



**XXIII SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/22
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIV

**GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA
EDUCAÇÃO – GET**

**ESTUDOS DE RENDIMENTO E TEMPERATURA EM PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM USO DE TÉCNICA DE
CONCENTRAÇÃO SOLAR**

**Gustavo Marques Mattos
LIF – COPPE/UFRJ**

**Marcelo Martins Werneck(*)
LIF – COPPE/UFRJ**

**Fernando Luiz Maciel
LIF – COPPE/UFRJ**

**Regina Célia da Silva Barros Allil
LIF – COPPE/UFRJ**

**Fábio Vieira Batista de Nazaré
LIF – COPPE/UFRJ**

**César Cosenza de Carvalho
LIF – COPPE/UFRJ**

**Daniel Moreira dos Santos
LIF – COPPE/UFRJ**

RESUMO

Devido ao aumento da demanda de energia conforme passam os anos, a energia solar torna-se uma fonte promissora. Um painel fotovoltaico, ao captar a radiação solar, produz energia elétrica proporcionalmente à irradiação solar. No entanto, essa conversão pode ser mais eficiente se utilizadas técnicas de concentração da luz do Sol no painel durante o período diurno. A técnica utilizada nesta pesquisa consiste na utilização de três espelhos planos que se movimentam acompanhando a posição do Sol, de forma que sempre há reflexo da irradiação solar no painel. A eficiência energética desse sistema foi comparada com um painel de referência fixo, onde não há a técnica de concentração solar.

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência Energética, Energia Limpa, Energia Solar, Painel Fotovoltaico e Sistemas de Espelhos.

1.0 - INTRODUÇÃO

O interesse mundial em fontes limpas de energia é crescente com o aumento da consciência sobre o meio-ambiente [1]. Órgãos governamentais fomentam a substituição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, dada a preocupação com a qualidade do ar e com o aquecimento global, uma vez que tais modelos de geração invariavelmente liberam grande quantidade de dióxido carbono na atmosfera.

Dentre as alternativas, a energia solar fotovoltaica tem especial importância por ter longa vida útil, não produzir som, ser de manutenção fácil e de baixa frequência. Isso se deve ao fato do sistema não possuir peças móveis, poder ser instalada perto do local de consumo, reduzindo o custo de transporte da energia e possibilitando que eletricidade alcance regiões remotas [2].

Este projeto visa a geração de energia elétrica através da utilização de espelhos concentrando a luz do Sol em um painel fotovoltaico. Tal abordagem se justifica na medida em que dispõe à exposição solar mais metros quadrados

(*) LIF – Laboratório de Instrumentação e Fotônica - Av. Horácio Macedo, 2030, bloco I 2000, Sl. 036
COPPE/UFRJ/CT – Rio de Janeiro – RJ - Caixa Postal 68564 - CEP: 21.941-598 - Tel: 21 3938-8200

de captação para geração de energia a um custo reduzido, visto que o m^2 de painel solar é muito mais caro do que o de material reflexivo.

Diversos recursos serão utilizados para alavancar a eficiência do sistema. Um deles é o rastreamento em dois eixos do Sol pelos espelhos, de maneira que estes reflitam a luz solar no painel fotovoltaico ao longo de todo o dia. Técnicas de eletrônica de potência como o rastreamento do ponto de máxima potência fornecida pelo painel solar serão essenciais para a otimização da eficiência do sistema.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O projeto do sistema para aumento da eficiência energética de painéis fotovoltaicos visa a geração de energia elétrica através da concentração da luz solar, por meio de espelhos planos, num painel fotovoltaico colocando-o à exposição de mais energia solar por metros quadrados para geração de energia a um custo reduzido. Assim, espelhos encarregam-se de refletir a luz do Sol em um único painel solar conforme a Figura 1. Os espelhos ficam montados sobre suportes especiais que são capazes de realizar movimentos em dois eixos (azimutal e elevação) de maneira a ser possível o rastreamento da posição do Sol e a correta reflexão da sua luz na unidade fotovoltaica.

