

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – CAMPUS ARARANGUÁ

ANDRÉ POSSAMAI ROSSO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
DE ENERGIA**

ARARANGUÁ, 2016

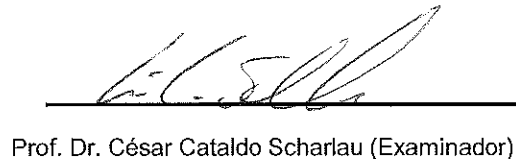
ANDRÉ POSSAMAI ROSSO

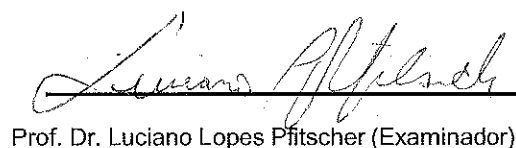
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA


Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina - Campus Araranguá

Aprovado em: 01/12/2016


Prof. Dr. Giuliano Ams Rampinelli (Orientador)


Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Examinador)


Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher (Examinador)


Prof. Dr. Reginaldo Geremias (Supervisor)

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INTEGRADOS EM REVESTIMENTO CERÂMICO PARA APLICAÇÃO EM FACHADAS VENTILADAS

André Possamai Rosso*

RESUMO

A energia solar fotovoltaica apresenta-se como uma das soluções viáveis e competitivas quando se trata do uso de energias renováveis. A geração distribuída com sistemas fotovoltaicos tem características peculiares que permitem uma integração harmoniosa às edificações. Atualmente há regulamentação e normativas específicas para esta aplicação tornando o setor atrativo à investimentos. Em um sistema fotovoltaico, o módulo é um dos principais equipamentos, tendo a responsabilidade da conversão de energia solar em energia elétrica. Muitas edificações apresentam fachadas ventiladas como elemento de conforto térmico e arquitetônico, mas que também podem ser utilizadas como um local para a instalação de módulos fotovoltaicos. As fachadas ventiladas são constituídas por revestimento cerâmico ou vidro. Este trabalho tem como objetivo apresentar ferramentas para a construção de protótipos de módulos fotovoltaicos, integrados em revestimento cerâmico, aplicado em uma fachada ventilada. Este componente está instalado em uma planta piloto com arquitetura bioclimática de nível A em eficiência energética, na cidade de Araranguá – SC, no campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Após o desenvolvimento dos protótipos e a instalação dos mesmos na fachada ventilada da planta piloto bioclimática, testes de exposição à radiação solar e medições para o levantamento da curva I-V foram realizados. Os objetivos do trabalho foram alcançados ao apresentar ser possível integrar os protótipos dos módulos fotovoltaicos em revestimento cerâmico na fachada ventilada da planta piloto.

Palavras-chaves: Sistema fotovoltaico. Arquitetura bioclimática. Eficiência energética. Protótipos de módulos fotovoltaicos.

*Graduando do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: possamairosso@yahoo.com.br.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente na maioria dos momentos de nossas vidas, sem ela seria muito difícil nossa sobrevivência, evolução e qualidade de vida como seres humanos. Com um aumento gradativo da população mundial, a eletricidade vindo de fontes renováveis vem sendo muito aplicada na matriz elétrica. Os sistemas fotovoltaicos têm demonstrado confiança e vem sendo bastante utilizados para um aumento da fonte renovável na matriz elétrica.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), as edificações comerciais representam parte considerável do consumo nacional de energia elétrica. Em 2015 houve uma diminuição em relação ao ano de 2014, uma queda total de 1,8%, com destaque para o setor residencial que interrompeu uma tendência de crescimento, recuando 0,7% (EPE 2016).

Além das campanhas e ações de redução do consumo de energia nas edificações, através de ações de eficiência energética, há a possibilidade da produção da energia junto à edificação, utilizando os sistemas fotovoltaicos como material de construção, para assim reduzir ainda mais os impactos econômicos e ambientais inerentes ao consumo de energia elétrica (RÜTHER *et al*, 2012).

Em um sistema fotovoltaico os módulos são os componentes que produzem energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico que ocorre nas células solares. Conseqüentemente, o módulo fotovoltaico é um dos principais dispositivos em relação à confiabilidade do sistema. Para que um sistema fotovoltaico produza energia com confiabilidade necessária, o projeto, a instalação e a manutenção devem ser otimizados (ZANESCO, 2014).

No entanto, problemas devidos à degradação dos módulos podem surgir e devem ser estudados para definir a confiabilidade e o tempo de vida do sistema. Em geral alguns fabricantes fornecem garantia de 90% da potência máxima inicial após 10 anos e de 80% após 25 anos (ZANESCO, 2014).

Coello (2011) avaliou a degradação dos parâmetros elétricos de 785 módulos fotovoltaicos instalados em duas centrais fotovoltaicas, durante os dois primeiros anos de operação. Verificou-se que a potência de pico diminuiu entre 1,0 % e 3,5 % no primeiro ano e entre 0,4 % e 1,3 % no segundo ano. Não ocorreu somente a redução da corrente elétrica de curto-circuito, mas

também da tensão de circuito aberto (V_{oc}). Constatou-se que a tensão no ponto de máxima potência manteve-se praticamente constante durante o primeiro ano, mas caiu depois dos dois primeiros anos.

Este trabalho tem como objetivo apresentar ferramentas na construção de protótipos de módulos fotovoltaicos, integrados em revestimentos cerâmicos para uma fachada ventilada, instalada em uma planta piloto com arquitetura bioclimática de nível A em eficiência energética, construída na cidade de Araranguá – SC (ESPÍNDOLA, 2016). Além da construção dos protótipos serão realizadas medições para o levantamento da curva corrente - tensão (I-V) dos mesmos. A caracterização elétrica de módulos fotovoltaicos a partir das suas curvas I-V é fundamental para a análise de seu desempenho energético. A partir da curva I-V dos protótipos desenvolvidos, será possível também analisar a degradação temporal dos módulos fotovoltaicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir serão descritas as premissas teóricas utilizadas na elaboração do presente trabalho.

2.1 Geração distribuída com sistemas fotovoltaicos

Desde 17 de abril de 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL n° 482/2012, o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade, gerando créditos de energia que podem ser utilizados em meses subsequentes (ANEEL, 2016).

Os sistemas de geração distribuída são uma opção para minimizar as perdas provenientes do transporte da energia gerada, devido à proximidade da geração ao consumidor, além de reduzir e postergar investimentos em expansão do sistema elétrico. Esses sistemas possuem baixo impacto ambiental, menor tempo de implantação, redução no carregamento das redes e das perdas em linhas de transmissão e distribuição, melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada, diversificação da matriz energética, desenvolvimento local e liberdade do consumidor quando comparado ao sistema centralizado (DINIZ *et al*, 2014).

A geração de energia elétrica conectada à rede de distribuição, pode se dar, através de sistemas fotovoltaicos integrados à rede de distribuição de energia elétrica, utilizando um inversor de frequência que controla a injeção de energia elétrica na rede, mantendo critérios de qualidade e segurança (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 1 apresenta o modelo de geração distribuída com sistema fotovoltaico.

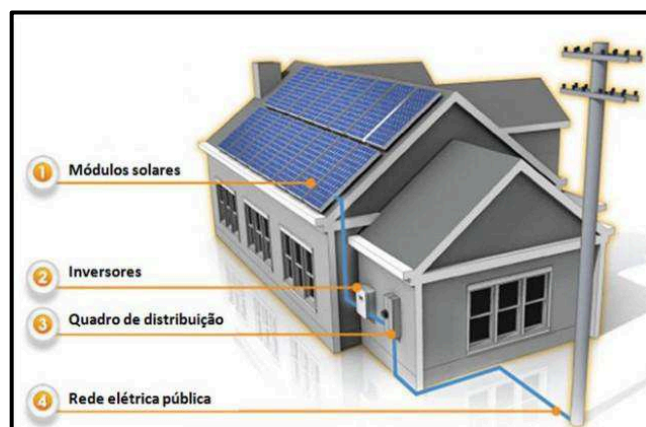


Figura 1 - Modelo de geração distribuída com sistema fotovoltaico (Fonte: Google).

Dentre as principais vantagens de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica na forma de geração distribuída, e talvez não seja por acaso que na Alemanha 65% das instalações estejam sobre telhados de residências, comércios e indústrias, pode-se citar: utilização de espaços ociosos; tamanho ajustável; o sol é uma matéria-prima livre e ilimitada. Neste momento, o país enfrenta falta de chuvas, mas não existem registros de falta de sol. A geração fotovoltaica aumenta em períodos com falta de chuvas, reduzindo o risco de racionamento, não há fuga de gases e emissões de Gases de Efeito Estufa com zero emissão de CO₂, ao contrário das termelétricas que estão operando intensivamente neste momento no Brasil (CARVALHO *et al*, 2016).

A indústria fotovoltaica vem desenvolvendo uma série de produtos dirigidos à aplicação ao entorno construído, tendo recentemente lançados comercialmente módulos fotovoltaicos de vidro sem moldura, que podem ser instalados diretamente como material de revestimento de telhados ou fachadas (RÜTHER, 2004). Algumas edificações apresentam tipos de fachadas que podem ser usadas para proteção. Essas fachadas podem ser aproveitadas para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

2.2 Sistemas fotovoltaicos aplicados em fachadas ventiladas

Os módulos fotovoltaicos são projetados e fabricados para serem utilizados em ambientes externos, por um longo período de tempo, sob sol, chuva e outros agentes climáticos, devendo operar satisfatoriamente nestas condições por períodos de até 30 anos. Assim sendo, os sistemas fotovoltaicos integrados na edificação podem ter a dupla função de gerar eletricidade e funcionar como elemento arquitetônico na cobertura de telhados, paredes, janelas e fachadas (RÜTHER, 2004).

A integração da energia solar fotovoltaica à edificação é uma grande alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica a partir da rede elétrica e o Brasil tem as condições necessárias para aproveitar tais tecnologias (Rüther e Zilles, 2011, apud Ruther, Naspolini e Pinto, 2016). As edificações são os maiores consumidores de eletricidade em regiões de climas quentes (Rezaie *et al.*, 2013, Lam *et al.*, 2004; Kapsomenakis *et al.*, 2013, apud Ruther, Naspolini e Pinto, 2016). O aumento da temperatura ambiente contribui para o aumento das cargas de ar condicionado e conseqüentemente para o acréscimo da energia consumida pela edificação (RÜTHER, NASPOLINI e PINTO, 2016).

Segundo Siqueira Junior (2003), as fachadas ventiladas podem ser definidas como um sistema formado por placas ou painéis fixados externamente à base suporte do edifício através de fixadores metálicos ou por uma subestrutura auxiliar metálica, constituindo-se na vedação vertical exterior de uma edificação. Essa estrutura promove a remoção do ar aquecido no interior da câmara pelo efeito chaminé.

As fachadas ventiladas foram desenvolvidas para proteger as construções da ação combinada da chuva e do vento, tendo uma boa característica estética e apresentando um conforto térmico e acústico satisfatório (CAMPOS, 2011).

Nos países da Europa muitas construções apresentam esses tipos de fachada. Existem fachadas com a tecnologia apropriada para serem inseridos os módulos fotovoltaicos, aproveitando a estrutura disponível e mantendo sua funcionalidade. Esse tipo de fachadas vem substituindo as fachadas de vidros, alumínio e cerâmicas, como pode ser visto na Figura 2 (CHIVELET; SOLLA, 2007).



