Análise Comparativa Entre um Seguidor Solar de Baixo Custo e Sistema Fotovoltaico Fixo para a Região da Serra Gaúcha

Fabiano Frosi

Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS-Campus Farroupilha – RS

fabiano.frosi@hotmail.com

Resumo-Este artigo aborda um comparativo entre a produção de energia fotovoltaica por módulos fixos e com rastreamento. A energia solar fotovoltaica está passando por uma franca expansão nos últimos anos. Isto se deve, primordialmente, a queda nos custos dos insumos necessários a geração fotovoltaica e a necessidade de busca por meios renováveis de obtenção de energia, para reduzir os impactos das emissões de gases causadores do aquecimento global. Uma das formas de obtenção de energia solar é utilizando um sistema de rastreamento solar onde o sistema garante que o módulo esteja sempre perpendicular aos raios solares, aumentando o nível de absorção de radiação direta incidente sobre o módulo. Estudos indicam que rastreadores solares podem incrementar entre 11% a 50% o nível de energia gerada pelo módulo, dependendo da região a ser instalado. Este trabalho compara a produção da energia gerada por um sistema fixo e um seguidor solar de dois eixos, instalados na cidade de Farroupilha, Rio grande do Sul, Brasil, situada a uma latitude de -29,2 °, Sul.

Palavras Chave—Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Seguidor solar, Rastreamento,

I. INTRODUÇÃO

A crescente industrialização e o crescimento da população mundial nos últimos anos vem fazendo com que a demanda de energia elétrica venha aumentando expressivamente. Este aumento significativo no consumo de energia traz a necessidade de novas fontes de energia para suprir a demanda mundial. Somente no Brasil, entre 2007 a 2016 houve um aumento de 46,25% no consumo de energia elétrica e de 49,81% na capacidade instalada de produção de energia elétrica [1]. Este consumo cada vez mais crescente em escala mundial e a necessidade de produzir alternativas para as fontes oriundas de combustíveis fósseis e nuclear, torna muito importante a busca de energias renováveis e alternativas para suprir a demanda de energia. Dr. Ivan Jorge Gabe

Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS-Campus Farroupilha – RS

ivan.gabe@farroupilha.ifrs.edu.br

Estudos apontam que até 2040, 37% da capacidade energética mundial será provida de energias renováveis, um aumento de 14% frente aos 23% utilizados atualmente [2]. Dentre as fontes de energia renovável que vem em crescente expansão destaca-se a energia solar fotovoltaica, com um crescimento de aproximadamente 49% em 2016, adicionando 76,1 GW no total da potência global instalada, frente a 51,2 GW de potência instalada, adicionados em 2015 [3]. O país que apresentou o maior crescimento de energia solar em 2016 foi a China que oficialmente adicionou 34,2 GW de energia fotovoltaica à sua matriz energética, um aumento de 125% comparado à potência adicionada em 2015. Este crescimento foi seguido de perto por Estados Unidos, com crescimento de 92%, adicionando 14 GW em 2016, frente à 7,3 GW adicionados do ano anterior [3].

No Brasil existe um grande potencial de radiação solar disponível variando de 4,8 a 6,0 kWh/m² para o plano inclinado, potencial superior, por exemplo, a Alemanha, um dos líderes mundiais em produção de energia fotovoltaica, que possui radiação disponível entre 2,46 kWh/m² a 4,52 kWh/m² [4]. Como ocorreu em outros países, na Alemanha foram necessários incentivos governamentais de forma a impulsionar o mercado de micro e mini geração fotovoltaica, com isenção de impostos e descontos tarifários aplicados à conta de distribuição de energia elétrica, além de outros incentivos à produção de energia que fizeram com que o país se tornasse uma potência no setor. No Brasil, o principal incentivo ocorreu com a entrada em vigor da resolução normativa 482/2012 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que estabelece as condições gerais para o acesso da micro e mini geração distribuída, permitindo ao consumidor gerar a própria energia elétrica e fornecer a geração excedente à rede de distribuição.

Entre os anos de 2014 e 2015 o Brasil teve um crescimento de 28,5% da potência de energia solar instalada [1], com um grande perspectiva de crescimento para os próximos anos. Estima-se que até 2024 o Brasil contará com uma potência instalada de 7 GW, sem contar a geração distribuída [5]. Segundo o planejamento para a próxima década, a potência instalada de eletricidade a partir do sol representará quase 4% da potência total brasileira de 2024. Atualmente, a fonte é responsável por 0,05% da potência elétrica do país, com um total de 80,9 MW entre potência instalada e micro e mini geração distribuída [6], sendo um valor ínfimo se comparado aos 227 GW de potência total instalada no mundo em 2016 [7].

Com o amplo crescimento mundial da energia fotovoltaica é interessante buscar formas de maximizar a produção de energia dos módulos fotovoltaicos a fim de se obter a maior produção de energia possível de cada sistema. Uma das formas de maximizar esta produção de energia é através da utilização de um sistema com seguidor solar que busca garantir a máxima absorção de radiação solar sobre o módulo fotovoltaico ao longo de um dia fazendo com que haja aumento na eficiência do sistema.

Pelo grande uso de sistemas fotovoltaicos com rastreamento da posição solar, justifica-se um estudo para verificar o acréscimo de produção energética de um sistema com seguidor em relação a um fixo [8]. De acordo com esta possibilidade, este trabalho faz uma análise e comparação da produção de energia entre um sistema fixo e um sistema com seguidor solar de dois eixos, ambos instalados na cidade de Farroupilha, RS, que fica a uma latitude de 29,2° ao Sul, verificando o incremento real de produção fornecida pelo sistema com seguidor, além de uma análise financeira do sistema podendo ser avaliada a viabilidade de instalação.

A. Revisão Bibliográfica ou Embasamento Teórico

Diversos trabalhos que seguem esta linha foram realizados para outras regiões e latitudes diferentes, cada um com resultados particulares e específicos para sua região e sistema comparado. Neste contexto, Silva [9] realizou um estudo comparativo entre um sistema fixo e um sistema munido de seguimento solar de dois eixos na cidade de Braga, Portugal, que fica a uma latitude de 41° norte. Neste estudo, Silva analisou a energia produzida nos meses de agosto, setembro e outubro e chegou à conclusão que na média destes três meses o sistema móvel conseguiu produzir cerca de 50% a mais de energia em relação ao sistema fixo. Nestes meses especificamente, o incremento chegou a 57% a mais de energia para o sistema móvel frente ao fixo.