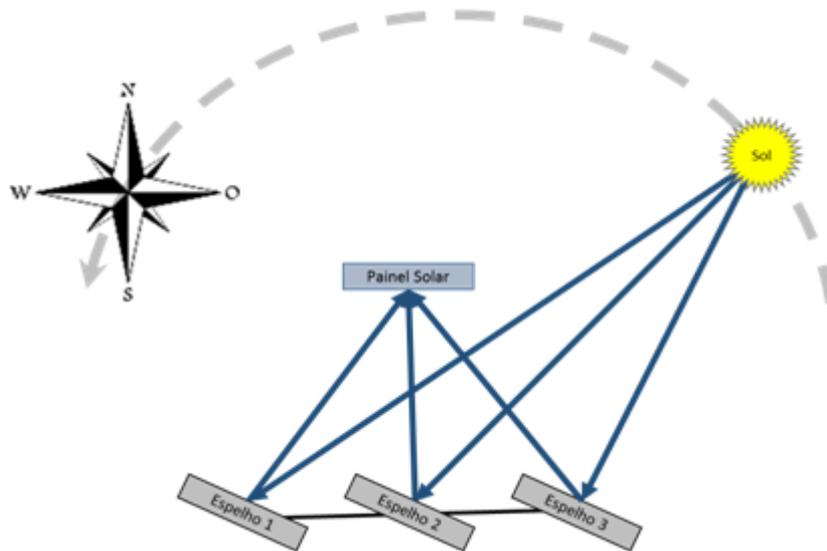


Figura 1. Disposição dos espelhos para concentração da luz solar.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 2 demonstra o funcionamento geral do sistema concentrador de energia solar e dos seus módulos principais.



Figura 2. Diagrama de blocos do projeto.

2.1 Unidade de Monitoramento e Controle (UMC)

A Unidade de Monitoramento e Controle (UMC) é responsável pelos movimentos dos espelhos em relação ao Sol, do monitoramento do painel fotovoltaico, do monitoramento de sua temperatura e do monitoramento da irradiação solar.

A UMC é composta por um computador industrial, que é responsável pelo funcionamento dos softwares de monitoramento e controle. A UMC monitora e controla o sistema de espelho através do módulo de controle conforme o diagrama de blocos da Figura 3.

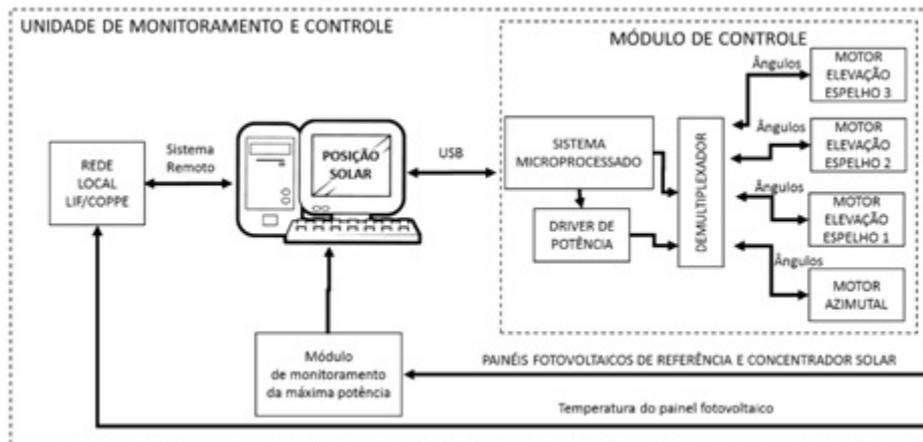


Figura 3. Diagrama de blocos do sistema de monitoramento e controle dos espelhos.

2.2 Software do Cálculo da Posição Solar

A posição do Sol é determinada pelo seu ângulo azimutal (azimute) e pelo ângulo de elevação (altura) conforme apresentado na Figura 4. O azimute é o ângulo entre o norte geográfico e a sombra de uma haste perpendicular ao solo. Já a elevação é o ângulo entre a altura do sol e a sombra da mesma haste.

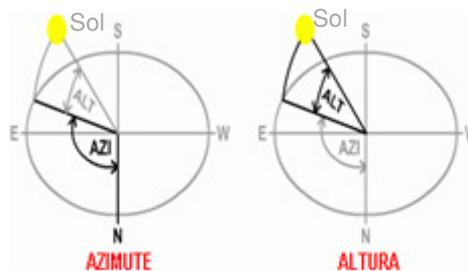


Figura 4. Azimute e Elevação.

