 2001. Com isso produziu-se um incremento do desenvolvimento das tecnologias, seu uso e transformação. O processo de implantação de instalações com tecnologia solar fotovoltaica é uma tarefa complexa, pois implica antecipar e resolver problemas de caráter técnico, econômico, social, político e gerencial. Dentre os fatores críticos para o bom êxito destes programas estão a capacitação e a assistência técnica. A disseminação do conhecimento é fator imprescindível para evolução das tecnologias. É nesse intuito que este trabalho apresenta um modelo e simulação de uma célula solar fotovoltaica com enfoque nos sistemas dinâmicos de enlaces causais utilizando o software Powersim® e defende sua aplicação como ferramenta didática no ensino de sistemas complexos de engenharia.*

***Palavras-chave:** Energia fotovoltaica, didática, dinâmica de sistemas, Powersim.*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a matriz energética nacional, no que tange a geração de eletricidade é predominantemente hidráulica com complementação térmica. Porém ampliar o parque de geração hídrica implica em dificuldades de licenciamento ambiental e aumentar a participação da geração termelétrica, que não é considerada uma fonte limpa de energia, também não é considerada uma alternativa ideal do ponto de vista da sustentabilidade. É nesse contexto que se faz necessário à implementação de uma matriz energética diversificada, eficiente e adequada ao atendimento da demanda do país.

À luz dos desafios de uma matriz energética mais adequada às novas exigências do setor a geração fotovoltaica faz sua importância. Entre os desafios que a geração solar de energia enfrenta estão questões técnico-econômicas como barateamento dos sistemas e disseminação dos conhecimentos tecnológicos aplicáveis. As principais barreiras à expansão da geração de energia elétrica fotovoltaica são referentes à regulamentação, seguidas da falta de mão de obra qualificada para instalação e divulgação de informações e conhecimento técnico para venda e instalação que ocasionam dúvidas sobre a real eficiência e confiabilidade por parte dos usuários. A Figura 1 faz referência as barreiras encontradas para o crescimento da geração fotovoltaica em pequena escala, potências inferiores a 100 kW também denominada de microgeração (WALKER, 2005).

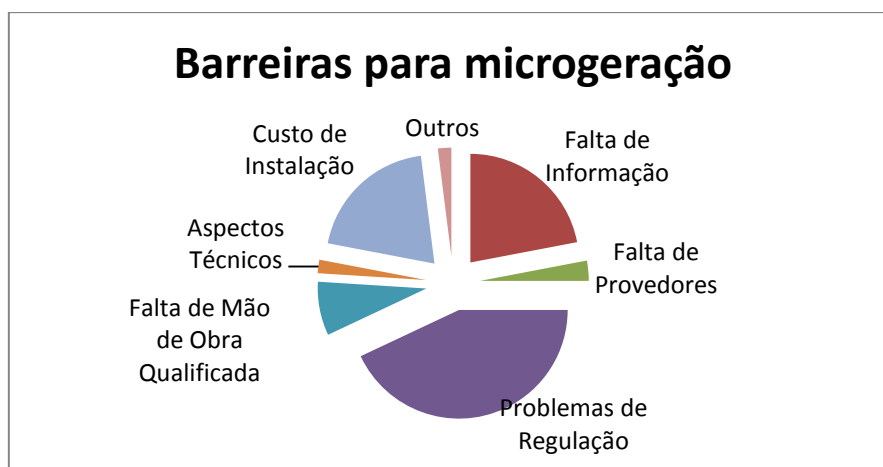


Figura 1. Barreiras percebidas para micro geração (WALKER, 2005).

Esse trabalho tem o objetivo geral de contribuir com o avanço dos conhecimentos em geração fotovoltaica de forma a diminuir as dificuldades referentes à falta de informação e mão de obra qualificada no projeto, execução e manutenção desses sistemas.

Dede uma forma especifica este trabalho pretende discutir sobre o modelo de uma célula solar, utilizando o software Powersim® Studio Enterprise 2003 versão Studio, de forma a esclarecer sobre o funcionamento e vantagens da utilização de princípios de sistemas dinâmicos.

Para modelagem da célula fotovoltaica foi utilizado o modelo de um diodo devido a sua simplicidade e eficácia na representação do funcionamento do sistema real.