Uma outra análise de produção de energia entre um sistema fixo e um seguidor com dois eixos de movimentação é feita por Trevelin [10]. Neste estudo o autor compara a produção de energia para sistemas de seguidor de dois eixos em períodos de 10 horas, onde ocorre o seguimento tanto para a posição azimutal como para a posição de zênite, instalados na cidade de São Carlos, no estado de São Paulo, Brasil. A cidade se encontra a uma latitude de 22° Sul. Segundo Trevelin, a potência gerada do rastreador de dois eixos é 39% maior que a do sistema fixo [10]. O autor conclui que na análise comparativa observa-se que a aplicação de rastreadores solares em sistemas de geração fotovoltaica é sempre vantajosa de um ponto de vista energético [10], porém é necessário uma análise financeira a fim de analisar agentes como o custo de instalação e manutenção, onde o consumo adicional do rastreador pode ser minimizado de forma a se anular dentro do rendimento proporcionado pelo rastreador.

Por fim, Vieira [11] traz um estudo de um seguidor de um eixo (azimutal) para a cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, Brasil, situada a uma latitude de 5° , Sul. Como

a cidade está posicionada próximo à linha do Equador, a irradiação solar incidente não sofre grandes alterações e a posição de elevação do sol permanece praticamente constante durante o ano, justificando o emprego de um seguidor solar de apenas um eixo. O ganho médio na geração de energia do módulo móvel foi de 11% em relação ao módulo estático, sem considerar a energia consumida pelo próprio sistema de rastreio [11]. O baixo aumento na eficiência do módulo móvel se deve à proximidade da região à linha do equador, pois não há grandes variações na posição do sol ao longo do dia ou do ano. Cidades com uma latitude maior, como no caso dos estudos de Travelin e Silva apresentam desempenho maior do seguidor solar, uma vez que a variação na posição solar ocorre em maior escala.

Em uma análise para a cidade de Santa Maria, a uma latitude de 29,7°, muito próxima da cidade de Farroupilha, o software dedicado SAM (System Advisor Module) indica que o incremento de energia produzida pelo sistema com seguidor de dois eixos pode chegar a 30% em comparação a um sistema fixo, desprovido de sistema de rastreamento.

II. ESTUDO DE CASO

Para comparar a produção de energia entre diferentes sistemas fotovoltaicos é preciso compreender o posicionamento solar e como este interfere na produção de energia. A eficiência da produção de energia está diretamente ligada à radiação solar que incide sobre módulos instalados, o que varia em cada região onde o módulo fotovoltaico está instalado. Como a radiação solar não atinge o globo terrestre de forma homogênea devido a geometria terrestre e a inclinação da Terra, entre outros fatores, esta radiação não é a mesma para todas as regiões, sofrendo alterações dependendo do local de instalação do sistema.

A radiação que incide sobre os módulos de um sistema fotovoltaico é chamada de radiação global que é composta pela radiação direta Gd, àquela que incide diretamente sobre o sistema, a radiação difusa Gdd que é a radiação solar recebida pelo sistema após sofrer dispersão na atmosfera e o albedo Gr, ou seja, a radiação que é refletida pelo ambiente, sendo que cada superfície possui albedo diferente.

Buscando um melhor aproveitamento da radiação em sistemas fotovoltaicos é preciso determinar a posição do sol ao longo dos dias e durante o ano. De acordo com a movimentação solar, a posição do sol em relação a Terra em qualquer hora do dia pode ser descrito de acordo com a variação do ângulo azimutal ϕ , e em termos do ângulo de altitude ε [12]. A variação do ângulo da altura solar apresenta uma oscilação nos seus extremos ao longo de um ano, com uma diferença angular entre a posição mais baixa, durante o inverno, e a posição mais alta, durante o verão [10]. Este ângulo de altitude solar (ε) é determinado pela latitude local (L) e o ângulo de declinação solar (δ), conforme equação 1:

$$\varepsilon = 90^{\circ} - L + \delta \tag{1}$$

Logo, é possível determinar a inclinação do módulo de acordo com o posicionamento solar subtraindo o ângulo ε de 90°. A figura 1 demonstra o ângulo ε e a inclinação do módulo.



Figura 1:Ângulo e inclinação do módulo[13]

Também é necessário analisar o ângulo de azimute (φ s) (figura 2) que é definido como o ângulo entre a projeção horizontal dos raios solares e a direção Norte-Sul no plano horizontal. Por convenção o ângulo de azimute é positivo antes do meio dia, e negativo depois do meio dia solar [11].



Figura 2: Ângulo azimute[13]

Via de regra, sistemas compostos com módulos fixos devem ser posicionados a uma inclinação com ângulo igual à latitude local e voltado para a linha do equador. Porém, sistemas compostos com um sistema seguidor de dois eixos, como o utilizado neste trabalho, possuem movimentação azimutal, responsável pelo rastreamento da posição solar no sentido Leste-Oeste, e movimentação de inclinação que é responsável pelo rastreamento da posição solar no sentido Norte-Sul. Neste tipo de seguidor solar, o ângulo de incidência direta é representado por θ_s .

Por se tratar de um seguidor de dois eixos, a movimentação dos eixos vertical e horizontal fazem com que o ângulo θ_s seja 0°, caso o rastreamento seja perfeito, uma vez que o sistema busca sempre se posicionar perpendicularmente aos raios solares. A inclinação ε do módulo fotovoltaico é determinado por:

$$\varepsilon = 90 - \delta \tag{2}$$

Onde ε é o ângulo de declinação solar. Por fim, a correção do azimute é definida pela equação 3:

$$\gamma_s = \gamma \tag{3}$$

A figura 3 mostra como estão dispostos os ângulos da posição solar do sistema com seguidor de dois eixos.



III. ENERGIA FOTOVOLTAICA

Entender o comportamento das células fotovoltaicas durante a produção de energia é fundamental para o entendimento de produção em sistemas fotovoltaicos. Na geração fotovoltaica de energia elétrica, a célula fotovoltaica é o elemento básico, onde ocorre a interação entre a irradiação luminosa do Sol com a matéria e é gerada a corrente elétrica [13]. O comportamento das células pode ser representado por modelos de circuitos elétricos, sendo de grande utilidade para poder fazer uma análise aproximada do comportamento elétrico da mesma. Esta representação pode ser realizada através de diversos modelos, sendo os mais utilizados os modelos com um ou dois diodos. Entretanto muitos pesquisadores têm utilizado variações destes circuitos equivalentes alterando alguns de seus parâmetros de forma a tornar o modelo mais adequado para determinadas pesquisas ou aplicações[14]. Neste trabalho, o modelo adotado é o modelo com um diodo e está representado na figura 4:



Figura 4: Modelo de célula com um diodo[14]

