



## IDENTIFICAÇÃO DE EVENTOS DE SOMBREAMENTO EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS VIA TÉCNICAS DE MAPEAMENTO TEMPO-FREQUÊNCIA

**Thiago de Carvalho Rêgo** – thiago.rego@maine.edu  
Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé  
Avenida Maria Anunciação Gomes de Godoy, nº1650 - Bairro Malafaia  
96413-172 – Bagé – Rio Grande do Sul

**Fernando Luis Dias** – fernandodias@unipampa.edu.br  
Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé

**Jocemar Biasi Parizzi** – jocemarparizzi@unipampa.edu.br  
Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé

**Francine de Almeida Kalas** – frankalas@iprj.uerj.br  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico do Rio de Janeiro

**Vera Lúcia Duarte Ferreira** – veraferreira@unipampa.edu.br  
Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé

**Resumo:** Este trabalho tem por objetivo apresentar uma análise dos registros da tensão elétrica de uma placa fotovoltaica sujeita a eventos, ou perturbações, do tipo sombra sobre os coletores do painel. Para tanto, um experimento prototipo para aquisição do sinal foi realizado simulando o evento desejado. A modelagem do sinal obtido leva em consideração incertezas aleatórias subjacentes a dados reais. Nesse sentido, uma versão de mapeamento tempo-frequência baseada na Short-Time Fourier Transform - STFT, com ajuste de resolução dado pela curtose local, denominada Variable Short-Time Fourier Transform – VSTFT, foi aplicada para identificar os trechos de duração deste evento. Os resultados obtidos são mostrados no espectrograma, perfil de curtose e variação do tamanho da janela da transformada.

**Palavras-chave:** Energia fotovoltaica, Sombreamento, VSTFT, Curtose

**Abstract:** This paper aims to present an analysis of the voltage records coming from a photovoltaic panel subject to disturbances like shadows on the photovoltaic cells. Thus, a prototype experiment for signal acquisition was performed by simulating the desired disturbance on the photovoltaic panel. The signal modeling acquired takes into account random uncertainties implied to the real data. In this direction, a version of time-frequency mapping based on the Short-Time Fourier Transform - STFT, with resolution setting given by the local kurtosis, named Variable Short-Time Fourier Transform - VSTFT was applied to identify the performance of excerpts from the performed disturbance on the photovoltaic panel. The obtained results are shown in the spectrogram, kurtosis profile and window size variation of the VSTFT.

**Keywords:** Photovoltaics, Shadowing, VSTFT, Kurtosis



## 1. INTRODUÇÃO

Na sociedade contemporânea a demanda por tecnologias inovadoras que integram o homem a Natureza tem impulsionado pesquisas embasadas em alternativas econômicas direcionadas a gestão ambiental. No tocante ao setor energético, a atual necessidade refere-se a contabilização dos efeitos decorrentes da preservação e da conservação do meio ambiente. Dessa forma, busca-se minorar o uso de energias baseadas na massiva exploração de recursos naturais e ampliar o uso de energias limpas e renováveis.

Inserido nesse cenário, o uso de energia solar para gerar energia elétrica, por conversão de fótons em elétrons, denominados sistemas fotovoltaicos, tem se destacado como uma tendência em crescente expansão, tanto por se tratar de uma fonte de energia economicamente viável, por proceder de uma fonte de energia luminosa inesgotável (FIORENTINO, 2004; SEGUEL, 2009).

No Brasil, a energia fotovoltaica é considerada como uma saída para a matriz energética e para o meio ambiente, sobretudo por sua localização geográfica e aspectos climáticos (SILVA, 2015). Além disso, do ponto de vista prático, a capacidade de geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos comparada, por exemplo, com a gerada pelos sistemas eólicos esta na razão de aproximadamente 1,62 (IEEE, 2014), o que vem impulsionando projetos privados e governamentais e atraindo o interesse de fabricantes pelo mercado brasileiro (AMBIENTE BRASIL, 2009). Assim sendo, diversas pesquisas voltadas para o aumento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos tem sido desenvolvidas (SMITA GANESH PACHPANDE et al, 2012; IEEE, 2014; KASEN et al, 2015).