1.1 Construção do Conhecimento.

A aprendizagem é um processo ativo em que o aprendiz constrói seu conhecimento através de interações com pessoas mais experientes e com o meio ambiente e também, do resultado do conflito cognitivo que ocorre entre suas expectativas e observações. Consequentemente, procura-se relacionar situações-problemas desconhecidos a partir de analogias com resultados e experiências já vivenciadas. A questão da modelagem no ensino pode ser abordada a partir de pelo menos 3 perspectivas: construção do conhecimento; explicitação e refinamento das representações mentais sobre um conhecimento; e percepção do mundo a partir de uma visão de dinâmica de sistemas (KOLTERMANN, et al, 2012).

Antes de interferir na natureza o engenheiro deve compreender os fenômenos físicos e as leis que os regem. A modelagem da natureza é papel fundamental neste processo. As ferramentas de modelagem permitem aos estudantes irem mais além, na exploração destes conhecimentos, investigando as relações entre diferentes objetos, formulando e testando hipóteses, etc. Na verdade o que se estará proporcionando em tais ambientes é a reconstrução dos modelos mentais dos estudantes sobre um determinado conhecimento. No momento em que os estudantes se confrontam com as inadequações de seus modelos mentais, abre-se a oportunidade para que eles procurem formas alternativas de entendê-los, ou seja, a busca por modelos mentais alternativos (VON BERTALANFFY, 1968).

Um modelo é um substituto para um objeto ou sistema. Qualquer conjunto de regras e relações que descrevem algo pode ser considerado um modelo. Modelos de simulação matemática pertencem à ampla classe dos modelos abstratos que incluem imagens mentais. Neste trabalho, o software POWERSIM® foi utilizado na construção e exploração do modelo de uma célula fotovoltaica (KOLTERMANN, et al, 2012).

2. MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

A energia elétrica foto gerada é obtida através da conversão da energia disponível na radiação solar em eletricidade através do fenômeno conhecido como efeito fotovoltaico. O fenômeno fotovoltaico acontece no dispositivo denominado célula fotovoltaica. Estas células são componentes opto eletrônicos que convertem diretamente a radiação solar em eletricidade. São basicamente constituídas de materiais semicondutores, sendo o silício o material mais empregado (CRESESB, 2009).

Existem vários modelos que representam as células fotovoltaicas. Um dos modelos mais utilizados, devido a sua simplicidade é o modelo de um diodo. Esse modelo relaciona quatro parâmetros, a corrente de saída, a corrente gerada, a corrente do diodo e a tensão da célula fotovoltaica. A Figura 2 abaixo representa o modelo elétrico da célula fotovoltaica.

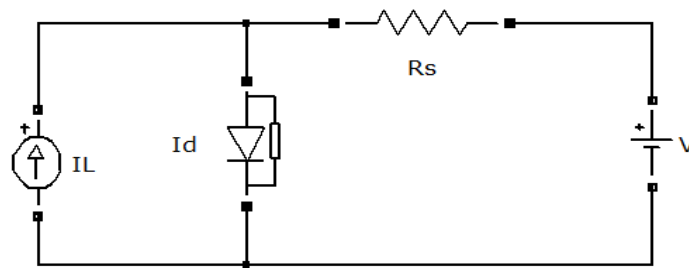


Figura 2. Circuito elétrico equivalente de uma célula solar.

A fonte de corrente IL representa a corrente foto gerada pela radiação solar incidente e o diodo representa a junção p-n a qual é a travessada pela corrente Id (corrente no diodo), que por sua vez, depende da tensão V nos terminais da célula dessa forma a equação que modela o comportamento do circuito da Figura 2 pode ser escrita pela equação 1:

$$I = IL - Ig \left[\exp\left(\frac{V}{mUt}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Onde I é a corrente de saída da célula, IL é a corrente foto gerada, Ig a corrente de fuga do diodo, m o fator de idealidade do diodo e Ut o fator térmico.

A corrente entregue a carga é resultado da subtração da corrente foto gerada pela corrente que circula pelo diodo.