A partir do modelo da figura 3 é possível obter a equação do nó superior onde é relacionada a corrente do diodo I_{Di} , que representa os fenômenos de difusão e de recombinação, a corrente elétrica fotogeradora I_{fg} e a fuga de corrente I_P , representada pelo resistor R_P , resultando na equação 4:

$$I = I_{fg} - I_{Di} - I_P \tag{4}$$

Onde as correntes I_{fg} , I_{Di} e I_P podem ser descritas pelas equações 5,6 e 7 respectivamente:

$$I_{fg,cell} = I_{sc} \frac{G_a}{G_{as}} \tag{5}$$

$$I_{Di} = I_0 \left[e^{\frac{q(V_{fg} + R_P I_{fg})}{mkT}} - 1 \right]$$
(6)

$$I_P = \frac{V_{fg} + I_{fg}R_P}{R_{Ph}} \tag{7}$$

Onde:

 $I_{sc} \notin a \text{ corrente de curto-circuito(A)};$ $I_0 \notin a \text{ corrente de saturação da célula (A)};$ $I_{fg} \notin a \text{ corrente de saída da célula (A)};$ $I_{Di} \notin a \text{ corrente do diodo (A)};$ $G_a \notin a \text{ radiação solar incidente (W/m^2)};$ $G_{as} \notin a \text{ radiação solar de referência (W/m^2)};$ $V_{fg} \notin a \text{ tensão de saída da célula (V)};$ $R_P \notin a \text{ resistência em paralelo da célula (\Omega)};$ $m \notin a \text{ constante de idealidade do diodo};$ $k \notin a \text{ constante de Boltzmann (1,381 x 10^{-23} J/K)};$ $T \notin a \text{ temperatura da célula (K)};$ $q \notin a \text{ carga de um elétron (1,60217646 x 10^{-19}) C.$

Substituindo as equações 5,6 e 7 na equação 4, obtêm-se a equação 8 que relaciona a corrente elétrica gerada a partir da luz incidente na junção da célula fotovoltaica em função da tensão e temperatura:

$$I = I_{sc} \frac{G_a}{G_{as}} - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{fg} + R_P I_{fg})}{mkT}} - 1 \right] - \frac{V_{fg} + I_{fg} R_P}{R_{Ph}}$$
(8)

No caso dos módulos fotovoltaicos, considerando pequenas alterações, tanto o circuito equivalente quanto às equações descritas acima são válidas, uma vez que os módulos correspondem a associações de células. Tais associações, na grande maioria dos módulos usados em aplicações fotovoltaicas, são feitas de maneira a ligar os terminais das células em série, o que faz da tensão do módulo ser um somatório das tensões de cada célula[14].

Analisando a equação 8 é possível fazer uma relação entre temperatura (T) e radiação (G_a), com a corrente e tensão geradas pelas células fotovoltaicas, permitindo traçar uma curva que relaciona a tensão e corrente gerada pelo módulo, denominada curva I-V. Esta curva é característica de módulos e células fotovoltaicas e representa o comportamento matemático da corrente elétrica em função da tensão. Com a obtenção da curva I-V é possível adquirir importantes informações referentes ao desempenho elétrico dos módulos fotovoltaicos como corrente de curto circuito (I_{SC}), que é a corrente da célula ou módulo fotovoltaico quando os seus terminais estão conectados, possuindo uma resistência nula e, resultando em uma tensão também nula (V=0), fazendo com que a corrente de curto circuito seja igual a corrente fotogeradora ($I_{SC} = I_{fg}$). Também é possível determinar a tensão de circuito aberto V_{OC} , quando a

célula se encontra desconectada da carga, com uma resistência elétrica infinita, resultando em uma corrente nula e, o ponto de máxima potência P_M , dado pelo produto da tensão máxima V_M pela corrente máxima I_M . A figura 5 mostra uma curva característica de uma célula fotovoltaica de um módulo de silício multicristalino.



fotovoltaica (adaptado de [15])

Através da análise da curva I-V e da equação da corrente da célula, observa-se que a temperatura é um fator que influencia na curva característica do módulo fotovoltaico e, como consequência, influenciando na corrente elétrica e na energia gerada pelo módulo. De acordo com a equação 6, em uma análise direta e simplória, conforme aumenta a temperatura a uma radiação constante ocorre um aumento na corrente de curto circuito. Esta análise, porém, depende de outros fatores envolvidos como o material de fabricação desta célula fotovoltaica, devido a diferença de energia do gap dos materiais a uma dada temperatura. Para módulos de silício, que é o tipo de módulo escolhido para este trabalho, este aumento da temperatura ocasiona um aumento na I_{SC} seguindo um coeficiente α de 0,06%/°C⁻¹. Por outro lado, a tensão decai linearmente segundo um coeficiente β . O efeito da temperatura em uma célula com radiação constante pode ser observado na figura 6. Esta variação de tensão e corrente influenciam diretamente na potência gerada pelo módulo.



Figura 6: Efeito da temperatura na célula fotovoltaica [8]

Além da análise da influência da temperatura na corrente, tensão e potência dos módulos, a equação 8 permite avaliar a influência da irradiância na produção de energia pelo módulo. A corrente gerada pela célula fotovoltaica, para uma temperatura constante, varia de forma proporcionalmente linear de acordo com a intensidade da irradiância que incide sobre o módulo ao passo que a tensão de circuito aberto Voc aumenta de forma logarítmica. De acordo com a equação 5, que é componente da equação 8, quanto maior a irradiância, maior será a corrente de saída da célula. A figura 7 apresenta curvas I-V geradas de matematicamente para um módulo 36 células correspondentes a 25 °C de temperatura e diferentes valores de irradiância [14].



Figura 7: Curva I x V de um módulo fotovoltaico para diferentes irradiâncias [13]

IV. ESTUDO DE CASO

Formas de maximizar a produção energética dos módulos fotovoltaicos são desafios que buscam ser alcançados. Módulos fotovoltaicos de silício são os mais utilizados em escala mundial e raramente ultrapassam índices de eficiência energética acima de 16% a 18% [16], tendo considerável perda energética. Se considerar que o recorde de eficiência para uma célula é de 27% e que o limite teórico é em torno de 29%, valores de eficiência entre 16% a 18% não aparentam valores formidáveis[16]. Por diversas razões, estes valores ainda são distantes para módulos, visto que estes recordes de eficiência são obtidos em células experimentais em testes de laboratório.

Diante deste fator, tendo em conta que a eficiência energética está diretamente ligada à propriedades físicas dos módulos, busca-se outras formas para aumentar a produção de energia. Uma das formas para o aumento da energia produzida é ampliar a absorção de radiação dos módulos através de sistemas de rastreamento da posição solar. Diversos estudos mostram que sistemas com rastreamento solar podem incrementar de 20% a 50% na produção de energia se comparados a sistemas fixos [17]. Este incremento de energia, no entanto não segue um padrão linear e depende de diversos fatores, como o sistema de rastreamento implementado, a irradiância disponível, horas de sol e clima da região a ser estudada. Quesada et al.[17] faz uma análise da equação que define a vantagem de sistemas de rastreamento solar de dois eixos comparado à sistemas fixos, escrita originalmente por Kelly [18] em termos da potência. Quesada et al. faz a análise desta equação em termos da irradiância e energia produzida durante um período de tempo, resultando na equação 9:

$$TA(\%) = \frac{G_{DTS} - G_H}{G_H} * 100 = \frac{1 - \frac{G_H}{G_{DTS}}}{\frac{G_H}{G_{DTS}}} * 100$$
(9)

Onde, TA é a vantagem do seguidor, em termos percentuais, G_H é a irradiância na posição horizontal e G_{DTS} é a irradiância sobre a superfície do seguidor.