A inviabilidade de medir os ângulos em tempos curtos proporcionou o desenvolvimento de uma fórmula matemática para medir esses ângulos com base na longitude e latitude do observador. Hoje há vários programas desenvolvidos pelo mundo para calcular a posição solar que levam em conta além da longitude e latitude, outros parâmetros que possam interferir a localização do Sol como a temperatura, pressão, altitude, etc. Nesse projeto utilizou-se e adaptou-se um software para calcular a posição solar desenvolvido pela National Renewable Energy Laboratory Center [3].

2.3 Módulo de Controle

O módulo de controle foi desenvolvido para o controle e monitoramento dos motores de azimute e elevação. Ele tem a capacidade de controlar até oito motores e é composto de um sistema microprocessado, um driver de potência e um demultiplexador com oito saídas para controlar os espelhos.

O sistema microprocessado para esse projeto foi um sistema baseado na plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR de placa única chamada Arduino Mega 2560. O driver de potência escolhido para trabalhar com o sistema microprocessado foi o Monster Moto Shield. A demultiplexação do driver de potência foi realizado por um sistema de oito relés para que cada motor dos espelhos pudessem funcionar utilizando apenas um driver.

2.4 Firmware do Sistema Microprocessado

Um firmware foi desenvolvido para o sistema microprocessado controlar e monitorar os motores dos espelhos. Ele tem o objetivo de posicionar os espelhos de acordo com os valores recebidos pelo software que calcula a posição angular solar (azimute e elevação). O fluxograma do firmware é apresentado na Figura 5.



Figura 5. Fluxograma do firmware do sistema microprocessado.

2.5 Software Posição Solar

O software “Posição Solar” tem a função de calcular a posição atual do sol (azimute e elevação) utilizando como dados principais o local (latitude e longitude), a data e a hora.

Os ângulos calculados são enviados para o sistema microprocessado que por sua vez aciona os motores posicionando os espelhos para a posição desejada (luz solar refletida incidindo no painel fotovoltaico). O software foi desenvolvido em Visual Studio 2012 e seu fluxograma está apresentado Figura 6.

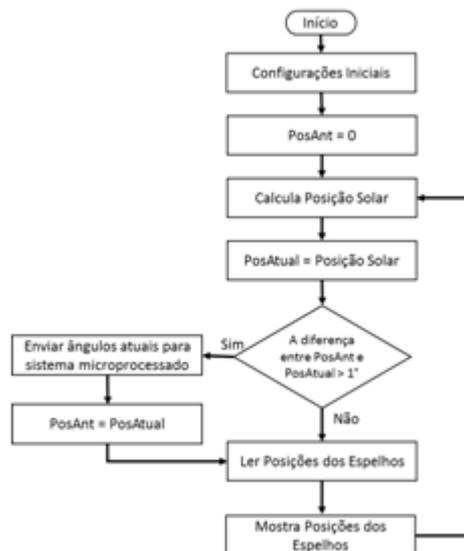


Figura 6. Fluxograma do programa principal do projeto Fazenda Solar.

2.6 Monitoramento do Painel Fotovoltaico

A disposição do painel fotovoltaico nesse projeto implica na maior concentração de raios solares e consequentemente o aumento de sua temperatura. Portanto, o monitoramento temperatura do painel fotovoltaico foi realizado por quatro sensores à fibra óticas fixados em quatro pontos diferentes na parte traseira do painel. Cada sensor de fibra óptica tem uma FBG (“Fiber Bragg Grating” – Rede de Bragg) na sua extremidade para monitorar a temperatura [4]. Os sensores 1 e 3 trabalham numa faixa de comprimento de onda em torno de 1534 nm, enquanto que os sensores 2 e 4 em torno de 1550 nm. Esses valores de comprimento de onda variam conforme a variação de temperatura. A equação que modela matematicamente a relação entre a temperatura e o comprimento de onda do sensor a fibra óptica é dada pela equação (1).

$$T(^{\circ}\text{C}) = \alpha \cdot \lambda + \beta \quad (1)$$

Onde λ é o comprimento de onda da luz incidente na fibra medido em pm (picometro), α é a sensibilidade do sensor em graus Celsius por picometro ($^{\circ}\text{C}/\text{pm}$), β é um parâmetro que representa a temperatura em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) na situação puramente teórica em que o comprimento de onda de Bragg seria nulo, e T a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. As equações de temperatura de cada sensor com as constantes α e β já estabelecidas estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações de calibração de temperatura para cada sensor.