Figura 2 – Exemplo de fachada ventilada com sistemas fotovoltaicos (CHIVELET; SOLLA, 2007).

2.3 Produção e operação de módulos fotovoltaicos

O módulo fotovoltaico convencional apresenta um material de base, arranjo de células fotovoltaicas, material encapsulante, vidro para proteção mecânica e uma borda de alumínio para realizar a junção entre esses materiais, garantindo proteção e isolamento contra intempéries. Outro esquema, semelhante ao utilizado na montagem dos protótipos, é realizado com a integração direta entre o material encapsulante, a célula fotovoltaica e o material de base, não possuindo um material no entorno do conjunto, conforme apresentado na Figura 3 (GORTER; REINDERS, 2012).

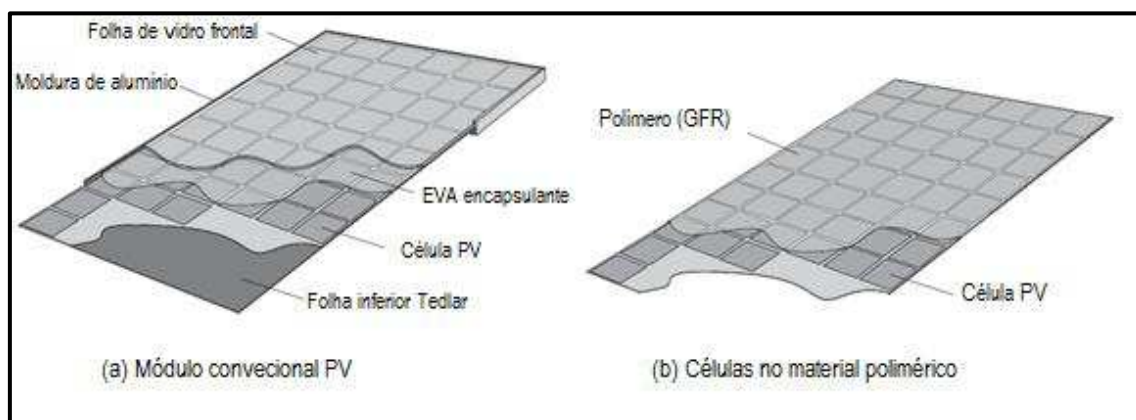


Figura 3 - Diferença entre módulos fotovoltaicos convencionais (a) e montado (b) (GORTER; REINDERS, 2012).

Para a fabricação industrial de módulos fotovoltaicos são utilizados e adaptados processos padrões da indústria eletrônica, como a soldagem de fios.

A montagem das células nos módulos fotovoltaicos pode ser realizada através de um sistema de solda a vácuo e propondo a integração de diodos de *bypass* (WIESENFARTH *et al*, 2014). Os módulos fotovoltaicos, geralmente, são formados por um determinado número de células associadas em série. Uma célula que estiver sombreada pode funcionar como carga para as demais células ocasionando uma dissipação de potência sobre ela e, por consequência, provocando um aquecimento que pode causar danos à célula. Esse fenômeno é conhecido como hot-spot (pontos quentes). Para evitar essa situação são conectados, em antiparalelo com as células, um diodo conhecido como diodo de *bypass*. Quando a célula não tem problema de identidade em relação às demais e não estiver sombreada, o diodo de *bypass* encontra-se reversamente polarizado, não permitindo que por ele circule corrente elétrica. No entanto, quando uma célula estiver sombreada, o mesmo encontra-se diretamente polarizado e, portanto, permitirá que por ele circule corrente. Neste caso, a célula sombreada não gera energia elétrica, mas também não se comporta como carga para as demais células. Na prática, os diodos de *bypass* não estão conectados em antiparalelo com cada célula associada, mas sim com grupos de células (RAMPINELLI, 2007).

Os módulos fotovoltaicos apresentam uma variedade de problemas que podem ser facilmente identificados por inspeção visual. Entre eles, a experiência indica que os mais frequentes no Brasil são os de manuseio inadequado, apresentando moldura de alumínio amassada, entortada ou desencaixada, como pode ser visto na Figura 4 (GALDINO e SILVA, 2014).

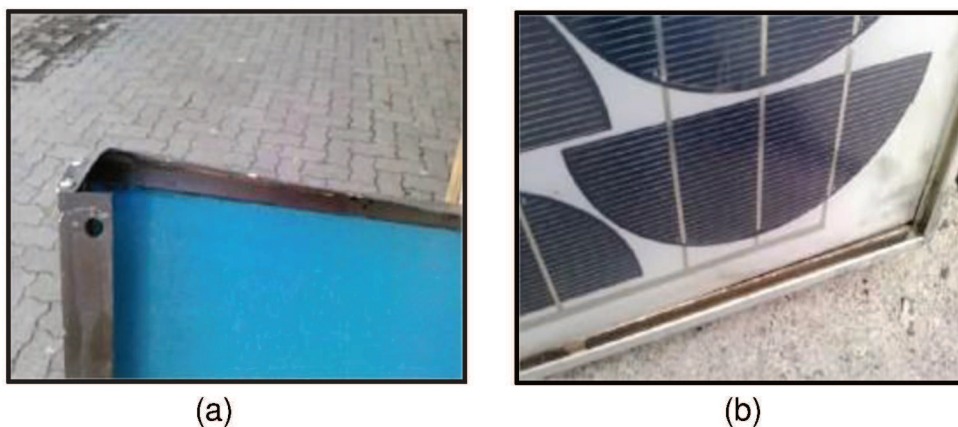


Figura 4 - Problemas em molduras de módulos: moldura entortada (a) e desencaixada (b) (Galdino e Silva, 2014).

Outros problemas comumente detectados no país são de destruição na caixa de conexão, impacto de objetos diretamente ao módulo, disparos de armas de fogo e descargas atmosféricas, como pode ser observado na Figura 5 (GALDINO e SILVA, 2014).

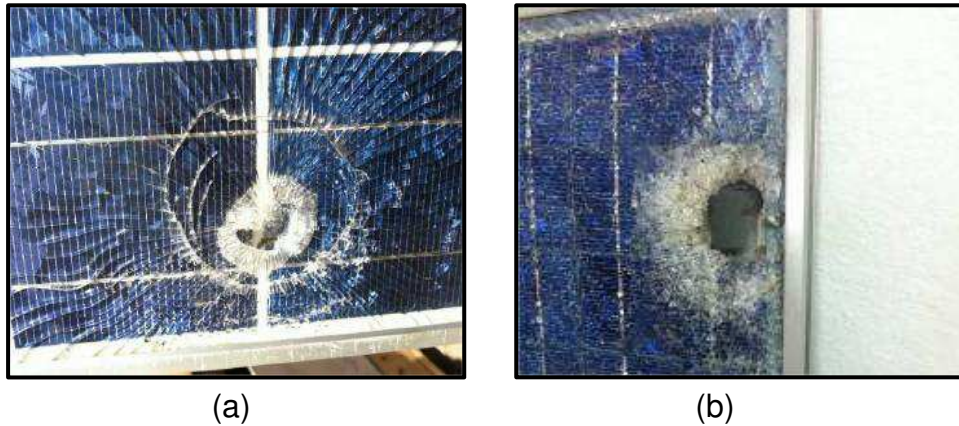


Figura 5 - Problemas em molduras de módulos: módulo fotovoltaico atingido por disparo de arma de fogo (a) módulo fotovoltaico atingido por raio (b) (Galdino e Silva, 2014).

Outros problemas que podem ser detectados são os relacionados aos defeitos de degradação. Alguns defeitos de degradação são chamados de *Browning* e *Yellowing*, sendo, respectivamente, o escurecimento da resina EVA e quando a resina EVA apresenta uma tonalidade amarelada, como pode ser visto na Figura 6. A Figura 7 mostra outros defeitos que podem ser verificados visualmente, que são os de delaminação e infiltração, apresentando respectivamente descolamento da resina EVA na superfície das células fotovoltaicas e quando há penetração de umidade no interior do módulo, sendo a partir das bordas ou da caixa de conexão (GALDINO e SILVA, 2014).

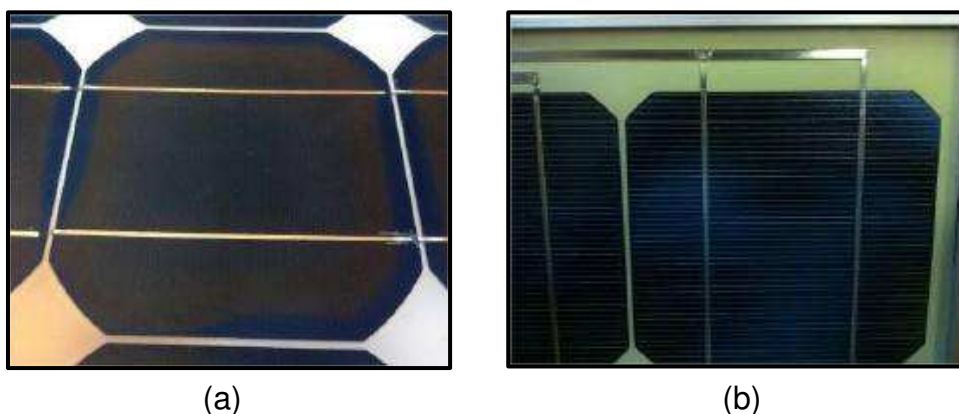


Figura 6 - Escurecimento da resina EVA em células de silício monocristalino -m-Si (a), amarelamento da resina EVA em módulos de silício monocristalino m-Si (Galdino e Silva, 2014).

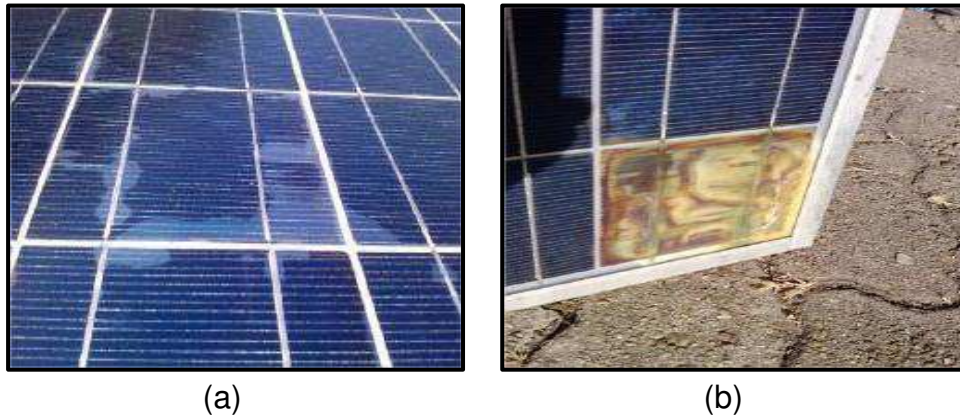


Figura 7 - Delaminação de módulos fotovoltaicos de m-Si (a), Infiltração a partir das bordas (b) (Galdino e Silva, 2014).