Considerando a análise de temperatura e irradiância, a equação que rege a corrente da célula (equação 8) e a equação 9, da vantagem do seguidor solar em relação a um sistema fixo, trazem um embasamento teórico para a realização deste trabalho, uma vez que o objetivo do sistema de rastreamento solar é otimizar ao máximo a absorção da radiação incidente pelo módulo fotovoltaico. Portanto, a comparação entre um sistema fixo e um sistema móvel pode atestar de quanto é o incremento de energia produzida pelo sistema, além de certificar a viabilidade do projeto em relação ao custo envolvido na construção de ambos os sistemas.

Para realizar o estudo da produção de energia entre as instalações, informações reais de produção das duas instalações fotovoltaicas são coletados a partir de uma sistema de aquisição de dados. Corrente, tensão, temperatura e irradiância de ambos os sistemas são recolhidos e disponibilizados em um banco de dados para análise. Estas informações permitem avaliar a produção de energia de cada um dos módulos e realizar um estudo entre eles, bem como, avalia-los através de comparação de energia produzida.

Tanto sistema fixo quanto o seguidor solar contam com módulos Kyocera, modelo KD250GH-4FB2, de 250 W de potência. Este módulo, para uma condição padrão de irradiância de 1000 W/m² e temperatura de 25 °C, conta com V_{OC} de 36,9 V, I_{CC} de 9,09 A, tensão em máxima potência(V_{pm}) de 29,8 V e corrente em máxima potência (I_{pm}) de 8,39 A. Ambos os módulos estão conectados a um inversor de frequência cada, com capacidade de 600 W de potência que faz a conversão da energia gerada pelos módulos e alimenta a rede externa.

A. Sistema fixo

O sistema fixo está construído no Campus Farroupilha do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) e conta com dois módulos dispostos em um ângulo de 29°, referentes à latitude local, instalados próximos ao chão. Apesar da estrutura contar com dois módulos optou-se por analisar a produção de energia de apenas um módulo, ligando apenas um módulo ao inversor até a conclusão do estudo. Esta alternativa foi escolhida devido ao fato de o inversor escolhido possuir limitação de corrente e tensão, ficando abaixo de valores que permitiriam conectar os módulo em série ou paralelo. Este fator também permite uma melhor análise de comparação entre os sistemas, uma vez que ambos passam a contar com o mesmo número de módulos instalados.

A figura 8 mostra o sistema fixo instalado, bem como o módulo de referência instalado na parte de cima do sistema.



B. Rastreador Solar

O sistema do seguidor solar também instalado junto ao campus Farroupilha do IFRS é constituído de apenas um módulo, porém a lógica de funcionamento e as características de construção permitem que sejam construídos outros seguidores semelhantes conectando mais de um módulo cada seguidor. A movimentação do módulo é realizada por duas barras roscadas zincadas de 14 mm que, acopladas a motores CC, movimentam o módulo para a direção necessária. A figura 9 apresenta uma imagem do seguidor no campus e o módulo de referência instalado.



Figura 9: Seguidor Solar instalado no campus do IFRS

A movimentação do módulo é feita por motores 12V de corrente contínua, acionados por um controlador Arduino Uno, através de um módulo ponte-H L298. Os motores escolhidos possuem torque de 8,5 Kgf.cm, velocidade de 13RPM, 3,7W de potência e o acionamento através da ponte H permite a inversão do sentido de giro, dependendo da direção necessária para

movimentação do módulo. O esquema elétrico simplificado do sistema com seguidor é detalhado na figura 10, mostrando as conexões entre os componentes elétricos utilizados no sistema.



Figura 10: Esquema elétrico simplificado do sistema

Sensores fim de curso conectados às entradas digitais do controlador limitam o movimento do módulo. Quando o sistema chega a determinados pontos, como o ponto de inclinação máximo ou mínimo, o Arduino Uno então determina o desligamento do motor de modo que a estrutura pare de se movimentar. Na hipótese de alguma falha ocorrer no mecanismo de fim de curso existe um sistema de redundância instalado por segurança, que atua interrompendo a alimentação dos motores, garantindo a parada destes.

O sistema de sensoriamento da posição solar é constituído por um artefato com quatro fotoresisores LDR (Light *Dependent Resistors*) de 5mm separados por um anteparo opaco responsável por gerar a sombra decorrente do movimento do sol. Os LDRs detectam a variação de luminosidade à medida que algum sensor for sombreado devido a movimentação natural do sol. O micro controlador, então, identifica essa diferença e aciona comandos de atuação para corrigir a posição do módulo de modo que os quatro LDRs recebam a mesma incidência de luz. A figura 11 expõe a configuração usada nesse trabalho, a qual é fixada no centro do módulo fotovoltaico:



Fig.11– Sensores LDRs separados por anteparo Fonte: http://www.instructables.com/id/Arduino-Solar-Tracker/

V. SISTEMA DE COLETA E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

O sistema completo, composto pelos módulos fixos e o módulo com seguidor estão conectados à rede elétrica, possibilitando a análise de produção de ambos os sistemas.

Para a conexão dos sistemas junto à rede elétrica foram utilizados dois inversores de frequência de 600 W cada, conectados em paralelo à rede elétrica, que fazem a transformação da corrente contínua gerada pelos módulos para corrente alternada e interliga com a rede do IFRS. Cada inversor tem corrente DC máxima de entrada de 30 A e eficiência de 88%. A figura 12 apresenta um desenho com o esquema simplificado do sistema como um todo.



Fig. 12: Esquema Simplificado do sistema

Para a análise da geração de energia entre os sistemas foi necessário a coleta de dados que possibilitem o estudo, permitindo realizar uma comparação entre os dados coletados verificando assim a consistência destas informações. Neste contexto, foram realizadas medições de irradiância, coletadas à partir das células de referência instaladas em cada sistema, tensão e corrente de saída dos sistemas fixos e móvel. Além destes dados, também foram coletadas as informações de temperatura em ambos os sistemas e nas células de referência, a fim de analisar a correta medição da energia produzida.