Sensor	Equação
1	$T(^{\circ}\text{C}) = 0,087514.\lambda - 134.232,5$
2	$T(^{\circ}\text{C}) = 0,086554.\lambda - 134.197,2$
3	$T(^{\circ}\text{C}) = 0,087994.\lambda - 134.963,5$
4	$T(^{\circ}\text{C}) = 0,087385.\lambda - 135.486,8$

O monitoramento da potência fornecida pelo painel fotovoltaico é medido pelo módulo de monitoramento de máxima potência. Nesse módulo há um sistema de condicionamento de sinais elétricos e um microprocessador da mesma família Arduino, o UNO R3. Que é o responsável de calcular o ponto de máxima potência chaveando um resistor fixo de $0,33\Omega$ utilizando um sinal de PWM (Pulse Width Modulation), variando o seu ciclo de trabalho (duty cycle) de 0 a 100%. O algoritmo utilizado para rastrear o ponto de máxima potência foi algoritmo conhecido como "Perturbe & Observe" [5,6]. O seu fluxograma está apresentado na Figura 7. O algoritmo calcula o valor da potência atual a partir dos valores de corrente e tensão obtidos pelo sistema de monitoramento. Esse valor de potência é comparado ao valor anterior relativo a um ciclo de trabalho menor e verifica se houve um acréscimo nessa medida. Se houver, a busca continua avançando, aumentando-se o ciclo de trabalho até que o valor da potência atual seja menor que a do valor anterior [7].

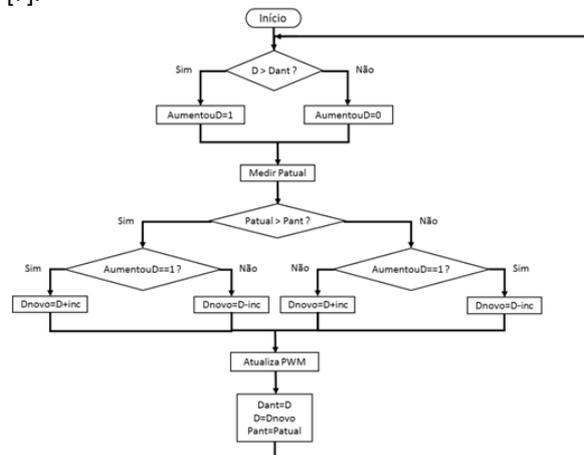


Figura 7. Fluxograma do algoritmo "Perturbe & Observe".

Com intuito de comprovar o funcionamento do módulo de monitoramento de máxima potência, foi realizado um teste de bancada no laboratório num painel fotovoltaico da Kyocera modelo KS-5T [8]. Resistores fixos foram utilizados para gerar uma curva experimental cujos valores serviram de referência. O resultado do teste está apresentado na Figura 8, onde a curva do módulo aproxima-se da curva de referência. Para analisar esse sistema de aumento da eficiência energética de painéis fotovoltaicos, um outro painel do mesmo modelo do de campo, foi instalado de maneira a capturar a energia do sol convencionalmente.

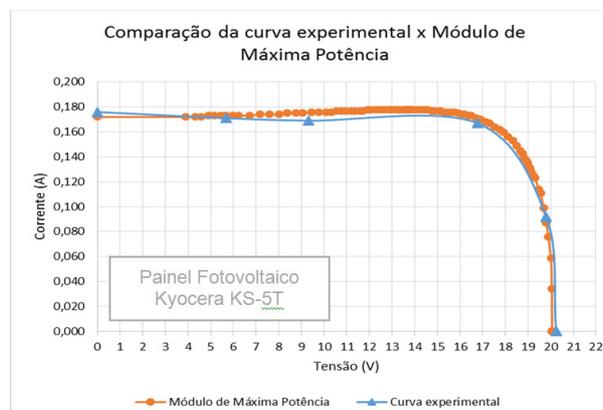


Figura 8. Gráfico do teste do módulo que calcula a máxima potência.