O conhecimento da perda de potência por degradação dos módulos fotovoltaicos instalados em um sistema é importante para prever a confiabilidade e o tempo de vida do sistema. Este aspecto é de interesse de investidores e usuários desta tecnologia, pois a degradação afeta diretamente a potência produzida pelo sistema fotovoltaico (ZANESCO, 2014). Esta informação é importante para a estimativa de geração de energia elétrica ao longo da vida útil do sistema fotovoltaico.

2.4 Avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos

A potência produzida pelo módulo fotovoltaico depende de alguns fatores, sendo que dois dos mais importantes referem-se à radiação solar incidente no plano do módulo e a temperatura de operação das células fotovoltaicas que constituem o módulo. Outros aspectos importantes que podem aparecer são às perdas na fiação e diferenças entre as células individuais que constituem um módulo fotovoltaico ou entre os módulos que constituem em um gerador fotovoltaico. A curva característica (I-V) descreve o comportamento elétrico nos terminais do módulo ou gerador fotovoltaico sob influência desses fatores (MACÊDO, 2006).

A partir do momento que um módulo fotovoltaico está exposto à radiação solar, uma tensão pode ser medida entre os terminais positivo e negativo usando um voltímetro. A tensão obtida e observada em um módulo desconectado é a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Ao conectar os terminais desse módulo a um amperímetro, mede-se sua corrente de curto-circuito (I_{sc}).

Um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica $I-V$. O módulo é submetido às condições padrões de ensaio, uma fonte de tensão variável realiza uma varredura entre uma tensão negativa em relação aos terminais do módulo, até ultrapassar a tensão de circuito aberto do módulo com a corrente ficando negativamente. Durante esta varredura são registrados pares de dados de tensão e corrente, permitindo o traçado de uma curva característica (PINHO e GALDINO, 2014). A Figura 8 apresenta a curva característica $I-V$ e a curva de potência $P-V$ de um módulo.

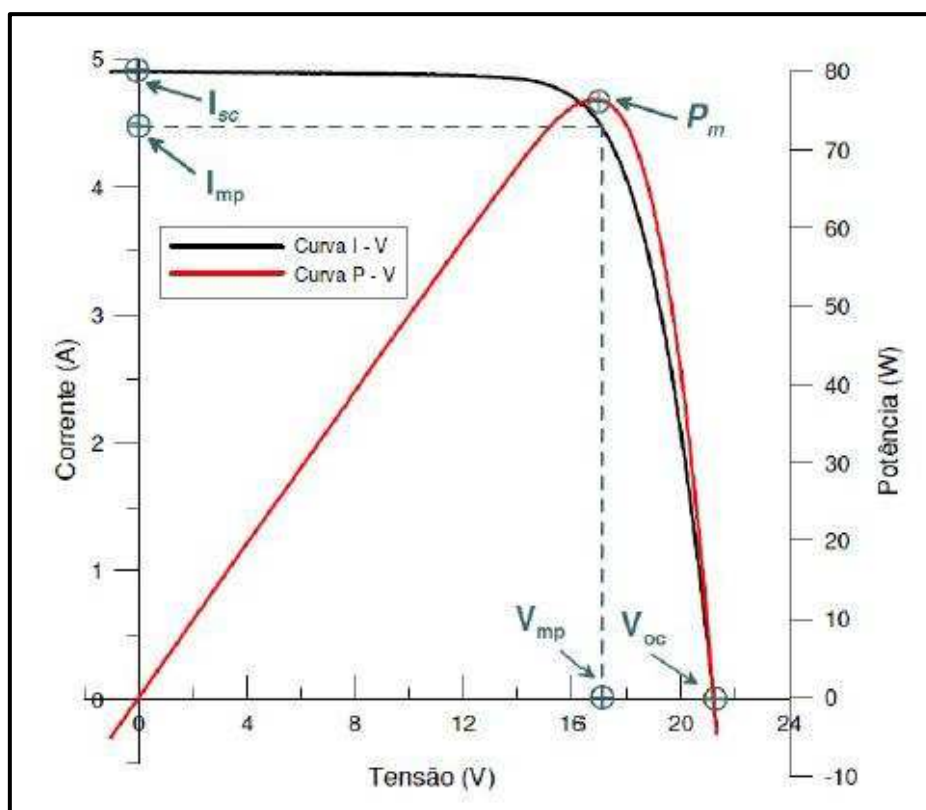


Figura 8 – Curva característica $I-V$ e curva de potência $P-V$ de um módulo (Gasparin, 2009).

Conforme indica a Figura 8, podem-se destacar os seguintes pontos de uma curva característica $I-V$ (BÜHLER, 2011):

- Corrente de curto-circuito (I_{sc}) [A]: corrente que o dispositivo fotovoltaico fornece quando seus terminais são interligados por um conector com resistência elétrica idealmente nula, ou seja, é a corrente equivalente a uma tensão igual a zero.

- Tensão de circuito aberto (V_{oc}) [V]: tensão que surge nos terminais de um dispositivo fotovoltaico quando entre estes terminais existe uma resistência elétrica idealmente infinita, ou seja, é a tensão equivalente a uma corrente elétrica igual a zero.
- Ponto de máxima potência (P_{mp}) [W]: é a máxima potência que o dispositivo fotovoltaico é capaz de fornecer sob uma determinada condição de irradiância e temperatura.
- Corrente de máxima potência (I_{mp}) [A]: é a corrente que o dispositivo fornece no ponto de máxima potência.
- Tensão de máxima potência (V_{mp}) [V]: é a tensão que surge nos terminais do dispositivo no ponto de máxima potência.
- Fator de forma (FF): é um indicativo importante da qualidade das propriedades elétricas do módulo. Quanto maior o valor de FF mais retangular é a curva I-V e, portanto, melhores serão as características elétricas do dispositivo. Considerando uma temperatura de 25°C, o máximo valor teórico que uma célula de m-Si pode ter para FF é de 0,83 (BÜHLER, 2011). A Equação 1 define o valor de fator de forma.

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

- Eficiência (η): para determinar qual a eficiência de um módulo fotovoltaico é necessário saber a irradiância que incide sobre a superfície do mesmo e qual a potência que o módulo é capaz de fornecer para esta energia a uma dada temperatura. Matematicamente a definição de eficiência é dada pela Equação 2.

$$\eta = \frac{P_m}{AG} \quad (2)$$

onde η é a eficiência do módulo, P_m [W] é a máxima potência que o módulo é capaz de fornecer para uma dada condição de temperatura e irradiância, A é a área do módulo e G é a irradiância global incidente no plano do mesmo. Para a determinação da eficiência dos módulos ensaiados neste trabalho a técnica

adotada foi a de medir uma curva característica de corrente por tensão (I-V) e através desta determinar o seu ponto de máxima potência (BÜHLER, 2010).

Para levantar a curva característica I-V de uma célula, um módulo ou um arranjo fotovoltaico é necessário algum dispositivo que polarize estes conversores, enquanto iluminados, nos diversos pontos da curva e um equipamento para medir, em conjunto, os valores de corrente e tensão (pares I-V). Também é necessário saber informações sobre a irradiância incidente e a temperatura operacional do dispositivo que está sendo caracterizado (OLIVEIRA, 2015).

O desempenho do sistema fotovoltaico é inerente à própria tecnologia quando exposta às condições meteorológicas locais, essencialmente da irradiação solar e temperatura, e dos limites de espaço físico estabelecidos para instalação da estrutura/suporte, influenciando a orientação e inclinação dos módulos, bem como os níveis de sombreamento na presença de obstáculos que não podem ser minimizados (MOURA *et al*, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção faz referência aos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento de protótipos dos módulos fotovoltaicos. Os protótipos desenvolvidos serão integrados na fachada ventilada da planta piloto bioclimática.

Os módulos fotovoltaicos foram desenvolvidos em um processo artesanal, fazendo uso de equipamentos e componentes disponíveis no Laboratório de Pesquisa Aplicada da Universidade Federal de Santa Catarina. Para a produção seriada dos módulos fotovoltaicos em revestimento cerâmico se faz necessário a inclusão de uma linha industrial composta por equipamentos específicos de alta tecnologia.

3.1 Fabricação de módulos convencionais

Na fabricação de módulos fotovoltaicos em escala industrial vários processos individuais e contínuos colocam as células fotovoltaicas em um módulo fotovoltaico. Os módulos fotovoltaicos devem ser fabricados utilizando-

se a melhor tecnologia, para que eles possam durar por décadas conforme foram projetados. A Figura 9 apresenta as principais etapas na produção de um módulo fotovoltaico convencional.

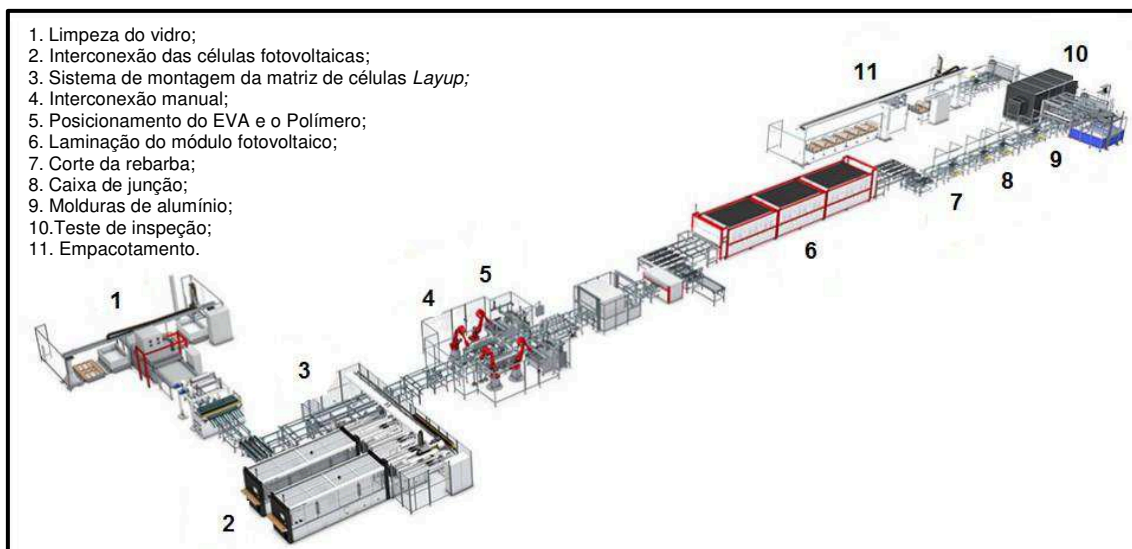


Figura 9 – Processo de Fabricação de Módulos Fotovoltaicos (Fonte: portal solar).

Conforme a Figura 9, os passos que podem se destacar na produção do módulo fotovoltaico convencional são:

Passo 1: Limpeza do vidro:

A limpeza do vidro de maneira especial é fundamental para que não formem bolhas no módulo fotovoltaico depois de laminado e pronto.

Passo 2: Interconexão das células fotovoltaicas:

A interconexão das células é uma das partes mais críticas na produção dos módulos fotovoltaicos. As células são interconectadas através de fios condutores feitos de cobre ou alumínio. Após conectadas, as células formam em série *string* de células, sendo conectadas o lado inferior com o lado superior de cada célula até formar em série o número desejado de células. Nesse processo de conexão uma máquina de solda especial de contato leve solda as conexões, conforme apresentado na Figura 10.