A coleta de dados é realizada através de um sistema que utiliza um micro controlador Arduino Mega, que faz a medição e leitura dos sensores e sistemas desenvolvidos para a coleta dos dados. Para a medição da tensão do sistema fixo e móvel, bem como dos módulos de referência, utilizou-se um divisor de tensão resistivo que envia o sinal devidamente condicionado para que a máxima tensão não ultrapasse o limite de tensão da entrada do Arduino, que é de 5 V. O sinal, então, é medido através de uma porta analógica do Arduino que possui resolução de 10 bits.

A medição da corrente dos dois sistemas é obtida por meio de um sensor de corrente ACS-712, com limite de 20 A e resolução de 66 mV/A na saída do sensor. Como a corrente a ser medida fica em torno de 8,39 A (que é a corrente de máxima potência), o sinal precisa ser condicionado a fim de obter a melhor resolução possível para a entrada na porta analógica do Arduino, melhorando a exatidão do sinal mensurado. Para o condicionamento do sinal implementou-se o circuito contido na figura 13:



Fig. 13: Condicionamento de sinal do sensor de corrente

O sinal obtido pelo ACS-712 apresenta uma tensão de 2,5 V quando a corrente medida é de 0 A. Para aumentar a resolução e fazer com que a máxima tensão a ser medida coincida com a máxima tensão de entrada do conversor A/D, um amplificador operacional em uma configuração subtratora é responsável por garantir uma saída de 0 V quando a corrente for de 0 A. Após este processo, um amplificador não inversor faz a amplificação do sinal garantindo que, quando o painel apresentar corrente de aproximadamente 10 A (I_{CC} +10%) o sinal na entrada do conversor A/D seja de 5 V. Utiliza-se um fator de segurança de 10% acima da corrente I_{CC} devido ao fato que esta corrente é definida para uma irradiância padrão de 1000 Wm² e pode ocorrer dias em que a irradiância esteja acima deste valor, garantindo uma medição mais precisa da corrente gerada.

A temperatura dos módulos e células de referências é obtida através de um sensor digital de temperatura DS18B20 que possui uma resolução de até 12 bits a incrementos de temperatura de 0,0625 °C, com precisão de 0,5 °C e range de - 55 °C a 125 °C.

O Arduino Mega se comunica através de um módulo Wi-Fi ESP8266 com um banco de dados on-line, alocado em um servidor junto ao campus do IFRS, onde os dados são armazenados. Estas informações contidas no banco de dados permitem acesso remoto pela internet possibilitando a análise dos dados em tempo real, além de manter um histórico atualizado dos dados permitindo análises futuras. Uma imagem com a descrição completa do sistema de controle e aquisição de dados pode ser vista na figura 14.



Fig. 14: Sistema de Controle e Aquisição de dados

VI. ANÁLISE DE DADOS

A partir dos dados coletados, uma análise de desempenho de cada sistema, além de uma análise comparativa entre ambos é apresentada. Os dados de tensão, corrente, irradiância e temperatura foram coletados entre os dias 19 de setembro de 2017 e 02 de novembro de 2017, totalizando um período de 45 dias. Em um primeiro momento, houveram problemas de obtenção das informações de temperatura, que foram totalmente resolvidos na primeira semana de outubro com a substituição dos sensores que estavam avariados. Apesar da discrepância nos valores da temperatura na primeira semana de funcionamento, os demais dados foram coletados normalmente, permitindo análises de irradiância, energia e potência dos sistemas.

Outro problema encontrado foi um sombreamento em um pequeno intervalo de tempo pela manhã nos módulos instalados devido a uma torre instalada nas proximidades. Observou-se, porém, que a interferência de sombreamento sobre os módulos não afeta significativamente a análise dos dados, uma vez que o sombreamento ocorre em ambos os módulos. Também percebeu-se que a medida que o sol aumenta o seu ângulo de elevação com a proximidade do verão, menor é a interferência do sombreamento.

Para a validação dos dados obtidos, verificou-se a correta obtenção dos valores de medição. Os valores de corrente medidos se encontram abaixo da corrente de curto circuito dos módulos e muito próximas da corrente de máxima potência dos módulos, que, segundo o fabricante, é de 8,39 A, para uma irradiância de 1000W/m² a uma temperatura de 25°C. Tomando como exemplo o dia 01 de novembro, observa-se que, para valores de irradiância acima de 1000 W/m2 e temperatura próxima de 48°C, a corrente do módulo fixo oscilou próxima a 8A, valor dentro do previsto devido ao aumento da temperatura, como é informado pelo fabricante. Já para a tensão medida nos módulos os valores alcançaram 30V, ficando abaixo da tensão Voc de 36 V e próximas da tensão de máxima potência, de 29,8 V, para as mesmas condições de temperatura e irradiância da corrente.

Examinando a irradiação absorvida, observou-se que o seguidor solar apresenta comportamento distinto em dias com diferentes condições climáticas, sendo que o melhor aproveitamento do sistema ocorre em dias com máxima radiação e sem incidência de nuvens. A figura 15 mostra o gráfico com o comportamento da absorção para o seguidor solar e o sistema fixo para o dia 01 de novembro, que foi um dia de tempo bom e sem nuvens.





Neste gráfico, é possível observar o correto funcionamento do seguidor pela absorção de radiação através da irradiância medida, onde nota-se que o seguidor possui maior abrangência horária na absorção da irradiação durante o dia. A linha traçada pelo módulo com rastreador ocupa uma área de maior abrangência no gráfico que a linha traçada pelo módulo fixo, confirmando o melhor aproveitamento da absorção de radiação solar pelo módulo móvel. Neste gráfico também é possível

verificar a influência do sombreamento causado pela torre próxima aos sistemas por um período em torno de 30 minutos, próximo das 10 horas.

A maior diferença de irradiação incidente sobre os dois sistemas ocorre no início e ao final do dia, quando o seguidor consegue compensar a perda de absorção que ocorre no módulo fixo devido a mudanca no ângulo de posicionamento solar e a compensação por parte do seguidor. Na metade do dia, quando seguidor e módulos fixos se encontram em ângulos próximos, os valores de irradiância estão bastante próximos entre os sistemas. Também neste período ocorreu a maior incidência de radiação sobre os módulos chegando a 1081 Wm² para o módulo móvel e 1073Wm² para o módulo fixo próximo ao meio dia.

Considerando que os meses de setembro e outubro foi de bastante instabilidade meteorológica, com períodos de muitas nuvens e chuva, intercalando com alguns dias de sol, foi possível analisar o desempenho dos sistemas instalados em diferentes condições climáticas. O próprio dia 01 de novembro se comportou como um dia excelente para a geração de energia, pois apresentou céu limpo durante todo o dia. O comportamento da potência entregue pelos sistemas apresenta um comportamento regular, descontando as pequenas oscilações causadas pelo problemas de sombreamento, como pode ser visualizado no gráfico da figura 16.