3.0 - RESULTADOS

3.1 Instalação de Campo

A instalação foi realizada no terraço do Centro de Tecnologia da COPPE/UFRJ. Nessa instalação, os dois painéis fotovoltaicos escolhidos (referência e concentrador solar) foram do fabricante Kyocera modelo KC-130T [9]. O primeiro instalado de modo convencional, voltado para o norte e inclinado de acordo com a latitude local. O segundo perpendicular ao solo e na direção Sul conforme apresentado na Figura 9.



Figura 9. Painéis fotovoltaicos de referência e do concentrador solar.

Os sensores de temperatura foram montados conforme a Figura 11. Na mesma estão apresentados a casa de baterias, onde é armazenada a energia gerada pelo painel fotovoltaico, e a Unidade de Monitoramento e Controle (UMC). Na Figura 10 estão apresentadas o módulo de controle de movimentação dos espelhos. Ele foi montado numa caixa plástica com grau de proteção IP67. Dentro desse módulo encontra-se o sistema microprocessado, o drive de potência, o demultiplexador e o módulo de monitoramento de máxima potência. Na Figura 11 está apresentada a instalação dos espelhos no suporte projetado para fixar 4 espelhos de 50x75 cm, foram utilizados três suportes com o intuito de criar um conjunto de três sistemas reflexivos. Na Figura 11 está apresentada respectivamente o sistema montado e o sistema funcionando com os três conjuntos de espelhos refletindo no painel fotovoltaico.



Figura 10. Módulo

de monitoramento da máxima potência.



Figura 11. Sistema instalado, pronto para testes e refletindo os raios solares no painel fotovoltaico.

3.2 Resultados

Na figura 12 está apresentado o software que calcula a posição solar. Os valores da posição dos espelhos são diferentes da posição solar, pois os espelhos têm que refletir os raios do sol para o painel fotovoltaico. Observa-se que o espelho número 2 tem a metade do valor da elevação solar. Isso se deve por ele estar na mesma direção do painel.



Figura 12. Software principal do projeto concentrador solar.

Na Figura 13 é apresentado o gráfico do monitoramento da temperatura no painel fotovoltaico. A temperatura no painel no período de maior insolação desse dia teve pico de 43°C.

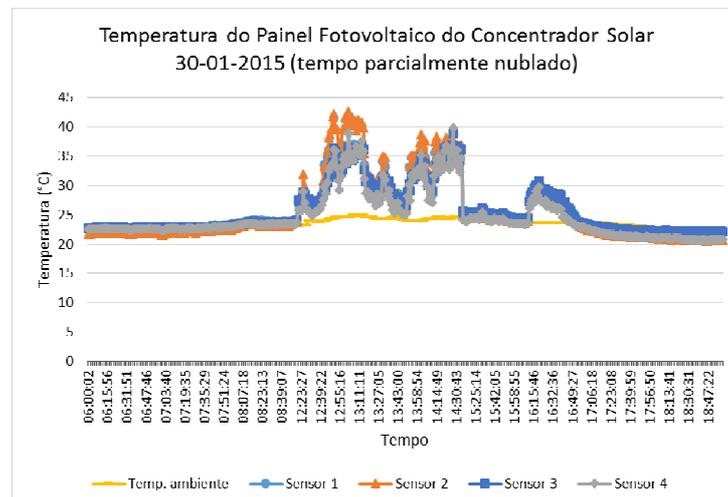


Figura 13. Medidas de temperatura ambiente e do painel fotovoltaico.

Nas Figuras 14 e 15 estão apresentados os gráficos das potências geradas pelo painel fotovoltaico de referência e do concentrador solar. A potência do painel de referência apresentou um comportamento já esperado. Por outro lado, o painel concentrador solar apresentou uma curva mais constante.