A corrente foto gerada pode ser obtida através da corrente de curto circuito (Icc) da célula uma vez que em curto a corrente do diodo Id é nula e a corrente total fornecida pela célula passa a ser a corrente total gerada de acordo com a equação 2 e Figura 3, (CARNEIRO 2010).

$$I = IL = Icc \quad (2)$$

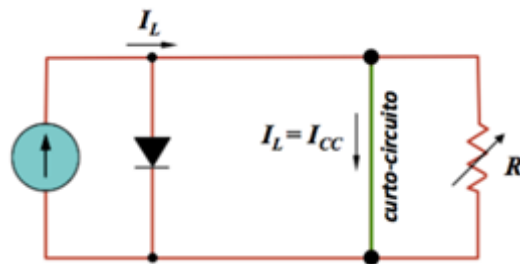


Figura 3. Célula fotovoltaica em curto, (CARNEIRO 2010).

A corrente I_{cc} corresponde a um valor máximo de corrente e é um dado fornecido pelo fabricante de acordo com condições de referencia para temperatura e radiação. Outra condição a ser analisada é quando a resistência de carga é nula, ou condição de circuito aberto, conforme figura 4, (CARNEIRO 2010).

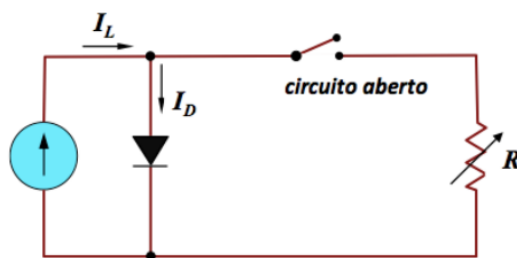


Figura 4. Célula fotovoltaica em aberto, (CARNEIRO 2010).

Nesta condição a tensão de circuito aberto V_{ca} representa o valor máximo de tensão nos terminais da célula, o seu valor é uma característica da célula sendo também um valor fornecido pelo fabricante, para condições estabelecidas de temperatura e radiação. Na condição de circuito aberto a corrente que flui pelo circuito externo da célula é nula logo a corrente foto gerada I_L passa a ser igual a I_d , dessa forma é possível se determinar a corrente de fuga I_g através da equação 3.

$$I_g = 1,148 \times 10^3 \left(\frac{T}{T_{Ref}} \right) \cdot \exp \left[\frac{E_g}{m'} \left(\frac{1}{U_{tRef}} - \frac{1}{U_t} \right) \right] \quad (3)$$

Finalmente a corrente foto gerada pode ser escrita de acordo com a equação 4.

$$I_L = I_{cc} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{Ref}} \right) - I_g \left[\exp \left(\frac{V}{mU_t} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

Onde Φ é a irradiação solar (W/m^2) incidente na célula e Φ_{Ref} é irradiação solar de referencia que geralmente possui o valor de $1000W/m^2$.

O fator de idealidade do diodo (m) e o fator térmico (U_t) são obtidos das equações 5 e 6 respectivamente. U_{tRef} é obtido da equação 6 para temperatura referência (T_{ref}) de $25^\circ C$.

$$m = \left(\frac{V_{max} - V_{ca}}{U_t \cdot \ln \left(1 - \left(\frac{I_{max}}{I_{cc}} \right) \right)} \right) \quad (5)$$

$$U_t = \left(\frac{KT}{q} \right) \quad (6)$$

Onde V_{max} e I_{max} são a tensão e a corrente de máxima transferência de potência, respectivamente, esses dados são fornecidos pelos fabricantes, T é a temperatura da célula, K a constante de Boltzmann e q carga elétrica do elétron.

A potência elétrica fornecida pela célula é obtida da equação 7.

$$P = V \left(I_{cc} \left(\frac{\Phi}{\Phi_{Ref}} \right) - I_g \left[\exp \left(\frac{V}{mU_t} \right) - 1 \right] \right) \quad (7)$$

3. SIMULAÇÃO.

O Ambiente de Modelagem Computacional Powersim® é projetado para o estudo e construção de modelos através de uma representação gráfica baseada em ícones.

A possibilidade de se utilizar o ambiente de modelagem de dinâmica de sistemas, envolvendo resolução de equações diferenciais se deve ao fato do ambiente ser apropriado para resolução por métodos de integração numérica. Em cada simulação pode-se alterar parâmetros do modelo e imediatamente observar as consequências decorrentes dessas alterações. Este procedimento consiste na análise de sensibilidade do modelo as mais variadas perturbações, permitindo que o estudo propicie uma maior interpretação dos resultados. Os diagramas de laços causais representam as relações de causa entre as variáveis envolvidas no sistema (KOLTERMANN, et al, 2012).