O máximo da potência entregue pelo sistema alcança o seu maior valor na metade do dia quando a irradiância chegou perto dos 1100W/m² e pico de potência de 216 W para o módulo com rastreador e 202 W para o módulo fixo. Com este gráfico, assim como na análise da irradiância incidente sobre o módulo, é visível que o sistema com rastreador possui maior diferença na potência em relação ao fixo nas primeiras e nas últimas horas do dia. Na metade do dia os valores ficam próximos entre os sistemas.

Analisando a energia gerada pelos sistemas e descontando o período em que há interferência do sombreamento da torre pela manhã, para que não haja discrepância nos dados, o sistema com seguidor solar apresentou um ganho de 50,5% em relação ao sistema fixo. O módulo fixo gerou 2239,2 Wh de energia frente a 1487 Wh de energia do sistema móvel.

Da mesma forma, examinando um dia com alternância entre sol e nuvens, como o dia 07 de outubro, ocorreu uma diminuição considerada, não só na potência entregue pelos sistemas, como também na diferença de produção entre ambos. Conforme o gráfico da figura 17, durante o dia ocorrem picos de potência que chegaram alcançar marcas acima dos 1000 W/m²,

principalmente na primeira metade do dia. Porém, devido à presença de nuvens, com aumento de nebulosidade a tarde, o período de incidência de irradiância alterna picos e vales, fazendo com que os módulos tenham uma produção instável. O maior prejuízo ocasionado pela nebulosidade é ocasionado sobre o módulo com seguidor solar, que teve geração de energia significativamente menor se comparado a um dia de céu claro.



Fig. 17: Potência Produzida para o Dia 07 de Outubro

Apesar do dia apresentar considerável presença de nuvens o seguidor solar cumpre bem o seu papel, havendo leve aumento na produção em relação ao sistema fixo. O módulo munido de sistema de rastreamento obteve potência média de 130,4 W e produziu 1467 Wh de energia, enquanto o módulo fixo produziu 1181 Wh com potência média de 104,6 W. O acréscimo de energia proveniente do sistema móvel em relação ao fixo alcançou 24,18 %.

O fato do maior prejuízo em dias nublados acontecer sobre o módulo com rastreador solar pode ser justificado pelo atraso do seguidor ao corrigir a posição em relação ao sol, devido à presença de nuvens. Também é preciso considerar o fato de haver nebulosidade nas primeiras horas da manhã, período em que há um maior acréscimo de produção por parte do seguidor. Logo, como a maior parte do tempo não ocorre radiação direta e a radiação difusa incide sobre ambos os módulos, a curva de absorção passa a ser muito parecida sobre ambos.

Por fim, em um dia totalmente nublado, com chuva e sem períodos de sol, a produção de energia por parte dos módulos foi praticamente nula, conforme esperado e pode ser observado no gráfico da figura 18, referente ao dia 6 de outubro.



Embora em determinado momento do dia os módulos tenham entregue uma potência que beira os 70 W, devido à radiação difusa incidente sobre eles, não houve produção de energia entregue à rede durante o dia. A tensão alcançada pelos módulos não chegou ao valor mínimo necessário de 22 V para que o inversor de frequência entrasse em operação, não havendo assim produção de energia significativa.

Nesta linha de análise é também possível traçar um perfil de consumo do seguidor solar para movimentação da estrutura para posterior verificação de tempo de retorno e viabilidade do mecanismo instalado. Por possuir motores de baixa potência e contar com caixas de redução em cada motor de posicionamento, o seguidor possui um baixo consumo de energia. Em testes realizados com o sistema móvel foi possível verificar que a energia consumida pelo motor durante todo o ciclo de posicionamento é de 0,8 Wh.

Por outro lado a energia consumida pelo sistema de controle e rastreamento em um dia é de 10,808 Wh. Com uma estimativa 10% de aumento de consumo com periféricos e tensões de pico dos motores, é calculado um consumo diário de 11Wh por dia. Analisando a energia gerada pelo sistema móvel e a comparando com a energia consumida, levando em conta uma projeção de perdas do sistema, observa-se que, durante o período de análises, o sistema consome aproximadamente 0,55% da energia gerada pelo módulo com seguidor solar em um dia com boa incidência de irradiância e geração de energia, como o dia 31 de outubro, que obteve uma produção de 2018 Wh.

VII. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através das informações levantadas e da verificação da consistência dos dados armazenados será feita uma análise dos resultados obtidos durante o período estudado. A tabela I apresenta um comparativo entre a produção de energia durante o período de 19 de setembro a 02 de novembro. O período foi intercalado com bastante variação climática, com dias de chuva e sol, além de dias bastante nublados.

No dia 15 de outubro houve uma falha no sistema de rastreamento solar que fez com que o seguidor não retornasse à sua posição de início. Desse modo, o seguidor permaneceu totalmente voltado à oeste durante boa parte do dia, até que o problema fosse corrigido. Assim, os dados deste dia foram descartados para análise para que não gerasse qualquer interferência.

Dia	Energia Móvel (Wh)	Energia Fixo (Wh)	Radiação Média diária (kWh/m²)	Clima
19/set	1404	1195,4	6,52	Nuvens
20/set	1639,4	1177,8	6,65	Sol
21/set	1805	1242,3	6,96	Sol
22/set	1557,9	1141,3	5,88	Sol
23/set	315	333,5	1,43	Chuva
24/set	1600,6	1165,1	5,85	Nuvens
25/set	1751,4	1276,7	6,7	Sol
26/set	1694	1231,9	6,5	Sol
27/set	737,5	754,5	3,52	Chuva
28/set	371	430	1,82	Neblina
29/set	308	308	1,48	Neblina
30/set	438	497	2,19	Chuva
01/out	1220,7	1045,7	5,4	Nuvens
02/out	259	276	1,16	Chuva
03/out	1964	1381,8	7,12	Sol
04/out	1791,6	1281,3	6,68	Sol
05/out	1625	1276,5	6,24	Nuvens
06/out	166	249	1,04	Chuva
07/out	1467,5	1181,7	5,91	Nuvens
08/out	1030,4	925,9	4,59	Chuva
09/out	540	615	2,69	Chuva
10/out	443	534	2,44	Chuva
11/out	83	159	0,64	Chuva
12/out	66	128	0,51	Chuva
13/out	356	391	1,71	Chuva
14/out	593	450	3,3	Chuva
16/out	1878	1409	7,1	Sol
17/out	1811	1395	7,1	Sol
18/out	1135	957	4,71	Nuvens
19/out	323	568	2,5	Chuva
20/out	1840,4	1345,4	6,86	Nuvens
21/out	202,2	294,2	1,22	Chuva
22/out	1557,2	1281,2	6,38	Nuvens
23/out	2218	1510,2	7,6	Sol
24/out	2025,4	1369	7,07	Sol
25/out	546,25	627,2	2,74	Chuva
26/out	532,9	627	2,74	Chuva
27/out	1016,8	919	4,37	Nuvens
28/out	755,8	668,2	2,95	Chuva
29/out	1594,6	1309,1	6,67	Nuvens
30/out	1184,6	891,5	4,01	Nuvens
31/out	2018,4	1452,7	7,39	Sol
1/nov	2239,4	1487,9	7,54	Sol
2/nov	2221,4	1480,8	7,62	Sol