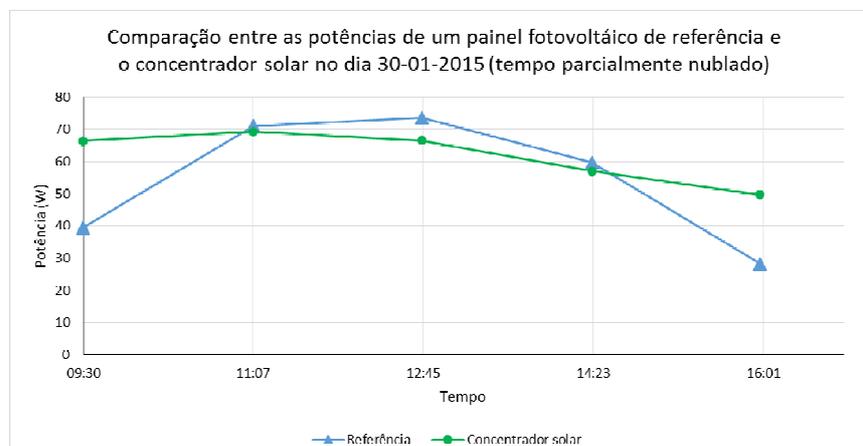


Figura 14. Medidas de potência realizadas no dia 30-01-2015.

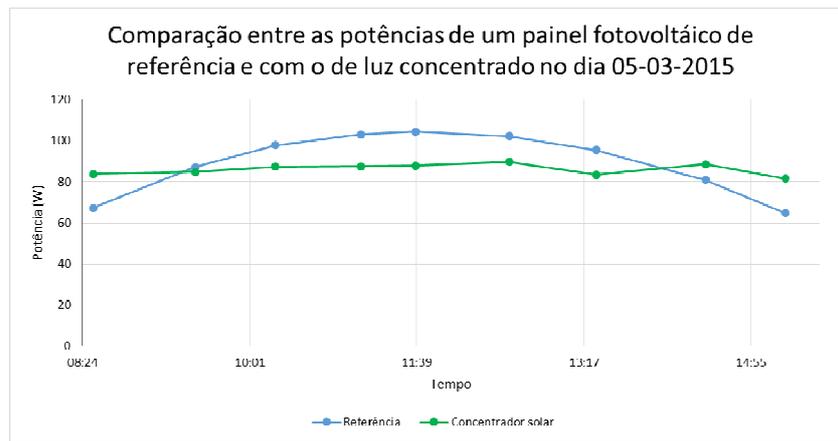


Figura 15. Medidas de potência realizadas no dia 05-03-2015.

4.0 - CONCLUSÃO

O módulo de monitoramento de máxima potência funcionou conforme projetado, auxiliando o cálculo do ponto máximo de potência tanto do painel referência como do painel concentrado. O algoritmo implementado mostrou-se eficaz e rápido mesmo utilizando um sistema microprocessado de baixo custo.

O sistema de controle apresentou uma robustez tanto em laboratório como no campo, onde há inúmeras variáveis influenciando de forma negativa ao seu funcionamento.

O software do cálculo da posição solar (Figura 12) funcionou e interagiu com o sistema de controle, fazendo o sistema operar e rastrear a posição solar, a fim de que a sua irradiação seja refletida e convergida no painel concentrador conforme Figura 11.

Observa-se que na Figura 13 que a temperatura do painel concentrador solar teve um aumento de quase o dobro da temperatura ambiente no horário de maior insolação. Mesmo com a temperatura mais alta o desempenho do painel concentrador foi satisfatório.

Nas Figuras 14 e 15, percebe-se que o desempenho do concentrador solar foi melhor nos horários que os raios solares não incidem diretamente no painel de referência. Entretanto, nos horários de pico solar, o painel de referência obteve um resultado melhor. Esse resultado é devido às áreas de sombra provocadas pelo suporte dos espelhos. A presença dessas sombras é observada na Figura 11. O sistema ainda está em operação e em fase de testes.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Technology Roadmap - Solar photovoltaic energy. International Energy Agency. [S.l.]. 2011.
- (2) KRENZINGER, A. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - Ciclo de Debates 2010, 2010. Disponível em: <<http://www.abes-rs.org.br/cursos/ciclo-debates-2010/palestra-arno-krenzinger.pdf>>. Acesso em: 29 novembro 2011.
- (3) NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY CENTER FOR RENEWABLE ENERGY RESOURCES. Disponível em: <http://rredc.nrel.gov/solar/codesandalgorithms/solpos/aboutsolpos.html>. Acesso em: 12 mar. 2014
- (4) WERNECK, M. M., ALLIL, R. C., RIBEIRO, B. A., "Calibration and Operation of a Fiber Bragg Grating Temperature Sensing System in a Grid-Connected Hydrogenerator", accepted for publication in IET Science, Measurement & Technology, 2013.
- (5) WON, C.-Y. et al. "A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays Using Fuzzy Controller". IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '94, 1, 1994. pp. 396 - 403.
- (6) SERA, D. et al. "Improved MPPT method for rapidly changing environmental conditions". IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Quebec, Canada, 2, 2006. pp. 1420 - 1425.
- (7) ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques". IEEE Transactions on Energy Conversion, 22, n. 2, jun. 2007. pp. 439 - 449.
- (8) KYOCERA. KS-5T datasheet. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/modulos-solares/ks5t.html>>. Acesso em: 29 nov. 2014.
- (9) KYOCERA. KC130TM datasheet. Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.au/pdf/kc130tm.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2014.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