De acordo com Tonelli-Neto (2012), o desenvolvimento de um sistema integrado o qual combine aquisição, processamento e análise de dados possibilita o conhecimento necessário frente à tomada de decisão no ambiente de distribuição de energia elétrica. Essa integração é de grande importância no diagnóstico de distúrbios do tipo anomalias de tensão, bem como na sua relação com a detecção, classificação e localização de falhas. Diante desta perspectiva, técnicas e tecnologias que permitam analisar as mudanças oriundas da constante evolução do sistema elétrico é uma necessidade.

Neste contexto, o espectro harmônico de Fourier é elemento fundamental da análise da qualidade de energia elétrica (QEE) (SOUZA et al, 2005), visto que todos os fenômenos relacionados a QEE devem ser detectados, localizados e classificados. É importante observar que a análise via Transformada de Fourier (TF) é restrita ao domínio da frequência, uma vez que se refere à representação das componentes harmônicas do sinal nesse domínio. Assim, a utilização da análise tempo-frequência é uma necessidade para que se obtenha maior exatidão na descrição do espectro. Dentre as várias formas de representação tempo-frequência a mais tradicional é a Short-Time Fourier Transform (STFT), a qual consiste na introdução de uma função de suporte finito (janela) na TF.

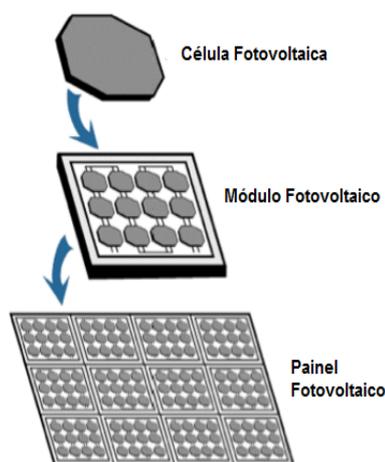
Neste trabalho, um esquema de janela variável da STFT, proposto por Dias (2014), denominado Variable Short-Time Fourier Transform (VSTFT), é aplicado a um sinal elétrico. Para tal, é realizado um experimento protótipo utilizando um módulo fotovoltaico acoplado a uma placa de aquisição de dados interligada ao software Labview em laboratório. O sinal de tensão sofre perturbações do tipo sombra no módulo fotovoltaico, que são captados e registrados pelo sistema e posteriormente analisados através da técnica VSTFT. O mapeamento tempo-frequência dos distúrbios de tensão permitem a identificação dos trechos de ocorrências de sombreamento do painel.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Aquisição dos sinal experimental

A geração de eletricidade a partir de energia solar é realizada por células fotovoltaicas e deriva do efeito gerado pela iluminação solar sobre o material do dispositivo eletrônico, denominado efeito fotovoltaico (PINHO & GALDINO, 2014). A associação entre células fotovoltaicas constitui um painel fotovoltaico, o qual funciona como um gerador de energia elétrica (Figura 1).

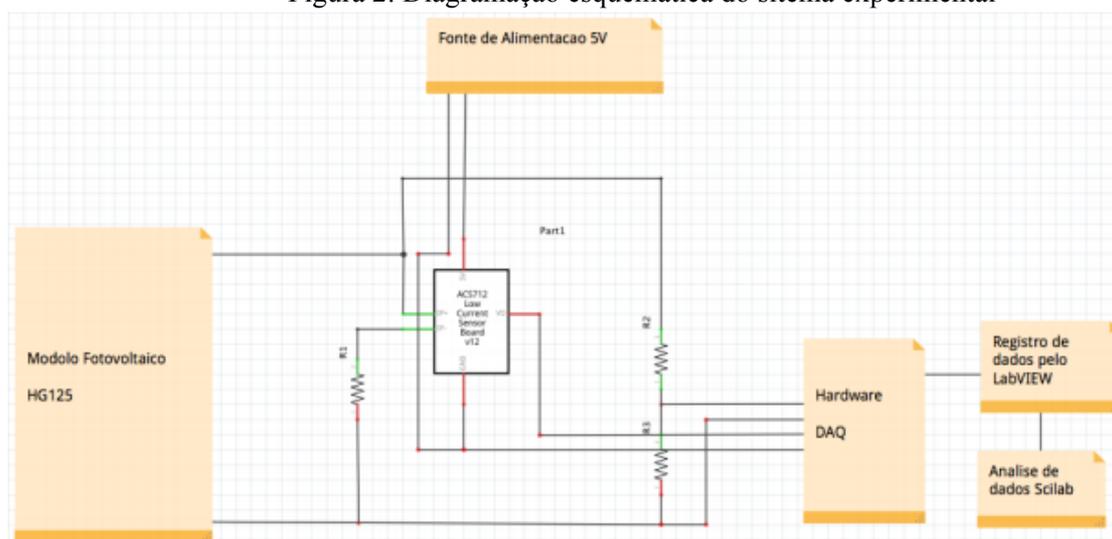
Figura 1: Sistema fotovoltaico.