O modelo matemático descrito no item 2 deste trabalho foi implementado no Powersim®, e seus resultados confrontados com os resultados obtidos através do equacionamento matemáticos apresentando o mesmo resultado, o que valida a possibilidade da utilização do software para modelagem da célula fotovoltaica.

Para a simulação deste trabalho considerou-se uma célula fotovoltaica de silício policristalino cujo valores medidos em laboratório, (CARNEIRO 2010) e fornecidos em placa são:

- Corrente de curto-circuito $I_{cc} = 5,55 A$;
- Tensão de circuito aberto $V_{ca} = 0,62 V$;
- Corrente no ponto de potência máxima $I_{max} = 4,94 A$;
- Tensão no ponto de potência máxima $V_{max} = 0,49 V$.

Nas condições de referência para $T_{ref} = 25^{\circ}C$ da equação 6 é possível determinar o valor de:

- $U_{tRef} = 25,72 \times 10^3$

Da equação 5 é possível calcular o valor de m :

- $m = 3,29$

Na simulação foi considerada uma temperatura de célula de $70^{\circ}C$ e irradiação solar $\Phi = 5000 W/m^2$.

Como resultado observou-se uma potência entregue de $13,4 W$ a uma corrente de $24,3 A$ com uma tensão de saída de $0,55 V$. Variando a tensão, irradiação solar e temperatura é possível observar a variação da potência gerada em função dessas variáveis.

Nas condições de irradiação solar de referência $\Phi = 1000 W/m^2$ e temperatura da célula de $70^{\circ}C$ obteve-se o resultado de $2,04 W$ a uma corrente de $24,3 A$ considerando uma tensão de saída de $0,49 V$. Resultado idêntico ao obtido por, CARNEIRO.

A Figura 5 abaixo representa o modelo da célula fotovoltaica de um diodo no Powersim®.