MARCELO MARTINS WERNECK nasceu em Petrópolis, Rio de Janeiro, e graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC) em 1975. Obteve seu M.Sc. pelo Programa de Engenharia Biomédica da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1977. Em 1978 ingressou para o Departamento de Eletrônica e Computação da UFRJ onde é professor Associado desde 1978. Seu PhD foi obtido pela University of Sussex, no Reino Unido em 1985. Atualmente é coordenador do Laboratório de Instrumentação e Fotônica do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE onde desenvolve pesquisas na área de instrumentação e transdutores a fibra óptica. Atualmente é também Professor Titular da COPPE e tem desenvolvido pesquisas nas áreas de Engenharia Elétrica e Fotônica, atuando principalmente nos seguintes temas: Instrumentação eletrônica e sensores a

fibra óptica.

REGINA CÉLIA DA SILVA BARROS ALLIL nasceu no Rio de Janeiro, Brasil. Ela se formou em Engenharia Eletrônica pela Faculdade Nuno Lisboa, Rio de Janeiro, em 1988. Ela é uma pesquisadora do Brazilian Army Technology Center (CTEx), Rio de Janeiro. Sua M.Sc. grau foi obtido a partir do Programa de Engenharia Biomédica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2004. Seu Ph.D. foi obtido no Programa de Engenharia Eletrônica no Laboratório de Instrumentação e Fotônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2010. Seu interesse de pesquisa encontra-se em sensores à fibra óptica e instrumentação optoeletrônica.

CESAR COSENZA DE CARVALHO nasceu no Rio de Janeiro, Brasil. Possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1989), mestrado em Engenharia Biomédica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993) e doutorado em Engenharia Biomédica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2000). É professor adjunto da Universidade Estácio de Sá e pesquisador da Universidade Federal do Rio de Janeiro, principalmente nas áreas de energia e petróleo. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, com ênfase em Instrumentação eletrônica, optoeletrônica, sensores e transdutores, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação e sensores opto-eletrônicos, fibra óptica, biofísica, raios-X, equipamento médico-hospitalar, fluxômetro, e ultra-som doppler.

FÁBIO VIEIRA BATISTA DE NAZARÉ possui graduação em Engenharia Elétrica/Eletrônica pela Universidade Federal de Pernambuco (2007), Recife - PE. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instrumentação Eletrônica. Mestre em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica (PEE), COPPE/UFRJ, na sub-área de Instrumentação e Fotônica (2010), Rio de Janeiro - RJ. Atualmente é estudante de doutorado pelo Programa de Engenharia Elétrica (PEE) - COPPE/UFRJ.

DANIEL MOREIRA DOS SANTOS nasceu no Rio de Janeiro, Brasil. Formado em Engenharia Eletrônica pelo CEFET-RJ em 2010. Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ 2015. Trabalha como pesquisador no Laboratório de Instrumentação e Fotônica COPPE/UFRJ.

FERNANDO LUIZ MACIEL nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, e graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Formado na área de Engenharia Eletrônica, com ênfase em Instrumentação, Controle, Correção e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Atuando principalmente na área de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) no LIF/COPPE/UFRJ. Trabalha como pesquisador no Laboratório de Instrumentação e Fotônica COPPE/UFRJ.

GUSTAVO MARQUES MATTOS nasceu no Rio de Janeiro, Brasil. Graduando em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e eletrônica.