Fonte: Adaptado de SMITA GANESH PACHPANDE (2012)

O experimento protótipo desenvolvido para averiguação do efeito de eventos do tipo sombra sob os coletores no módulo fotovoltaico consistiu na montagem de um sistema composto por um painel fotovoltaico, uma placa de aquisição de dados (módulo DAQ - *Data Acquisition*) e um computador de apoio para o registro e análise dos dados captados pelo sistema fotovoltaico (Figura 2).

Figura 2: Diagramação esquemática do sistema experimental

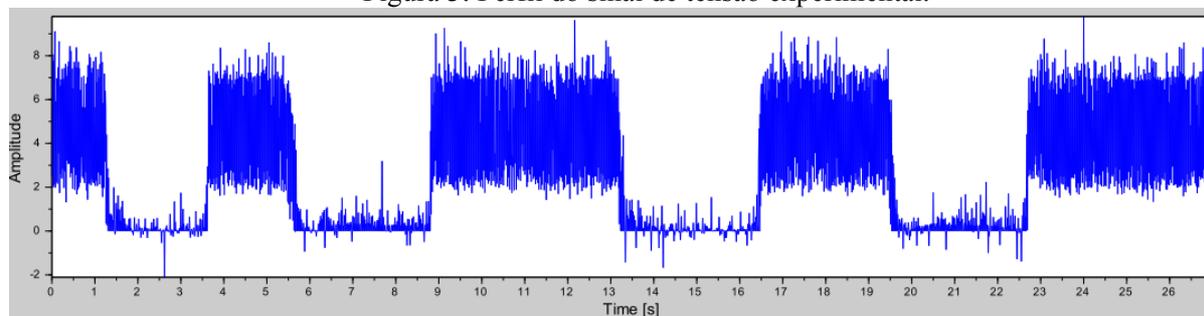


O painel fotovoltaico foi instalado nas dependências do campus Bagé da Universidade Federal do Pampa, sob as coordenadas de 31° 19' 53" S de latitude, 54° 06' 25" W de longitude e 212 metros de altitude, que foi direcionado para norte geográfico durante os experimentos afim de captar o máximo de energia solar irradiante.

O módulo DAQ, recebe os sinais de tensão provenientes do painel fotovoltaico. O sistema utiliza frequência de 100 Hz para leitura dos sinais no LabVIEW, que também foi configurado para capturar 100 amostras em um intervalo de tempo de 0.01 segundos. Tendo em vista que o tempo de estabilização do painel fotovoltaico corresponde a 17 ms, há de se ressaltar a dificuldade de analisar sinais captados por longos períodos de tempo por conta de sua extensão. Dessa forma, para obter de forma correta os sinais captados pelo DAQ, realizou-se a configuração deste módulo num bloco denominado DAQ Assistant na biblioteca do LabVIEW, para o número de amostras captadas e o intervalo de tempo para o registro dos sinais. Após a configuração do sistema, esses dados foram registrados no software LabVIEW e analisados matematicamente com auxílio do software Scilab.

A obtenção do sinal experimental foi realizada através do sombreamento temporário do painel fotovoltaico. O experimento propõe, assim, simular eventos reais e aleatórios, tais como presença de neve, de folhas, cobertura de nuvens, pássaros entre outros tipos de sombras que podem gerar distúrbios no painel. Os sinais foram gerados a partir de quatro (4) intervenções de sombreamentos, num tempo total de vinte e sete (27) segundos de duração. A Figura 3 mostra o perfil do sinal experimental após os sombreamentos realizados.