Figura 10 – Processo de interconexão das células fotovoltaicas (fonte: portal solar).

Passo 3: Sistema de montagem da matriz de células *Layup*:

O sistema de montagem da matriz de células é o processo de coletar as séries de células fotovoltaicas interconectadas e posicionar elas sobre o vidro e o EVA. Este processo é delicado e precisa ser realizado por uma máquina especial para evitar a quebra das células e garantir o perfeito alinhamento delas no módulo fotovoltaico. O sistema *Layup* é sempre conectado às *strings*, sendo que a máquina de conexão das células, devendo funcionar em perfeita harmonia para garantir qualidade e velocidade no processo. A Figura 11 apresenta o sistema *Matrix Assembly System 3.8 BB* da empresa Meyer Burger que é capaz de manusear 3800 células fotovoltaicas por hora.

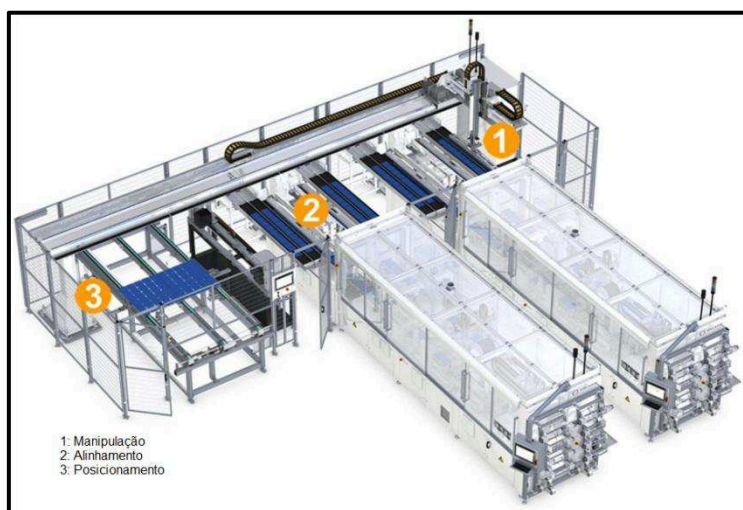


Figura 11 – Sistema de montagem da matriz de células (fonte: portal solar).

Passo 4: Interconexão manual:

Após a matriz de células serem montada e colocada no alinhamento perfeito sobre o vidro e o EVA, a próxima etapa é fazer a interconexão manual das séries de células. De uma maneira simples, as *strings* de células são soldadas obtendo uma ligação elétrica entre elas, conforme pode ser visto na Figura 12.



Figura 12 – Interconexão manual das células fotovoltaicas (fonte: portal solar).

Passo 5: Posicionamento do EVA e o Polímero:

A segunda folha de EVA é adicionada com cuidado sobre a matriz de células e, em seguida, o polímero é adicionado sobre o EVA, conforme apresentado na Figura 13. Após este passo, o módulo fotovoltaico está pronto para entrar na laminadora e se tornar impermeável e protegido.



Figura 13 – Posicionamento do EVA e Polímero (fonte: portal solar).

Passo 6: Laminação do módulo fotovoltaico:

Na maioria das laminadoras, quatro módulos por vez entram em uma máquina de laminação. O processo de laminação apresentado na Figura 14 é onde ocorre o derretimento/fusão do EVA formando uma junção perfeita

entre as camadas, e assim, protegendo as células de qualquer ação do tempo como a chuva e poeira.

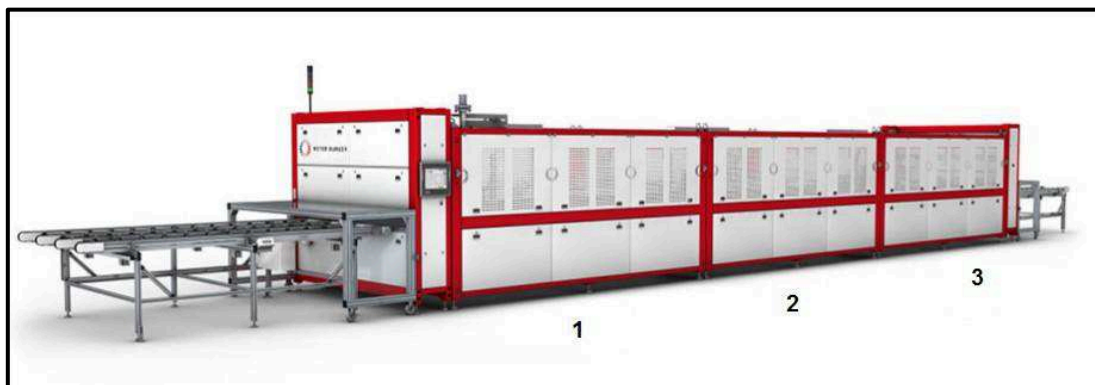


Figura 14 – Máquina para laminação de módulos fotovoltaicos (fonte: portal solar).

As melhores laminadoras apresentam três câmaras de laminação:

- 1: Pré-aquecimento e laminação;
- 2: Somente laminação;
- 3: Controle do processo de resfriamento do módulo fotovoltaico.

Uma das etapas mais importante neste processo é o resfriamento do módulo fotovoltaico. As laminadoras de três câmaras proporcionam uma curva de resfriamento perfeita, evitando assim que o módulo se envergue.

Passo 7: Corte da rebarba:

Quando o módulo fotovoltaico sai da laminadora sobra um pouco de polímero e EVA nas laterais do módulo. Desta forma, um operador utiliza-se de uma ferramenta especial para rapidamente cortar a rebarba, conforme apresentado na Figura 15.



Figura 15 – Corte de rebarba formada pelo excesso de EVA e polímero (fonte: portal solar).

Passo 8: Caixa de junção:

A caixa de junção é de fácil e rápida instalação. Utiliza-se silicone como selante ou uma fita especial dupla-face para fazer a fixação, conforme apresentado na Figura 16. Na caixa de junção encontram-se os diodos de *bypass* que vão garantir a segurança e o bom funcionamento do módulo fotovoltaico.

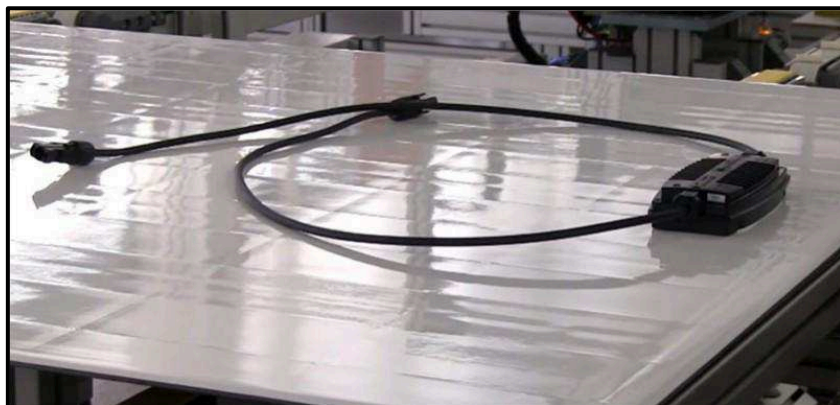


Figura 16 – Conexão da caixa de junção (fonte: portal solar).

Passo 9: Molduras de alumínio:

Após a instalação da caixa de junção, uma prensa semi-automática ou automática coloca a moldura de alumínio no módulo fotovoltaico. A moldura de alumínio fornece proteção e rigidez para o vidro e acabamento para o módulo fotovoltaico, conforme apresentado na Figura 17.

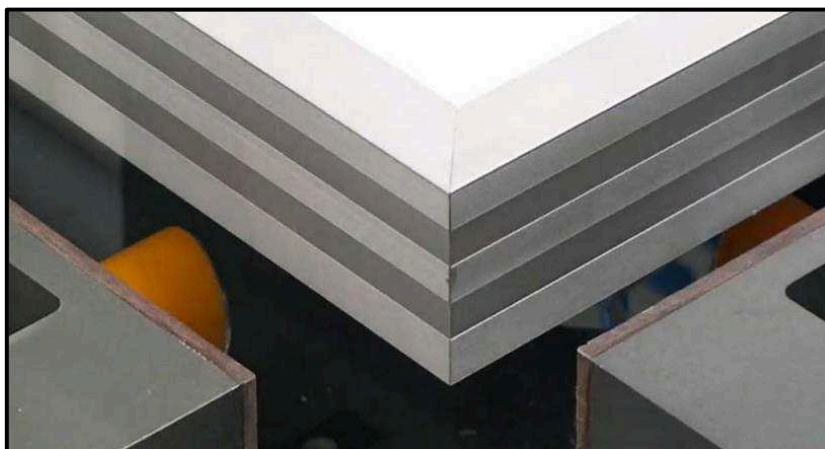


Figura 17 – Estrutura de alumínio para proteção e acabamento no módulo fotovoltaico (fonte: portal solar).

Passo 10: Teste de inspeção:

O teste de inspeção é o último passo na produção de módulos fotovoltaicos, sendo fundamental para garantir a qualidade do módulo. Tradicionalmente, deve-se fazer no mínimo três testes. (i) o teste de eletroluminescência, (ii) o teste termográfico e (iii) a determinação da curva I-V.

O teste de eletroluminescência, tem como finalidade fazer um raio x do módulo fotovoltaico. Uma quantidade de corrente é injetada no módulo fotovoltaico e uma foto em infravermelho revela se o módulo possui células compatíveis e se existem microfissuras. A Figura 18 mostra uma imagem do teste realizado.

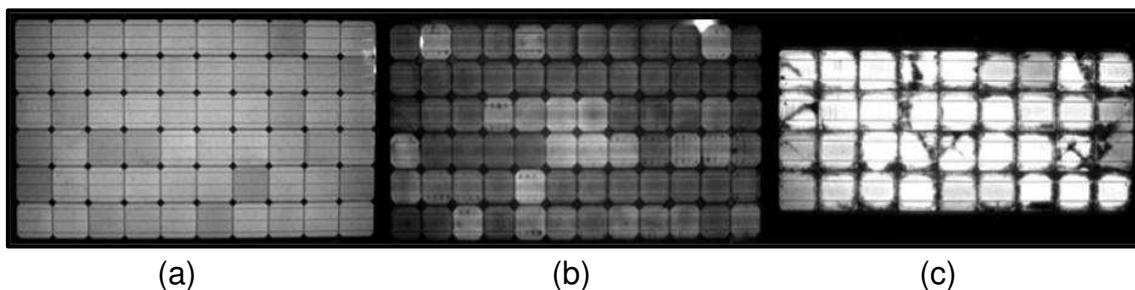


Figura 18 – Teste de eletroluminescência *El test*: (a) Sem microfissuras e boa combinação de células, (b) Com microfissuras e combinação ruim de células, (c) Multi microfissuras e combinação ruim de células (fonte: portal solar).

A termografia é uma técnica que permite o registro do campo de temperaturas de uma cena focalizada, através da energia radiante infravermelha emitida pelos objetos do campo de visão da câmera termográfica. A termografia de dispositivos fotovoltaicos permite uma visualização de todo o campo de temperaturas e não apenas a temperatura de um único ponto (RAMPINELLI, 2007).