TABELA I COMPARATIVO DE PRODUÇÃO

Durante todo o período analisado, o módulo com sistema de rastreamento produziu uma energia total de 51,3 kWh, enquanto o módulo em posição fixa produziu 41,7 kWh. Desse modo, o módulo com rastreador solar obteve um ganho de 25,06 % em relação ao sistema fixo. Vale ressaltar mais uma vez que o período analisado foi composto por muito dias de tempo instável.

Examinando os dados em dias isolados, o dia mais produtivo apresentou um ganho de 50,5% do seguidor solar em relação ao

módulo fixo, como ocorreu no dia 01 de novembro. Nesta avaliação é observado que, em dias de céu limpo, o ganho do sistema com rastreador em relação ao sistema sem rastreador aumenta conforme se aproxima do solstício de verão. Para o primeiro dia de sol com dados coletados (dia 20 de setembro) o ganho foi de 39%. Já para o dia 23 de outubro o ganho foi de 46,8% e, por fim, para o dia 02 de novembro o ganho chegou a 50,5%. Este aumento do ganho se deve ao fato dos dias ficarem mais longos à medida que se aproxima do solstício de verão, com mais horas de sol disponível e maiores ângulos de elevação e azimute.

Se analisado todo o período de obtenção de dados considerando somente os dias de sol ou dias parcialmente nublados, o sistema com seguidor solar produziu 34% a mais de energia que o sistema fixo.

Apesar do período de instabilidade alterar a produção de energia de forma significativa é importante frisar que esse comportamento climático é bastante comum no local de estudo, sendo clima característico da região. Uma verificação em um período de tempo mais amplo pode trazer dados mais conclusivos a respeito do incremento da produção de energia para uma base de estudo regional. Esta afirmativa, porém, não invalida o estudo aplicado ao seguidor solar e permite avaliar a viabilidade e a produção do mesmo para o período proposto.

A figura19 mostra um gráfico com uma comparação de produção durante o período de 45 dias do estudo. Nele percebese claramente a maior produção de energia por parte do seguidor solar em dias com condições favoráveis. Contudo, também é possível visualizar que em dias de grande nebulosidade ou de chuva o ganho é nulo, chegando a limiares negativos por parte do seguidor solar em relação aos módulos fixos.



Os ganhos negativos do seguidor em relação ao sistema fixo se deve ao fato de que, em dias com grande nebulosidade e chuva ou neblina, o seguidor não possui referência do sol e permanece estático, totalmente voltado à leste, ou seja, em sua posição inicial. Desta forma, o módulo móvel acaba por absorver menos irradiância que o módulo fixo, por estar em uma posição menos favorável a absorção de irradiação. Também ocorreu, em alguns dias nublados e de chuva, a movimentação de forma irregular e incorreta do seguidor, ocasionada pela perda de referência dos sensores de movimentação, fazendo com que o seguidor também ficasse em posição imprópria.

Através dos módulos de referência é possível calcular a média de irradiância de irradiância global incidente sobre os módulos durante os 45 dias do estudo. Neste período a média de irradiância foi de 4,6 kWh/m², bem abaixo da média registrada durante os anos de 2001 a 2012 pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e pelo 8° Distrito de Meteorologia (8°DISME) para a cidade de farroupilha, que foi de 5,14 kWh/m²[19].

O gráfico da figura 20 apresenta a produção do módulo móvel e a radiação diária disponível no plano inclinado. Neste gráfico é perceptível que, nos dias em que a produção do seguidor solar em relação ao sistema fixo obteve valores nulos ou negativos, a radiação disponível se encontrava em valores menores que os dias em que a produção do sistema móvel foi maior que a do sistema fixo.

Comparação da Radiação

Assim, observando a radiação disponível e a diferença de produção entre os sistemas, em dias que apresentem radiação média inferior a 3500 Wh/m² não se justifica o uso do seguidor solar, uma vez que este não apresenta vantagem sobre o sistema fixo. Assim, lé interessante nestes dias que o seguidor solar permaneça imóvel e em inclinação próxima ao módulo fixo. Deste modo, a produção de ambos os sistemas ficam em iguais condições, ainda que prejudicada pela baixa irradiância. Logicamente, esse resultado é válido para o sistema de controle de rastreamento utilizado no seguidor deste trabalho, aprimoramentos no sistema de rastreamento podem levar a resultados diferentes aos apresentados.

Por fim, com todos os dados obtidos durante o período de coleta é possível realizar uma análise de tempo de retorno entre os módulos instalados. A produção média mensal do módulo fixo foi de 27,4 kWh enquanto o módulo móvel obteve produção média mensal de 34,3 kWh. Em uma análise de custos o seguidor solar teve um custo 13,42 % superior ao módulo fixo. Dessa forma, considerando os custos envolvidos e a energia produzida por ambos os sistemas, chegou-se à conclusão que o tempo de retorno do sistema móvel é 28,85% menor que a

instalação do módulo fixo, levando em conta a média mensal de produção.

Para uma média mensal de energia de 27,41 kWh do módulo estático e 34,3 kWh do módulo com sistema de rastreio, o tempo de retorno do sistema fixo ficou entre 85 e 86 meses, enquanto o sistema móvel ficou entre 60 e 61 meses. Logo, tendo por base apenas período analisado, o seguidor é vantajoso tanto no ponto de vista energético quanto no ponto de vista financeiro. É necessário, porém, uma análise de período mais amplo para uma conclusão mais precisa pois, nos meses de inverno os sistemas tendem a produzir menos energia devido ao menor tempo de sol durante o dia. Também é importante ressaltar, mais uma vez, que esta análise é realizada sobre o protótipo desenvolvido, podendo haver valores diferentes para outros sistemas de rastreamento.

VIII. CONCLUSÃO

Considerando que quanto maior o nível de radiação incidente sobre o módulo fotovoltaico maior será seu rendimento, este trabalho propôs a utilização de um seguidor solares, que rastreiam a posição do sol e posicionam um módulo de modo que fique perpendicular aos raios solares, a fim de maximizar a produção de produção de energia. Apesar do conhecido aumento de energia imposto por seguidores solares, estes valores podem variar de região a região dependendo de vários fatores como a latitude do local, temperatura, incidência solar, dias nublados, entre ouros fatores.