Figura 3: Perfil do sinal de tensão experimental.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Mapeamento Tempo-Frequência

Sinais experimentais contêm informações que só podem ser identificadas com o rastreamento temporal do conteúdo de frequências (também conhecidos como harmônicos) que compõem o sinal. As ferramentas clássicas de análise de harmônicos são baseadas na transformada de Fourier. A idéia básica da TF está no mapeamento de informações do domínio do tempo e em informações no domínio da frequência.

O principal inconveniente da TF é a forma global (i.e., toda extensão do sinal) de sua análise, que é incapaz de identificar variações locais e variações que evoluem no tempo. Sob o ponto de vista estocástico, isto significa que ela é uma ferramenta adequada para análise de sinais estacionários e inadequada para os não estacionários (MORETTIN, 1999), que é o caso de grande parte dos sinais reais, em particular, o sinal experimental obtido no experimento protótipo realizado neste trabalho.

Visando contornar a restrição imposta a aplicação da TF a sinais reais, Gabor (1946) propôs o primeiro esquema de Fourier local, por inserção de um núcleo de suporte finito na TF. Desde então, várias versões de transformada de Fourier local tem sido propostas, como por exemplo Cohen (2005), diferenciando-se apenas quanto ao tipo de janela que compõem o núcleo da transformada, a já supra-acima mencionada, denominadas Short-Time Fourier Transform – STFT.

Visando adaptar-se a STFT às características locais do sinal, no presente trabalho, estimativas locais da curtose são inseridas na STFT visando ajustar o suporte da janela as características locais do sinal analisado. Tais esquemas de Fourier são denominados Variable Short-

Time Fourier Transform – VSTFT (LEE, 2013; DIAS, 2014). Para um sinal  $x(t)$  a VSTFT é definida por:

$$\text{VSTFT}(t_{\text{local}}, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) w(\tau - t_{\text{local}}) e^{-2\pi i f \tau} d\tau \quad (1)$$

onde  $t_{\text{local}}$  representa o tempo de amostragem local e  $w(\tau)$  a função de janela Gaussiana.

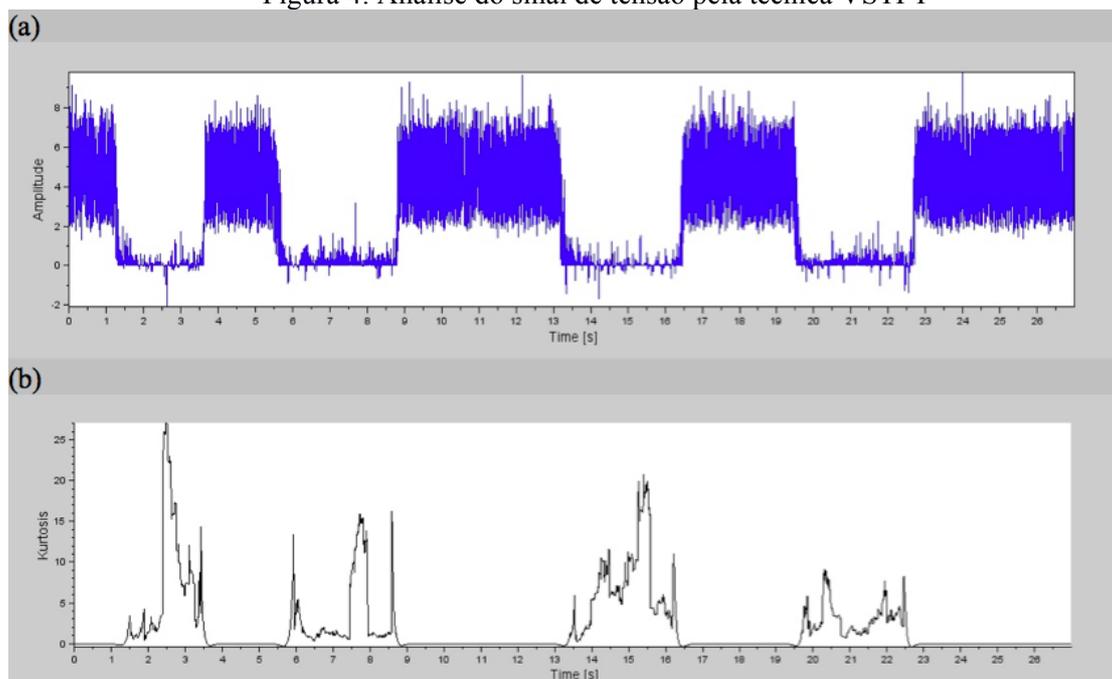
Com esta definição, a principal característica da VSTFT, está na sua capacidade de ajuste de resolução *a posteriori*, por utilizar como parâmetro de variação do tamanho da janela a curtose local do sinal. Ou seja, em regiões onde a curtose é relativamente alta, uma janela curta é aplicada para ampliar a resolução da imagem no local. Em contrapartida, grandes janelas são aplicadas nas regiões onde a curtose é relativamente pequena. Convém salientar que para valores de curtose maiores do que 3 a densidade de probabilidade do sinal possui gráfico com pico acentuado e caudas pesadas. Porém, para valores menores do que 3 o gráfico apresenta perfil de platô (achatado) e caudas leves (MUMFORD, 2010; GRENANDER, 2007; DIAS, 2015).