A Figura 19 mostra um módulo fotovoltaico em equilíbrio térmico com o ambiente e em circuito aberto, e o mesmo módulo em equilíbrio térmico em curto circuito. Quando o módulo encontra-se em circuito aberto o seu campo de temperatura é uniforme. Em condição de curto circuito pode-se verificar que o campo de temperaturas do módulo não é mais uniforme e a energia solar convertida em energia elétrica das células acaba sendo dissipada em algumas poucas células, resultando em uma região mais aquecida do módulo (RAMPINELLI, 2007).

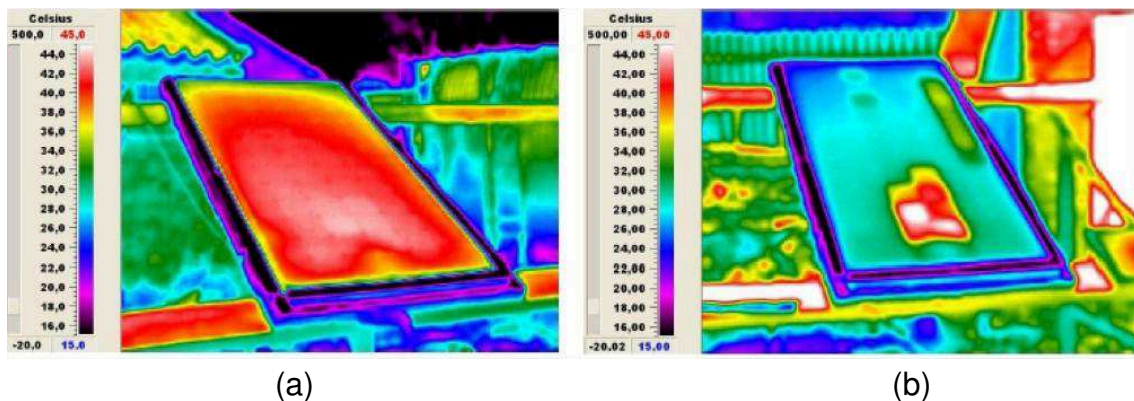


Figura 19 – (a) Módulo fotovoltaico em condição de circuito aberto, (b) módulo fotovoltaico em condição de curto circuito (fonte: Rampinelli, 2007).

3.2 Materiais

Os materiais utilizados no desenvolvimento dos protótipos dos módulos fotovoltaicos estão relacionados a seguir:

- Piso cerâmico ELIANE 118x59 cm;
- Célula fotovoltaica monocristalina m-Si: 4,74 W, 0,5 V, $i = 9,48$ A, $n = 19,4$
- Célula fotovoltaica policristalina p-Si: 4,38 W, 0,5 V, $i = 8,76$ A, $n = 17,93$;
- Fio de estanho *Cast solda em fio 189-MSX10 60x40 500 g Azul 15944*;
- EVA;
- Sylgard 184 Silicone Elastomer base;
- Vidro;
- Ferro de solda *Hikari Plus SC-60 220V 50W*;
- Fluxo de Solda No Clean 500 mL;
- Caneta de fluxo;
- Caixa de junção com os conectores PV-JB/WL-V00CC;
- Espátula de polipropileno 27X180 mm Nalgon;
- Álcool Isopropílico 1000 mL NEON;
- Fita de estanho 1,8 mm e 5 mm;
- Silicone PU industrial branco 300 g;
- Aquecedor Térmico;
- Parafusos auto brocante;

- Amperímetro;
- Sensor de temperatura Termistor NTC 10k.

3.3 Desenvolvimento dos protótipos fotovoltaicos

Foram desenvolvidos quatro tipos de protótipos apresentando diferentes estruturas físicas nos encapsulamentos das células monocristalinas e policristalinas de silício. O primeiro protótipo foi obtido através de um módulo semi flexível (Prot 1) aplicado no revestimento cerâmico. Foram desenvolvidos quatro unidades desse protótipo. A Figura 19 apresenta a estrutura de um módulo Semi flexível.

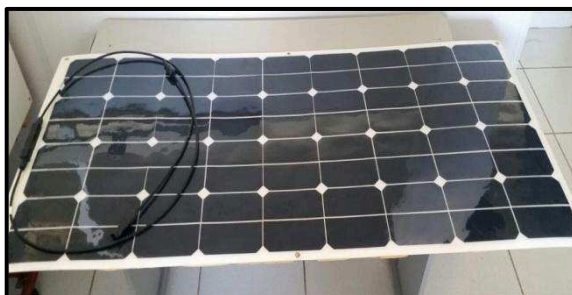


Figura 19 – Módulo semi flexível antes da aplicação ao revestimento cerâmico (Fonte: do Autor).

Para o desenvolvimento dos outros protótipos, foi adicionado primeiramente fita de estanho (1,8mm) nas células poli e monocristalinas, usando fio de estanho. Em seguida, foi realizada a conexão em série das células fotovoltaicas, conforme apresentado na Figura 20.

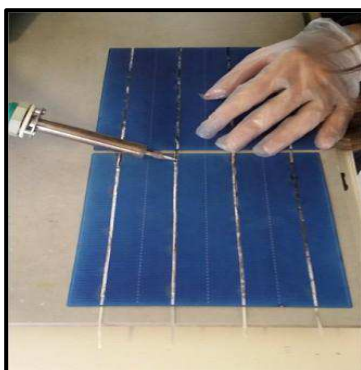


Figura 20 - Ligação em série das células m-Si e p-Si (Fonte: do autor).

O revestimento cerâmico possui uma área de 0,6962 m² podendo fornecer um espaço para anexar uma *string* de células, contendo 21 células em cada *string*. As células foram conectadas uma na outra pelo terminal positivo (cátodo) ao terminal negativo (ânodo), obtendo-se a tensão e corrente total conforme a Equação 3.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3)$$

Após a conclusão da *string* de células, as mesmas foram anexadas ao revestimento cerâmico, como pode ser observado na Figura 21.

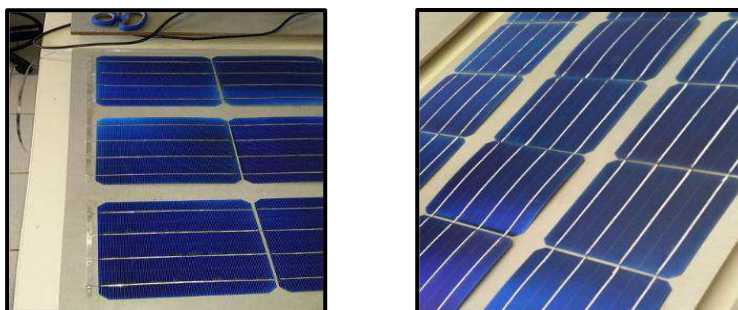


Figura 21 - Células fotovoltaicas conectadas, formando 3 strings de 7 células (Fonte: do autor).

Os protótipos desenvolvidos com diferentes métodos de materiais encapsulantes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Estruturas dos protótipos dos módulos fotovoltaicos.

Protótipos	Estrutura do módulo	Tipo de célula
Prot 1	Semi flexível	Monocristalina
Prot 2	Vidro/EVA	Monocristalina
Prot 3	Vidro/Silicone	Policristalina
Prot 4	Resina PU/Catalisador/EVA	Monocristalina

Fonte: do autor.

Antes do desenvolvimento dos protótipos, foi anexado um sensor de temperatura termistor NTC 10k em cada módulo, para fazer futuras medições de temperaturas das células e do módulo. A Figura 22 apresenta o sensor sendo anexado.



Figura 22 – Sensor de temperatura anexado embaixo da célula (Fonte: do autor).

O Prot 2 apresenta a combinação EVA + vidro, que é o método padrão de fabricação dos módulos fotovoltaicos convencionais. A elaboração do protótipo se deu através de um método adaptado, sem os ciclos de vácuo, fazendo com que permanecessem bolhas de ar entre a camada de EVA e vidro. O aquecimento do EVA para aderência na cerâmica e nas células de silício monocristalino foi realizado com um aquecedor térmico. Após conseguir a aderência foi anexado o vidro, conforme mostrado na Figura 23.

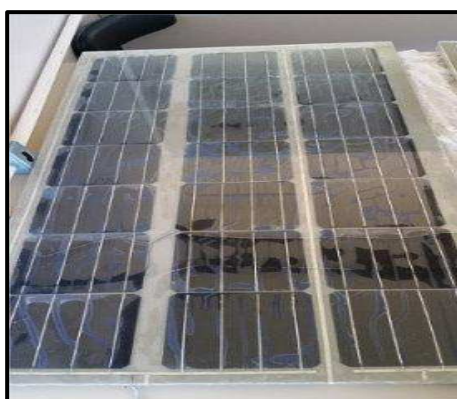


Figura 23 – Protótipo do módulo fotovoltaico Prot 2 (fonte: do autor).

O Prot 3 foi desenvolvido usando a integração do silicone a uma peça de vidro, garantindo a resistência mecânica do revestimento. Foi anexado o silicone, a *string* das células policristalinas e o vidro no revestimento cerâmico, formando assim, o material encapsulante. Esse protótipo foi o que apresentou melhores características. O vidro permaneceu inalterado e não apresentou formação de bolhas, podendo, assim, garantir a proteção de infiltrações, conforme apresentado na Figura 24.



Figura 24 – Protótipo do módulo fotovoltaico Prot 3 (fonte: do autor).

A elaboração do Prot 4 foi realizada com uma mistura de Resina Pu e catalisador. Após ser efetuado a mistura e se tornado homogênea foi aplicado no revestimento cerâmico. Após anexar as strings das células monocristalinas, a mistura foi adicionada posteriormente em cima das células. Foi esperado aproximadamente uma semana para a secagem do material encapsulante. O que pode ser observado nesse período é que uma parte da área do módulo começou a formar bolhas de ar, conforme apresentado na Figura 25. A instalação do módulo na fachada ventilada foi efetuada mesmo com essas observações.



Figura 25 – Protótipo do módulo fotovoltaico Prot 4 (fonte: do autor).

3.4 Instalação dos protótipos na fachada ventilada

A disposição dos revestimentos cerâmicos na fachada ventilada é um ponto importante a ser estudado, pois diferentes localizações podem resultar em variações nos parâmetros de cada revestimento. Fatores como geração de energia elétrica, rendimento, quantidade de luz incidente, temperatura,

quantidade de luz refletida, sombreamento dentre outros podem sofrer interferência direta do posicionamento do revestimento na fachada. Foram realizadas combinações de disposição dos protótipos, sendo representados visualmente para permitir o estudo e a escolha da disposição dos revestimentos cerâmicos fotovoltaicos na fachada ventilada. Os protótipos foram anexados a uma estrutura metálica de alumínio, fixada com parafusos auto brocante, como pode ser visto na Figura 26. Esse tipo de estrutura metálica para anexar esses revestimentos cerâmicos foi patenteada pela empresa Cerâmica Eliane.