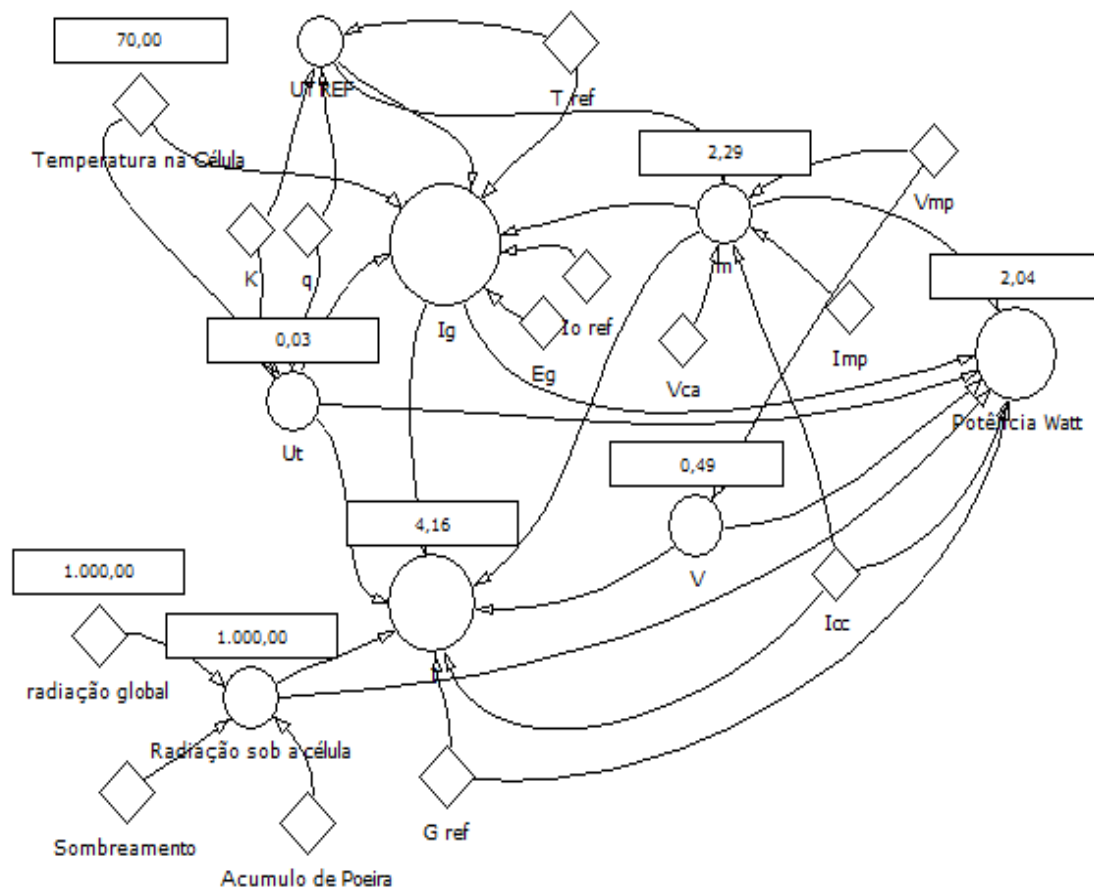


Figura 5. Modelo da célula solar no Powersim®.

Uma vez modelada a célula solar no Powersim® o estudo da interferência de fatores externos ao fenômeno fotovoltaico se faz possível. Um exemplo que pode ser observado na Figura 5, foi a inserção das variáveis sombreamento e acumulo de poeira, expressos em porcentagem sobre a radiação solar recebida. Dessa forma o usuário pode observar ao longo do tempo o efeito destes sobre a energia total gerada pelo sistema.

É possível também adicionar perturbações e avaliar o comportamento dinâmico no tempo. Além de aprimorar o modelo para aplicações em sistemas autônomos ou interligados a rede, adicionando a influencia das variáveis de rede, inversor, controlador de carga e sistema de armazenamento.

Além da facilidade da observação gráfica e lações causais as relações entre as variáveis, o software proporciona uma interface bem amigável quanto à manipulação das variáveis e observação dos resultados, como pode ser observado na Figura 6.