### 3.2. Aplicação da técnica VSTFT

A análise dos dados adquiridos pelo LabVIEW foi realizada utilizando o esquema VSTFT. A função deste esquema consiste em estabelecer o mapeamento tempo-frequência, a partir de estimativas da curtose, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5.

As Figuras 4(a-b) mostram o perfil do sinal de tensão obtida no experimento protótipo e sua curtose, respectivamente. Comparando-as, ponto a ponto, fica evidente que o perfil da curtose captura as mudanças de regime de frequências do sinal, pelas estimativas feitas sobre a densidade de probabilidade local do sinal, tornando possível a localização dos trechos onde as perturbações por sombreamento são ativadas.

Figura 4: Análise do sinal de tensão pela técnica VSTFT



Legenda: (a) Perfil da tensão, (b) Curtose da tensão.

A amplitude do excesso de curtose mostrado na Figura 4(b) identifica as mudanças do regime de frequência, bem como a localização das variações bruscas do sinal. Os intervalos de tempo com excesso de curtose aproximadamente zero evidenciam que a densidade de probabilidade do sinal é próxima da distribuição normal. .

A Figura 5 apresenta a variação do tamanho da janela relacionado ao regime de frequência no tempo conforme pode ser observado no espectrograma apresentado na Figura 6. Nas Figuras 4(b) e 5 é possível verificar que o ajuste da janela sobre o sinal é afetado diretamente de acordo com a mudança da curtose. Aliado a esse fato, percebe-se que o perfil do ajuste da janela é inversamente proporcional ao perfil da curtose.