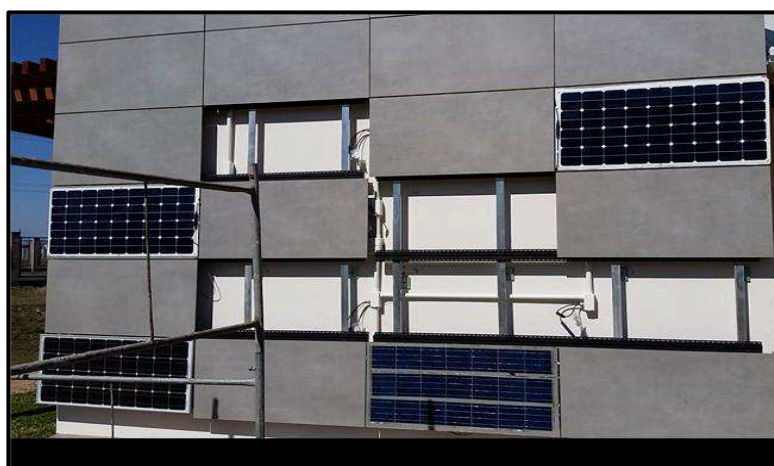


Figura 26 - Instalação dos protótipos dos módulos fotovoltaicos (fonte: do Autor).

Os módulos desenvolvidos no laboratório com tecnologias diferentes junto com um módulo convencional foram anexados na fachada ventilada. A quantidade de módulos instalada está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidade de módulos instalados.

Módulos	Quantidades
Prot 1	4
Prot 2	1
Prot 3	1
Prot 4	1
Convencional	1

Fonte: do autor.

A Figura 27 apresenta a integração dos protótipos de diferentes configurações na fachada ventilada.



Figura 27 - Configurações dos módulos instalados.

Os módulos foram inseridos com diferentes configurações como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3. Configurações dos módulos na fachada ventilada.

Módulo	Configuração
Prot 1	4, 5, 6, 7
Prot 2	3
Prot 3	1
Prot 4	8
Convencional	2

Fonte: do autor.

A irradiação solar incidente em uma área superficial depende do ângulo de inclinação e do ângulo de azimute da superfície. Estes ângulos devem ser otimizados para garantir o máximo recurso solar disponível e, conseqüentemente, a máxima geração de energia elétrica a partir do sistema fotovoltaico. Entretanto, por motivos diversos, em algumas situações não é possível otimizar estes ângulos e, portanto, um estudo sobre a variação do recurso solar em função dos ângulos de inclinação e azimute se faz necessário. A Figura 28 apresenta para a cidade de Araranguá – SC, a irradiação solar média diária anual em função do ângulo de azimute e do

ângulo de inclinação. A irradiação solar média diária anual otimizada é de $4,75 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$. Os dados foram obtidos a partir do software Radiasol, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

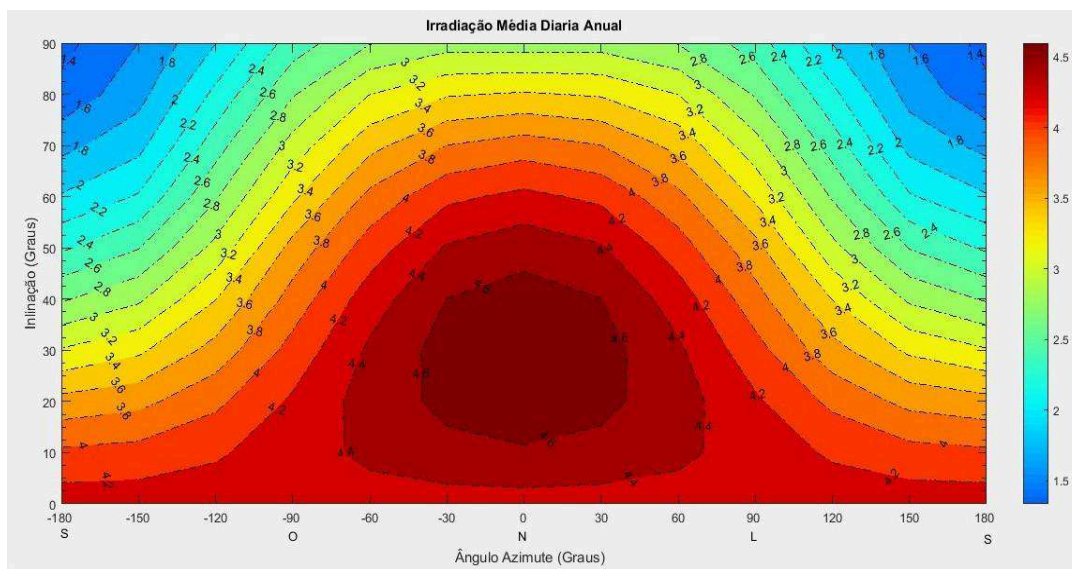


Figura 28 - Irradiação média anual para a cidade de Araranguá – SC (RADIASOL).

A orientação (azimute) tem por resultado diferentes níveis de irradiação solar, pode-se perceber que para azimute entre -60° e 60° com a inclinação de pequenos ângulos (próximo da horizontal), concentram-se a maior disponibilidade dos níveis de irradiação (cores em vermelho). Já para inclinações próximas de 90° e azimute de 0° encontra-se menores valores do aproveitamento da irradiação solar disponível.

Os módulos fotovoltaicos anexados na fachada ventilada estão em uma inclinação de 90° posicionados para o norte, perdendo aproximadamente 50 % da irradiação solar média diária anual. Mesmo com essas perdas é vantajosa a instalação dos módulos fotovoltaicos para a geração de energia elétrica na fachada ventilada.

Na estação meteorológica da planta piloto bioclimática, apresentado na Figura 29, há sensores para medição das seguintes variáveis: radiação solar global horizontal, velocidade e direção de vento, pressão atmosférica, umidade relativa, temperatura ambiente, precipitação, entre outras. Todas as medições provenientes dos sensores são armazenadas automaticamente em um

datalogger. Posteriormente estas informações são enviadas a um servidor e armazenadas em um banco de dados (RAMPINELLI *et al*, 2016).



Figura 29 – Estação meteorológica UFSC/Araranguá (RAMPINELLI *et al*, 2016).

A planta piloto bioclimática também tem instalados outros medidores de radiação solar apresentados na Figura 30, um piranômetro e duas células de referência que medem a radiação solar global no plano horizontal, no plano inclinado (30 graus) e no plano vertical (RAMPINELLI *et al*, 2016).



Figura 30 – Medidores de radiação solar (RAMPINELLI *et al*, 2016).

Um roteiro de ensaios dos módulos fotovoltaicos foi realizado, observando-se as características de cada protótipo. O primeiro ensaio foi o de exposição à radiação Solar/Tempo. Os protótipos foram expostos às condições meteorológicas e foram avaliados por inspeção visual. Este ensaio teve como objetivo verificar possíveis alterações físicas nos protótipos quando os mesmos foram expostos às intempéries por determinado tempo, analisando assim sua resistência às variáveis climáticas e o tempo de durabilidade dos mesmos. Em seguida, foi realizado o ensaio preliminar de desempenho elétrico dos módulos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção contém resultados referentes aos protótipos de módulos fotovoltaicos integrados em revestimentos cerâmicos, obtidos para aplicação na fachada ventilada do projeto da planta piloto. Alguns dos resultados gerados nesse trabalho foram previamente apresentados em Rosso *et al.*(2016).

4.1 Exposição à radiação solar

Este teste consiste em expor o protótipo desenvolvido à radiação solar (banho de sol). Foi realizada uma avaliação de inspeção visual dos protótipos obtidos. Estes protótipos foram anexados a fachada ventilada da planta piloto sendo submetidos à exposição ao sol, chuva e intemperes. Após um mês de instalação dos protótipos, foram obtidos os resultados que estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Avaliação de inspeção visual.

Protótipos	Avaliação Inspeção visual
Prot 1	Aprovado
Prot 2	Aprovado
Prot 3	Aprovado
Prot 4	Reprovado

Fonte: do autor.

Os protótipos Prot 1, Prot 2 e Prot 3, permaneceram inalterados após um mês de exposição, apresentados na Figura 31.

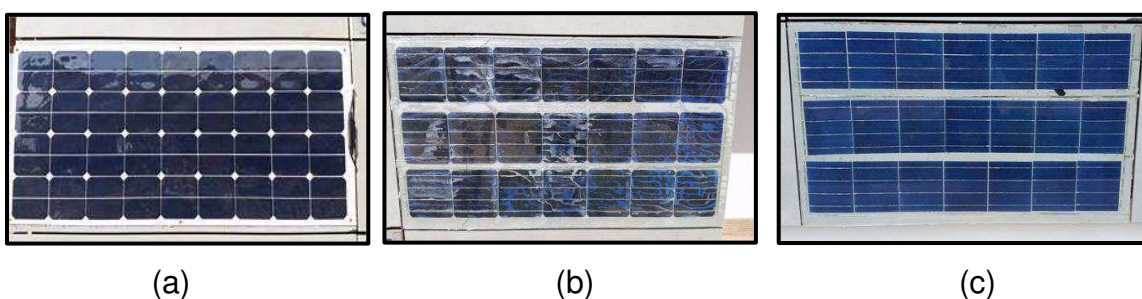


Figura 31 – Protótipos fotovoltaicos após um mês de exposição, (a) Prot 1, (b) Prot 2, (c) Prot 3
(Fonte: do autor).

O protótipo Prot 4, após um mês de exposição, apresentou a formação de bolhas no módulo. Algumas destas bolhas chegaram a estourar, deixando as células fotovoltaicas expostas à intempéries, conforme apresentado na Figura 32. Este módulo fotovoltaico foi reprovado pelo teste de inspeção visual, sendo descartado da obtenção das curvas I-V.

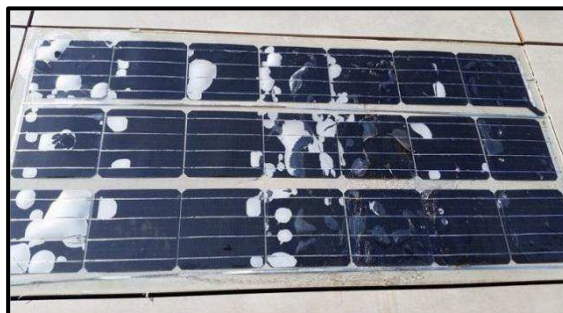


Figura 32 – Protótipo Prot 4 anexado na fachada após um período de um mês (Fonte: do autor).

4.2 Testes iniciais de desempenho elétrico

Outro teste preliminar realizado para avaliação de desempenho dos protótipos foi à medição da corrente elétrica de curto circuito (I_{sc}), que é a máxima corrente que se pode obter diretamente da célula/módulo fotovoltaico com a tensão elétrica em seus terminais igual a zero, em diferentes irradiâncias. Essas medidas foram feitas com um amperímetro curto-circuitando os terminais dos módulos.

A corrente elétrica das células/módulos fotovoltaicos é diretamente proporcional à irradiância solar. Neste teste foram realizadas medições de corrente de curto circuito em uma faixa de irradiância, medida no plano vertical da fachada ventilada, de 200 a 680 W/m^2 para cada protótipo e no módulo convencional. A irradiância foi medida através da célula de referência do plano vertical da planta piloto. A corrente de curto circuito e a irradiância apresentam uma correlação linear. A Figura 33 apresenta a correlação de um único protótipo, entre a corrente elétrica de curto circuito (I_{sc}) e a irradiância (G) do Prot 1. O coeficiente de determinação estatístico apresenta um valor de $R^2 = 0,9917$. A variação da corrente elétrica (I_{sc}) pode ser explicada pela variação da irradiância (G) com uma correlação de 99,17 %. A corrente elétrica também é dependente de outras variáveis como temperatura, velocidade de vento, sombreamento e entre outros fatores.