Diante deste aspecto, a comparação da produção de energia entre um sistema fixo e um sistema seguidor solar de dois eixo instalados na cidade de Farroupilha, RS mostra que o seguidor solar chega a produzir 50,5 % a mais de energia que o sistema fixo, em um dia de alta incidência de irradiância sobre os sistemas. Em uma média geral, durante um período de 45 dias, entre os dias 19 de setembro a 02 de novembro, ganho proporcionado pelo sistema com seguidor solar chegou a 25,06%, com 50,3 kWh produzidos pelo sistema móvel e 40,24 kWh produzidos pelo sistema fixo.

O período analisado foi de bastante variação climática, o que possibilitou a análise em diferentes situações. O sistema móvel não apresentou resultados satisfatórios em períodos de baixa radiação direta, com alta incidência de nuvens, permanecendo estático ou, por vezes, se posicionando em uma posição que não a mais ideal. Por este motivo, em dias de alta nebulosidade e baixa irradiância a análise realizada mostra que é preferível que o seguidor permaneça em um posição próxima à posição do sistema fixo, sem movimentação.

Apesar de ambos os sistemas sofrerem uma pequena interferência de sombreamento durante alguns minutos pela manhã, devido à uma torre de comunicação instalada próxima aos sistemas, o estudo não fica comprometido. O período de sombreamento sobre os módulos é praticamente o mesmo, com um pequeno atraso em relação ao sistema móvel.

Por fim, o seguidor solar se mostrou viável sob o panorama energético, tendo consumo de 4,7% da energia adicional entregue pelo seguidor. Porém, é preciso salientar que esta análise é exclusiva para o seguidor projetado, podendo sofrer variações com outras instalações e a utilização de outros materiais e métodos.

IX. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

À partir do trabalho apresentado alguns pontos e melhorias podem ser sugeridas par a realização de trabalhos futuros, aproveitando a estrutura disponível. A melhoria no algoritmo de movimentação do seguidor, possibilitando o reconhecimento de dias nublados e/ou com baixa radiação solar é um ponto a ser atacado, impedindo que o seguidor solar se movimente erroneamente nos dias com estas características. Nesta linha, também é possível apurar futuramente novas formas de sensoriamento da posição solar, com diferentes materiais e métodos.

Outro possível estudo a ser realizado é a comparação da geração de energia do sistema fixo, instalado no ângulo da latitude local, com diversas inclinações possíveis à partir do seguidor solar. Esta análise pode ser realizada fixando uma determinada posição no seguidor solar fazendo com que este permaneça estático. Desta forma, estes dados permitiriam simular instalações fotovoltaicas instaladas diretamente sobre os telhados, sem correção de ângulo, e o traçar comparativos entre sistemas futuros.

Por fim, é interessante que se dê continuidade ao trabalho realizado, permitindo a captação e estudo dos dados aqui apresentados em um intervalo de tempo maior, podendo assim ser feito um balanço anual do comparativo entre os sistemas.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ivete e Alcides, por tudo que me ensinaram, pelo apoio, paciência e por serem a base de minha formação moral e profissional.

A Marlise pela atenção a mim dedicada durante todo este tempo e por toda a confiança, companheirismo e, acima de tudo, paciência.

À minha família por todo o apoio.

Ao professor Ivan Gabe pela orientação, paciência, confiança e, principalmente o esforço em transmitir todo conhecimento e experiência para que o resultado fosse o melhor possível.

Ao professor Alexandre Bühler pela ajuda prestada e pela primeira oportunidade da pesquisa na área fotovoltaica.

Ao IFRS pela disponibilidade de recursos e oportunidades de bolsa de pesquisa e extensão.

À todos que de alguma forma contribuíram fica toda a a gratidão.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE (2017), Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2017, Ano Base 2016. Rio de Janeiro, 2017.
- [2] WEO (2016), World Energy Outlook 2016. The Energy Factor in 2040. Disponível em: www.iea.org/WEO. Acesso em Novembro de 2017.
- [3] SolarPower Europe (2017), Global Solar Power Demands Grow Nearly 50% in 2016, Europe Drops by 20%. Bruxelas, 2017
- [4] EPE (2015), Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: www.epe.gov.br. Acesso em: Abril de 2017.
- [5] MME (2015), Ministério de Minas e Energia. Fonte Solar Será Responsável por 7 mil MW na Matriz Elétrica até

2024. Disponível em: www.mme.gov.br. Acesso em: Março de 2017.

- [6] EPE (2017), Balanço Energético Nacional 2017 Ano Base 2016. Brasília, 2017
- [7] World Energy Council (2016), World Energy Resources 2016. Londres, 2016.
- [8] Oliveira, M.M.(2008), Análise e Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Azimutal, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008
- [9] Silva, M. C. da C. (2012), Estudo Comparativo de um Painel Solar Fotovoltaico Fixo vs Móvel. Tese de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, 2012.
- [10] Trevelin, F.C. Estudo Comparativo Entre Métodos de Rastreamento Solar Aplicados a Sistemas Fotovoltaicos, Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2014
- [11] Vieira, R.G. Análise do Desempenho Entre um Painel Solar Estático e com rastreamento no Município de Mossoró-RN, Dissertação de Mestrado Acadêmico Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido-UFERSA. Mossoró, 2014
- [12] Masters, G. (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Willey & Sons, Hoboken, New Jersey.
- [13] Teston.S.A. Projeto, Implementação e Análise de um Conversor CC-CC de Alto Ganho e Alto Rendimento para Aplicações Fotovoltaicas. Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. UTFPR. Pato Branco, 2016
- [14] Buhler, A.J. Estudos de Técnicas de Determinação Experimental e Pós-Processamento de Curvas Características de Módulos Fotovoltaicos. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS. Porto Alegre, 2011.
- [15] Pinho, J. T. e Galdino, M. A. (2014) Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, CEPEL-CRESESB, Rio de Janeiro.
- [16] IEEE Spectrum (2012), The Solar Efficiency Gap, Disponível em: spectrum.ieee.org/green-tech/solar/thesolar-efficiency-gap. Acesso em: Abril de 2017.
- [17] Quesada, G, et al. (2015), Tracking Strategy for Photovoltaic Solar Systems in High Latitudes. Energy Convertion and Management.103 (2015): 147-156
- [18] Kelly, N.A., Gibson T.L.. (2009), Improved Photovoltaic Energy Output for Cloudy Conditions with a Solar Tracking System. Solar Energy. 83.11 (2009): 2092-2102.
- [19] De Oliveira, Jivago Schumacher et al. Disponibilidade de irradiância solar para geração de energia elétrica na Alemanha e no estado do Rio Grande do Sul. Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas, v. 14, n. 2, p. 205-212, 2013.