Figura 5: Variação da janela no tempo

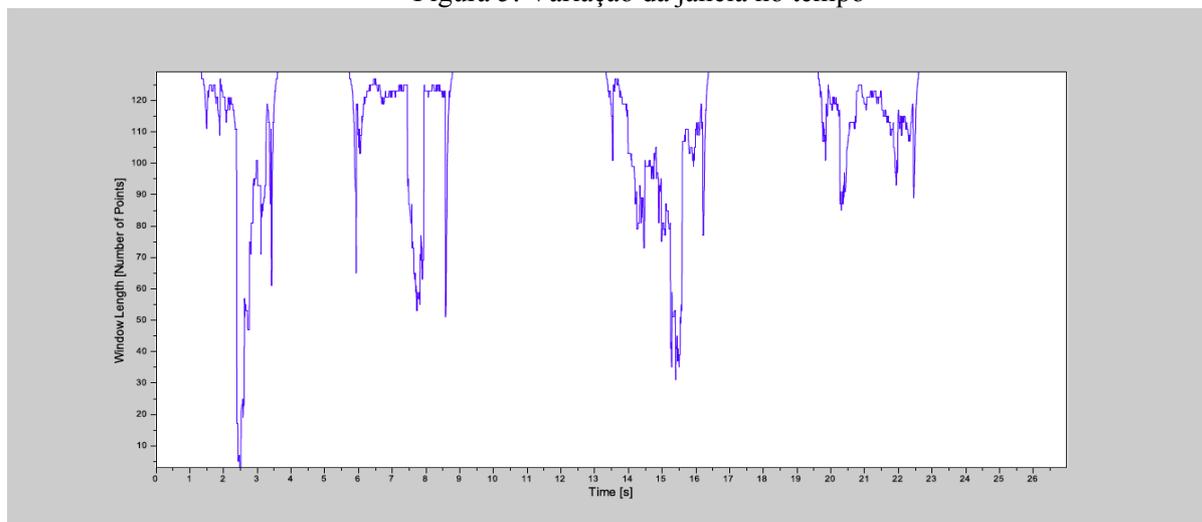
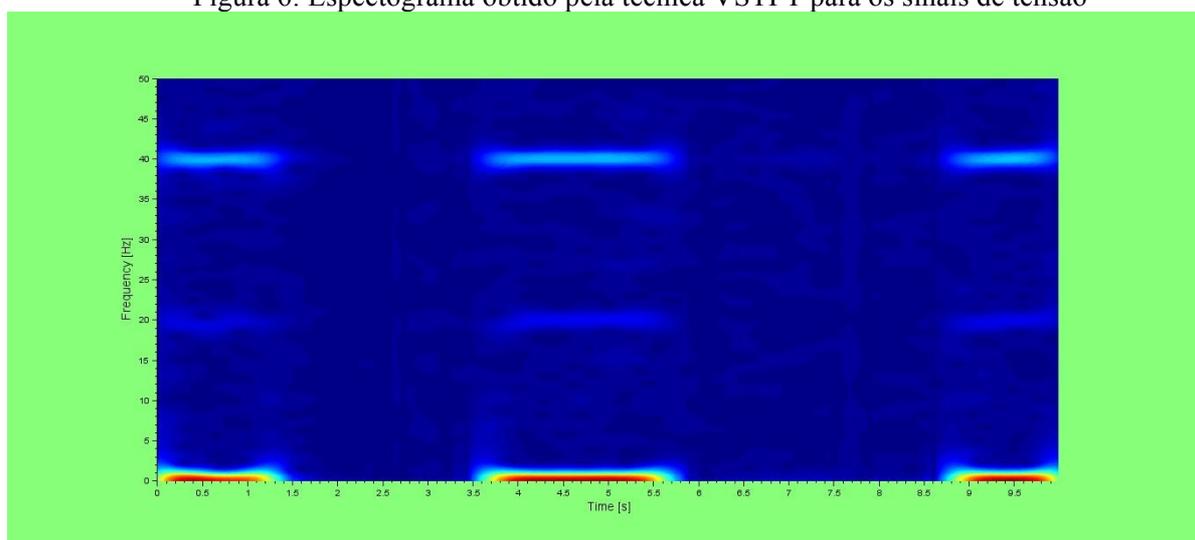


Figura 6: Espectrograma obtido pela técnica VSTFT para os sinais de tensão



### 3.3. Autorização/Reconhecimento

Os autores cedem os direitos autorais à Organização do Simpósio para a publicação deste trabalho. A responsabilidade pelo uso de material de terceiros é exclusiva do autor do trabalho.



#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um esquema de Fourier local de janela variável proposto por Dias (2014), denominado VSTFT, foi aplicado a sinais oriundos de painéis fotovoltaicos e obtido o mapeamento tempo-frequência da resposta de eventos de sombreamento.

Os resultados gerados com aplicação do esquema VSTFT, evidenciam a localização das componentes de frequência no tempo, indicando esse como uma ferramenta útil na investigação da variabilidade do sinal. Observou-se que o ajuste da janela pela curtose do sinal permite capturar informações locais, corroborando para um processamento mais exato, o que possibilita gerar espectrogramas que evidenciam a evolução espectral.

A metodologia VSTFT mostrou-se uma boa ferramenta no monitoramento e na captura dos eventos de sombreamento realizados sobre o painel fotovoltaico. Assim, por meio dessas análises é possível compreender como essas perturbações afetam a tensão gerada pelo painel, assim como analisar as faixas de frequência presentes no sinal. Esse entendimento é essencial na busca de soluções para os efeitos de tais perturbações visando melhorar a eficiência do sistema fotovoltaico assim como melhorar a qualidade de energia proveniente do mesmo.

#### 5. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

AMBIENTE BRASIL. **Energia solar e o meio ambiente.** Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=../energia/index.html&conteudo=../energia/solar.html>> Acesso em: 10 de jul. 2016.