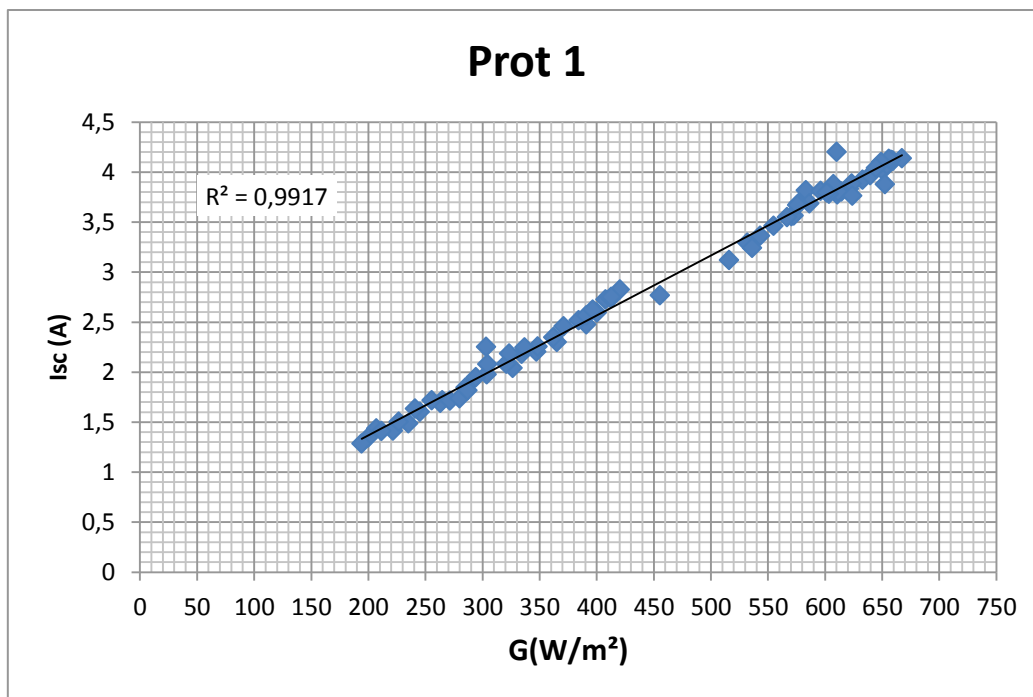


Figura 33 - Corrente elétrica de curto circuito por irradiância vertical do Prot 1, (Fonte: do autor).

Foram também realizadas as medições de corrente de curto circuito para o Prot. 2, apresentados na Figura 34. A correlação apresenta um $R^2 = 0,9914$, sendo assim, a corrente elétrica (I_{sc}) é de 99,14 % dependente da irradiância (G), ficando um percentual de 0,86 % para as outras variáveis.

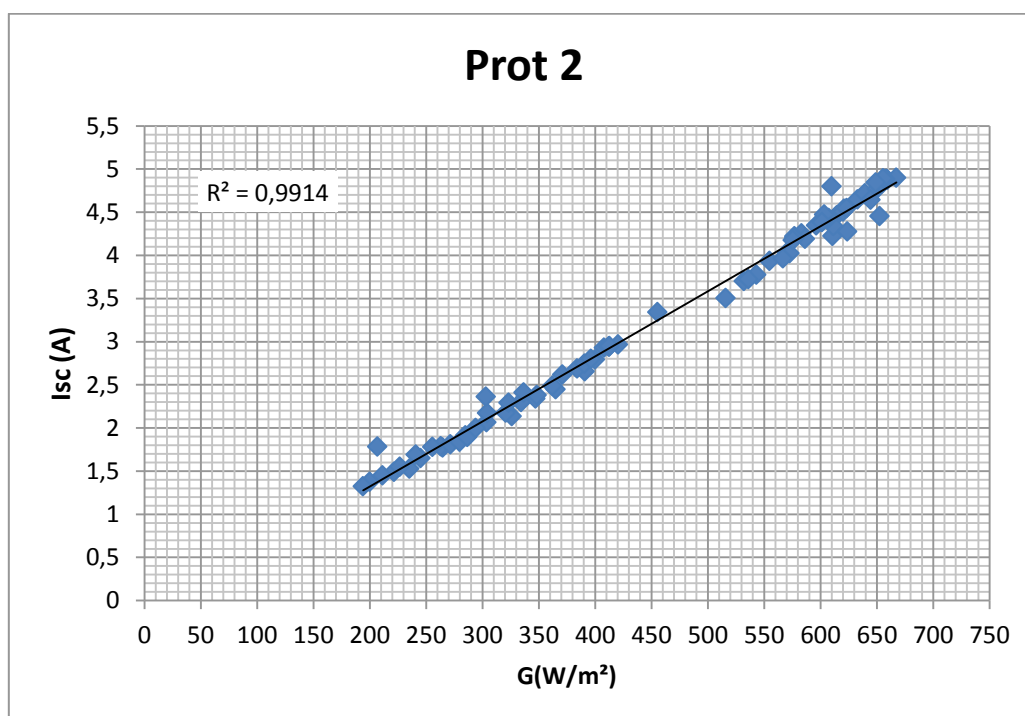


Figura 34 - Corrente elétrica de curto circuito por irradiância vertical do Prot 2, (Fonte: do autor).

Para o Prot 3 apresentado na Figura 35, o valor obtido de R^2 foi inferior comparado com os Prot 1 e Prot 2, sendo $R^2 = 0,9887$. Para o Prot 3 a corrente elétrica (I_{sc}) é 98,87 % dependente da irradiação (G), e 1,13 % é dependente das outras variáveis. A Figura 36 apresenta a correlação para o Prot 4.

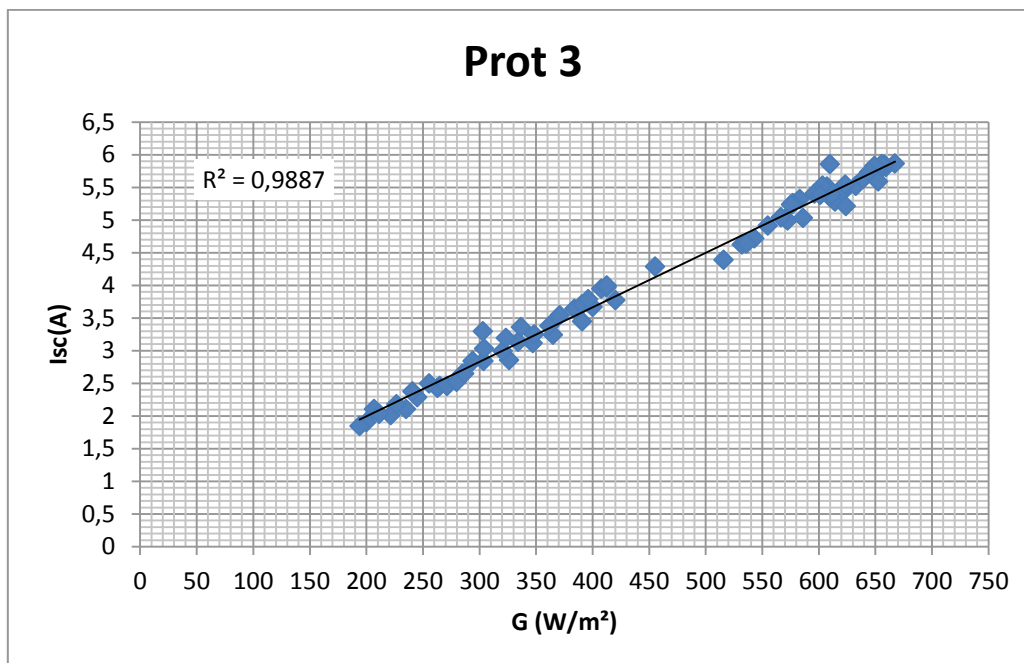


Figura 35 - Corrente elétrica de curto circuito por irradiação vertical do Prot 3, (Fonte: do autor).

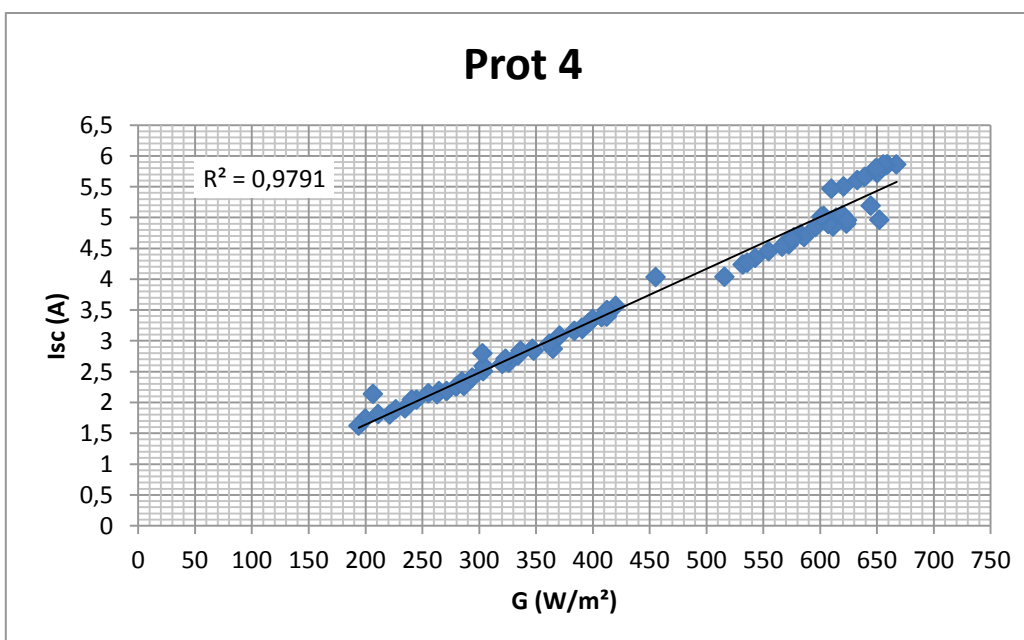


Figura 36 - Corrente elétrica de curto circuito por irradiação vertical do Prot 4, (Fonte: do autor).

Apesar do Prot 4 apresentado na Figura 36, ter sido reprovado pela inspeção visual, foram realizadas as medições de corrente elétrica de curto circuito para esse módulo, obtendo um $R^2 = 0,9791$. Verifica-se a mesma correlação linear entre a corrente de curto circuito e irradiância. A corrente elétrica deste protótipo tem 97,91 % de dependência da irradiância vertical aplicada no módulo, obtendo um percentual de 2,09 % de dependência pelas outras variáveis.

Por ultimo foi avaliado o módulo convencional apresentado na Figura 37, obtendo um $R^2 = 0,989$, o que nos mostra que a corrente elétrica é 98,9 % dependente da irradiação vertical aplicada ao módulo, tendo 1,1 % de dependência das outras variáveis.