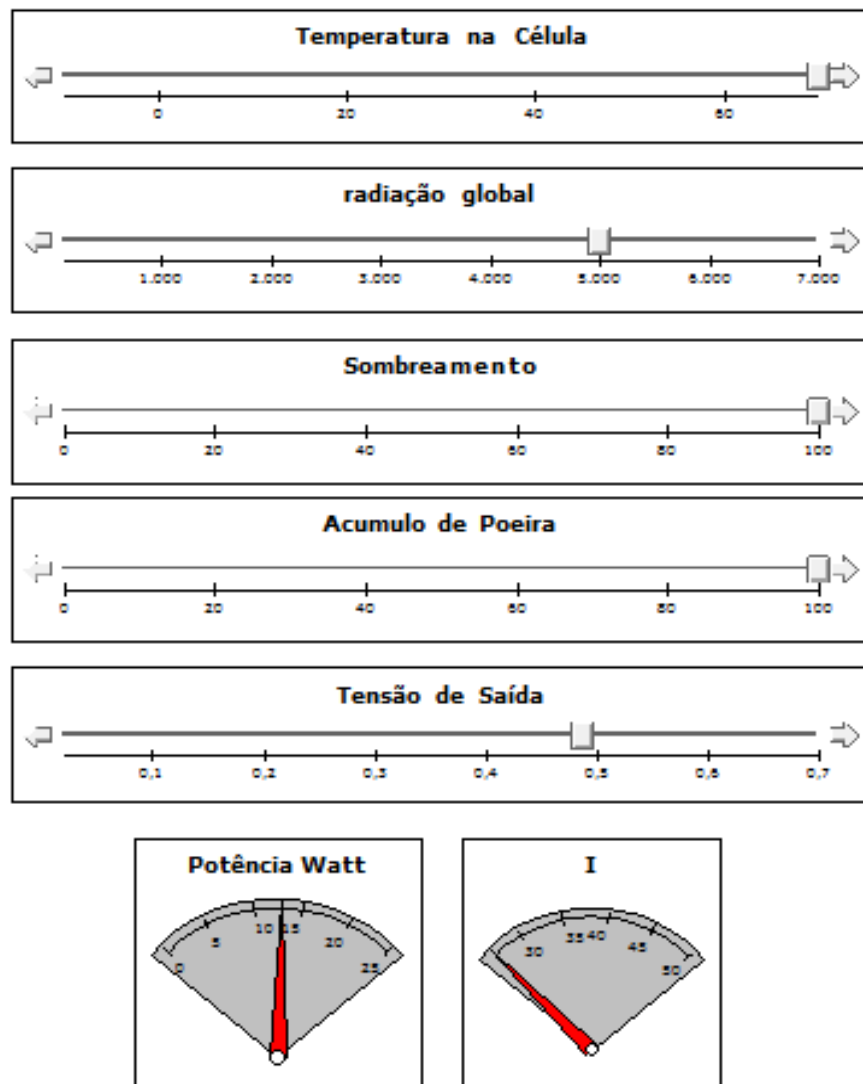


Figura 6. Interface do software Powersim®.



4. CONCLUSÕES.

A modelagem matemática de fenômenos físicos é uma tarefa complexa e exige um profundo conhecimento sobre as variáveis envolvidas e a forma como essas se relacionam. A modelagem em programas de simulação dinâmica é uma ferramenta a mais para compreensão dos sistemas complexos que o engenheiro precisa dominar no seu dia-dia. Além disso, a ferramenta se mostrou eficaz para modelagem da célula solar fotovoltaica uma vez que os resultados numéricos foram equivalentes aos resultados obtidos através dos cálculos manuais e outros softwares que possuem aplicação já amadurecida dentro da engenharia elétrica.

A grande vantagem da modelagem sistêmica é a apresentação gráfica através dos enlaces causais que evidencia de forma muito intuitiva a correlação entre as diversas variáveis do sistema.

Como indicação para trabalhos futuros destaca-se a possibilidade de ampliar o sistema modelado apresentado nesse trabalho, incluindo mais fatores que influenciam na geração fotovoltaica, além de análise de respostas dinâmicas a perturbações do sistema assim como incremento de sistemas interligados a redes de distribuição e demais dispositivos utilizados em sistemas de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTALANFFY, L. Von, A Teoria Geral Dos Sistemas. Rio De Janeiro, Ed. Vozes, 1968.

CARNEIRO, J. Semicondutores – modelo matemático da célula fotovoltaica, escola de ciências, campus de Azurém, Guimarães, apostila de aula, 2010

CRESESB – Centro De Referência Para Energia Solar E Eólica Sérgio De Salvo Brito. Tutorial de energia solar – princípios e aplicações. Disponível em:< www.creseb.cepel.br> acesso em 30/03/2009.

KOLTERMAN, Paulo Irineu, Pereira, Valmir Machado, Ortega, Jeferson M., Frigo, Murilo M. Modelagem e simulação de dispositivo eletromagnético com abordagem em dinâmica de sistemas, Anais: XL Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, Belém, 2012.

WALKER, Sara. Potential For Microgeneration: Study And Analysis. 2005. Project Report. Department Os Trade And Industry, London, Uk. Disponível Em: <[Http://Nrl.Northumbtia.Ac.Uk/468/1/Walker%20sl%20%2d%20potential%20for%20microg%20eneration%20study%20and%20analysis%20%2d](http://Nrl.Northumbtia.Ac.Uk/468/1/Walker%20sl%20%2d%20potential%20for%20microg%20eneration%20study%20and%20analysis%20%2d)>



SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC CELL OPERATION USING SOFTWARE MODELING OF DYNAMIC SYSTEMS POWERSIM - TEACHING APPROACH

***Abstract:** With the crisis of fossil fuels '70s intensified the study of new forms of energy production, making renewable sources started to be considered as an alternative to more energy to meet demand, a fact reinforced by the energy crisis that hit the country in 2001. produced a result with an increase in the development of technologies, their use and processing. The deployment process installations with photovoltaic solar technology is a complex task since it implies anticipate and resolve problems of character technical, economic, social, political and managerial. Among the critical factors for the success of these programs are training, and technical assistance. The dissemination of knowledge is essential to changing technology factor. It is this order that this work presents or model and simulation of a photovoltaic solar cell with a focus on dynamic systems of causal linkages using Powersim ® software and defends its use as a didactic tool in teaching complex systems engineering.*

***Key-words:** didactic, photovoltaics, Powersim, system dynamics.*