COHEN, L. Generalized phase-space distribution functions. **Journal of Mathematical Physics**, AIP Publishing, v. 7, n. 5, p. 781-786, 2005.

DIAS, F.L. **Um esquema de Fourier local para análise tempo-frequência de sinais não-estacionários aplicado a ruído eletroquímicos.** Nova Friburgo. 2014. Tese (Doutorado Modelagem Computacional) - Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

DIAS, F. L., FERREIRA, V. L. D., TENENBAUM, R. A. e SANTOS, L. R. Mapeamento Tempo - Frequência em Sinais de Acústicas de Sala. **Anais do XVIII Encontro Nacional de Modelagem Computacional e VI Encontro de Ciências e Tecnologias dos Materiais.** SENAI-CIMATEC, 13-16 Outubro de 2015, Salvador-BA.

FIORENTINO, J. J. **Análise do desempenho de um conjunto de módulos fotovoltaicos aplicados para energização rural.** 2004. Tese (Doutorado Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

GABOR, D. Theory of communication. Part 1: The analysis of information. **Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering, Journal of the Institution**, v. 93, n. 26, p.429-441, 1946.

GRENANDER, U.; MILLER, M.I. Pattern theory: from representation to inference, volume 1. **University Press Oxford**, Oxford, 2007.

GRÖCHENIG, K. **Foundations of time-frequency analysis.** Springer, 2001.

IEEE - INSTITUTO DE ENGENHEIROS ELETRICISTAS E ELETRÔNICOS. **Energia solar fotovoltaica de terceira geração.** Disponível em: <<http://www.ieee.org.br/wpcontent/uploads/2014/05/energia-solar-fotovoltaica-terceira-geracao.pdf>>. Acesso em: 16 jul. 2016.



KASEN, H.A.; CHAICHAN, M.T.; AL-WAELI, A.H.; MANI, K. Effect of shadow on the performance of solar photovoltaic. In: **MED GREEN FORUM: Mediterranean Green Buildings & Renewable Energy**, 26-28 Florence, Italy, At Florence, Italy. 2015.

LEE, J. **Variable Short-Time Fourier Transform for Vibration Signals with Transients**. Department of Marine Engineering, National Kaohsiung Marine University. Taiwan, 2012.

LEE, J. **Kurtosis Based Time-frequency Analysis Scheme for Stationary or Non-stationary Signals with Transients**. Department of Marine Engineering, National Kaohsiung Marine University. Taiwan, 2013.

MESSEGER, R.; VENTRE, J. **Photovoltaic systems engineering** 3rd edition. CRC Press 2010

MORETTIN, P.A. **Ondas e Ondaletas: Da Analise de Fourier a Analise de Ondaletas**. Edusp, Sao Paulo, 1999.

MUMFORD, D.; DESOLNEUX, A. **Pattern theory: the stochastic analysis of real-world patterns**. A K, Peters, Ltd., Natick, MA. 2010.

PINHO, J.C e GALDINO, M.A., **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, CEPTEL, Rio de Janeiro, 2014.

SEGUEL, J. I. L. **Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando técnica MPPT e controle digital**. Dissertação (Mestrado). - Universidade Federal de Minas Gerais. 2009.

SILVA, V.B., Energia fotovoltaica: eficiência energética e sustentabilidade em um conjunto habitacional no Rio Grande do Sul. **Periódico do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNDB** v.1, n.2. 2015.

SIQUEIRA, J.A.C. **Desempenho de um sistema híbrido eólico-fotovoltaico de pequeno porte para energização rural**. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista. 2005.

SOUZA, S.A.; OLOESKOVICZ, M.; COURRY, M.V. A transformada de Fourier janelada aplicada a qualidade de energia elétrica. **Anais do VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica**. Belém-Pará, 2005.

SMITA GANESH PACHPANDE, M.E. et al., **International Journal of Science and Applied Information Technology**, v.1, n.2, p. 46 - 51. 2012.

TONELLI-NETO, M. S.; DECANINI, J.G.M.S.; MINUSSI, C.R. Diagnóstico de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica via Transformação da Wavelet e Lógica Fuzzy. **Anais do IV Simposio Brasileiro de Energia Eletrica**, Goiania-GO, 2012.