Os protótipos e o módulo convencional estão em estado de funcionamento, apesar de alguns demonstrarem diferentes valores de R^2 em relação ao outro, conforme seria esperado. Percebe-se que todos possuem correlação linear entre a irradiância e a corrente elétrica de curto circuito. Nota-se também que, com o aumento da irradiância, acontece um aumento linearmente da corrente elétrica.

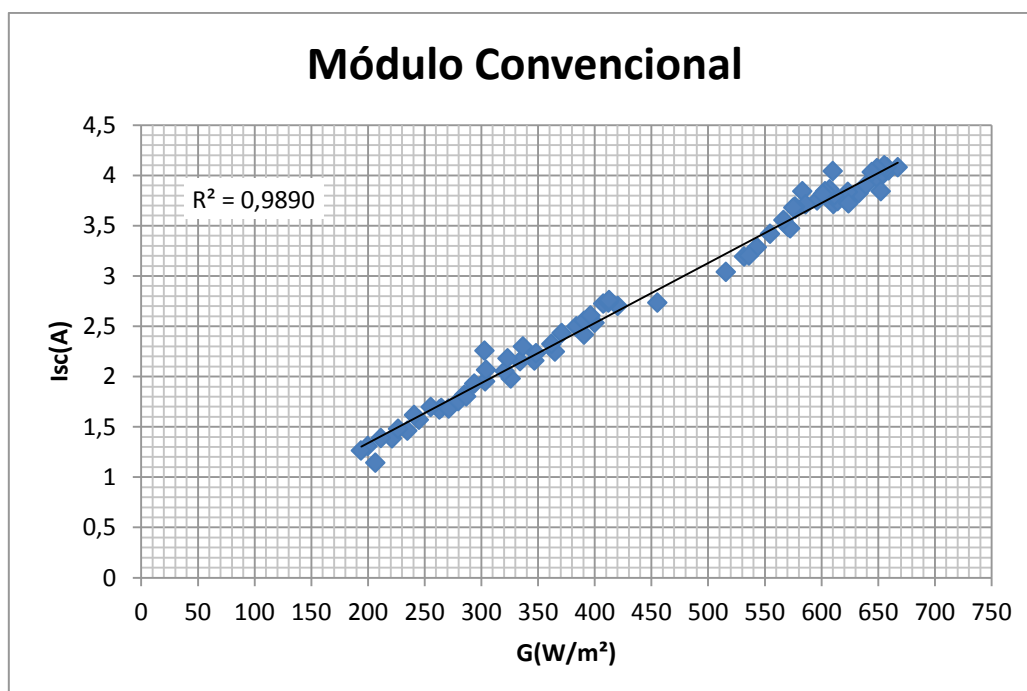


Figura 37 - Corrente elétrica de curto circuito por irradiância vertical do módulo convencional, (Fonte: do autor).

Outras medições serão propostas para trabalhos futuros, como a obtenção da curva característica dos módulos fotovoltaicos I-V. Ao longo de um determinado período, é possível verificar a degradação dos protótipos pelo traçado da curva I-V, sendo que os módulos fotovoltaicos começam a perder potência devido à degradação ao longo do tempo. Outros ensaios para caracterização e avaliação de desempenho que serão realizados futuramente estão descritos no roteiro de ensaios apresentado no anexo A do presente trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tecnologia de energia solar fotovoltaica apresenta maturidade tecnológica e confiabilidade de desempenho. Além disso, a geração distribuída com sistemas fotovoltaicos atualmente têm viabilidade econômica e competitividade em um cenário favorável e promissor para sua difusão e popularização no mercado brasileiro.

Este trabalho apresentou a descrição do processo de desenvolvimento de protótipos de módulos fotovoltaicos integrados em revestimento cerâmico. Para a construção dos protótipos, foram testados e utilizados diversos materiais para encapsulamento das células fotovoltaicas. Os protótipos foram integrados em uma fachada ventilada que está instalada em uma planta piloto bioclimática na cidade de Araranguá – SC, no campus da Universidade Federal de Santa Catarina.

A fachada ventilada atua como elemento arquitetônico e de conforto térmico, apresentando também a capacidade de geração de energia elétrica a partir dos protótipos desenvolvidos e apresentados neste trabalho. Testes iniciais de exposição à radiação solar e de desempenho elétrico foram realizados, sendo que outros testes serão aplicados aos protótipos na sequência das atividades.

6 REFERÊNCIAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Geração distribuída**. 2016. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introduc-1/656827?inheritRedirect=false. Acesso em: 30 ago. 2016.

BÜHLER, J. A.; KRENZINGER, A.; ROMERO, C. F.; **Análise da variação da eficiência de módulos fotovoltaicos de diferentes tecnologias em função da temperatura e irradiância**. III Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.

BÜHLER, Alexandre José. **Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos**. 2011. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CAMPOS, F. K.; **Desenvolvimento de Sistema de Fixação de Fachada Ventilada com Porcelanato de Fina Espessura**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, 2011.

CARVALHO, R.; BUIATTI, G.; JUNIOR, F.; CAMACHO, J.; **Análise comparativa da produtividade real de sistemas de microgeração fotovoltaica no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** . Belo Horizonte: Cbens, 2016. P. 1-8.

CHIVELET, Nuria Martín; SOLLA, Ignacio Fernández. **La envolvente fotovoltaica em la arquitectura: Criterios de diseño y aplicaciones**. Barcelona: Reverté, 2007. 183 p. (Estudios universitarios de Arquitectura).

COELLO, J.; 2011. **Degradation of Crystalline Silicon Modules: A case Study on 785 Samples After Two Years Under Operation**, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg.

DINIZ, C. A.; COSTA, S. S.; BATISTA, F. R.; NETO, M. B. L.; SOUZA, M. M.; SOUZA, F. F.; PADRÃO, C. W.; MICHEL, C. F.; TOLEDO, M. O.; FILHO, O. D.; **Estudo da implantação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica com armazenamento.** V Congresso Brasileiro de Energia Solar – Recife, 31 a 03 de abril de 2014.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2016:** Ano base 2015: Relatório final: EPE, 2016.

ESPÍNDOLA, G.; RAMPINELLI, G. A. **Simulação Energética de uma planta piloto com elementos de arquitetura bioclimática e geração distribuída com sistemas fotovoltaicos.** Araranguá: Trabalho de conclusão de curso, 2016.

GALDINO, A. M; SILVA, C. P. **Subsídios para identificação visual de problemas em células e módulos fotovoltaicos.** Revista Brasileira de Energia Solar Volume V Número 2 Dezembro de 2014 p. 159-170.

GASPARIN, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos.** Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2009.

GORTER, T.; REINDERS, A.h.m.e.. A comparison of 15 polymers for application in photovoltaic modules in PV-powered boats. **Applied Energy**, [s.l.], v. 92, p.286-297, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.042>.

<http://www.portalsolar.com.br/passa-a-passa-da-fabricacao-do-painel-solar.html>. Acesso em 01/10/2016.

MACÊDO, Wilson Negrão. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** 2006. 201 f.

Tese (Doutorado) - Programa Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MOURA, C.; SHIMURA, S.; SIMPLÍCIO, R.; ALONSO, R.; ZUFFO, M.; **Impacto no desempenho de sistema fotovoltaico integrado a diferentes formas arquitetônicas de estacionamento.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** . Belo Horizonte: Cbens, 2016. P. 1-8.

OLIVEIRA, S. F. **Desenvolvimento de Traçador de Curvas I-V Portátil para Arranjos Fotovoltaicos.** Porto Alegre: Dissertação de Mestrado, 2015.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antônio (Brasil) (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, 2014.

RADIASOL2. Disponível em: <<http://www.solar.ufrgs.br/#softwares>>. Acesso em: 27 de novembro, 2016.

RAMPINELLI, Giuliano Arns. **Análise da distribuição de tensões elétricas em uma associação de módulos de um sistema fotovoltaico conectado à rede.** 2007. 254 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

RAMPINELLI, G. A.; SILVA, M. P.; MARCELINO, R. **Instalação e monitoramento de uma estação meteorológica de superfície automática em uma planta piloto bioclimática.** In: XXIII Simpósio Peruano de Energia Solar e Ambiente, Huancayo – Peru, 2016.

ROSSO, A. P.; RAMPINELLI, G. A.; MARCELINO, R.; GRUBER, V. **Desenvolvimento de protótipos de módulos fotovoltaicos integrados em revestimento cerâmico para aplicação em fachadas ventiladas.** In: XXIII Simpósio Peruano de Energia Solar e Ambiente, Huancayo – Peru, 2016.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**, 2004. 113 p. (Editora UFSC).

RÜTHER, Ricardo *et al.* **Geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas: compromissos entre forma e função**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 4., 2012, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Cbens, 2012. p. 1 - 8.

RÜTHER, R.; NASPOLINI, H.; PINTO, G. **Impactos sobre a demanda e contribuição energética da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (CBENS), 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** . Belo Horizonte: Cbens, 2016. P. 1-8.

SIQUEIRA JÚNIOR, Amaury Antunes de. **A Qualidade na execução de projetos de fachadas ventiladas**. 2003. Pesquisa – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: http://amaurysiqueira.pcc.usp.br/Pesquisas/versao_atual.htm. Acesso em 15/09/2016.

WIESENFARTH, M.; GAMISCH, S.; DORSAM, T.; BETT, A.; **Challenges for thermal management and production technologies in concentrating photovoltaic (CPV) modules**. Electronics system-integration conference, 2014. P. 1-4.

ZANESCO, I.; GARCIA, B. S.; MOEHLECKE, A.; VALDIVIA, B. H.; LIMA, W. N.; **Análise da degradação de módulos fotovoltaicos fabricados com diferentes células solares**. Revista Brasileira de Energia Solar, Volume V, Número 2, Dezembro de 2014 p. 101-108.

7. ANEXO A

Roteiro de ensaios:

1. Ensaio Mecânico

Atividade: Submeter o protótipo a choques mecânicos. A intensidade dos choques deve ser controlada.

Avaliação: Inspeção visual. Verificar rompimento do protótipo.

Objetivo: Verificar a resistência do protótipo à choques mecânicos.

2. Ensaio Térmico

Atividade: Submeter o protótipo a temperaturas severas em uma estufa. A temperatura e tempo devem ser controlados. Os protótipos serão expostos por um tempo de 24 h a cada temperatura crescente: 24h a 40, 24 a 50, 24 a 60, 24 a 70. Em cada intervalo serão realizadas fotografias para verificar possíveis alterações.

Avaliação: Inspeção visual. Verificar mudanças físicas no protótipo.

Objetivo: Verificar a resistência térmica do protótipo às condições extremas de temperatura.

3. Ensaio de Permeabilidade

Atividade: Submeter o protótipo a temperaturas severas em uma estufa e alternar com imersão em água. A temperatura e tempo devem ser controlados.

Avaliação: Inspeção visual. Verificar mudanças penetração de água no protótipo.

Objetivo: Verificar a permeabilidade do protótipo.

4. Ensaio de Termografia

Atividade: Registrar imagens termográficas do protótipo.

Avaliação: Inspeção das imagens termográficas do protótipo.

Objetivo: Identificar gradientes de temperatura e pontos quentes.

5. Ensaio de Eletroluminescência

Atividade: Registrar imagens de eletroluminescência do protótipo.

Avaliação: Inspeção das imagens de eletroluminescência do protótipo.

Objetivo: Identificar microfissuras de conexão de células no protótipo.