

FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM MINIMÓDULO FOTOVOLTAICO MONOFACIAL COM CÉLULA DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

Harison Franca dos Santos* – harison.franca@gmail.com

Clarissa Guimarães e Miranda*

Rodrigo Moreno Garcia*

Murilo Sanchez de Oliveira*

Eduardo José Mendes*

Gabriel Monteiro Fernandes*

Evair Oliveira Lima*

Carlos Victor do Rego Brandão*

Murilo Bonetto*

* BYD Energy do Brasil, Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento

Resumo. Este trabalho baseou-se no desenvolvimento e caracterização de um minimódulo monofacial com uma célula de silício monocristalino. Para isso, foram utilizados os seguintes itens: vidro temperado com baixo teor de ferro e camada antirreflexiva, etileno vinil acetato (EVA) como encapsulante – frontal e traseiro, célula monofacial de silício monocristalino, dimensões de 158,75x158,75 mm, com potência nominal de pico de 5,54 W para condições padrão de teste (STC) 1000 W/m², 25 °C e espectro AM 1,5, barramento de cobre estanhado e backsheet de KPF. A temperatura de laminação foi de 150 °C a uma pressão de 65 kPa com um tempo total de laminação de 851 segundos. O minimódulo produzido apresentou pequenas bolhas, possivelmente ocasionadas pelo longo tempo de estabilização térmica do painel no processo de laminação, potência máxima de 5,12 W nas STC, indicando um fator de potência cell-to-module (CTM) de 92,4%. O baixo CTM do equipamento produzido possivelmente foi ocasionado em função das perdas ópticas causadas pela absorção e reflexão da luz nas bolhas.

Palavras-chave: Energia Solar, Módulo Fotovoltaico, Célula Fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

Módulos fotovoltaicos, ou também painéis fotovoltaicos, são dispositivos capazes de realizar a conversão direta da luz em energia elétrica através do efeito fotovoltaico (Silva e Carmo, 2017). No geral, estes equipamentos possuem construção baseada nos seguintes componentes: moldura de alumínio, vidro, encapsulantes, células fotovoltaicas, *backsheet* e caixa de junção (Ramos, 2006). Cada item possui um objetivo específico dentro dos módulos, todavia, o principal elemento associado a estes dispositivos são as células. Elas possuem o objetivo de converter diretamente a luz, geralmente proveniente do Sol, em energia elétrica na forma de corrente contínua, CC (Nascimento, 2010). O fenômeno associado a esta conversão é denominado efeito fotovoltaico e foi inicialmente descoberto pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839 (Valêrra e Brito, 2006).

Apesar de serem difundidos para aplicações residenciais somente nas últimas décadas, os módulos fotovoltaicos são dispositivos relativamente antigos que possuem processo de montagem e fabricação bem definidos e conhecidos na indústria. As primeiras versões destes equipamentos foram produzidas visando aplicações aeroespaciais em satélites na década de 60 – em virtude da indisponibilidade de demais recursos energéticos no espaço e a abundância de radiação solar direta (Valêrra e Brito, 2006).

Para aplicações comerciais, a fabricação de módulos fotovoltaicos geralmente é desenvolvida com diversas células interconectadas, em comparação com uma única célula de pequena área (Singh *et al.*, 2015). Todavia, em casos experimentais, torna-se inviável realizar a confecção de grandes módulos com diversas células devido ao custo associado aos equipamentos de produção, bem como a aquisição de matéria prima – geralmente importada. Neste contexto, baseia-se o objetivo deste trabalho que visa confeccionar um minimódulo fotovoltaico monofacial com célula de silício monocristalino, a fim de demonstrar o processo de produção, bem como a caracterização do equipamento.

2. METODOLOGIA Materiais utilizados

Para a fabricação do minimódulo foram utilizados os seguintes materiais:

- Vidro temperado com película antirreflexiva e baixo conteúdo de ferro (116 ppm) com dimensões de 300x300x3,2 mm fornecido pela empresa *Dongguan CSG Solar Glass*;
- Encapsulantes de etileno vinil acetato (EVA) fornecidos pela empresa *Sveck* com gramatura de 430 g/m² para o lado frontal e 410 g/m² para o lado traseiro;

- Célula fotovoltaica monofacial de silício monocristalino com dimensões de 158,75x158,75 mm ($\pm 0,25$), fornecida pela empresa *Aikosolar* com dados nominais de potência máxima de pico de (Pmpp) 5,54 W, corrente de curto-circuito (Isc) de 10,078 A, tensão de circuito aberto (Voc) de 0,6739 V e eficiência de 22,0% nas condições padrão de teste (STC), de 1000 W/m², 25 °C e espectro AM 1,5;
- Barramento de cobre estanhado (Sn60Pb40) com dimensões de 6x0,4 mm fornecido pela empresa *ShangHai SunbySoar Technology*;
- Folha traseira (*backsheet*) KPF com isolamento de 1500 V fornecido pela empresa *Cybrid Technologies*;
- Fluxo de solda X33-08i fornecido pela empresa *Henkel*;
- (*Ribbon*) Fita de cobre estanhado 0,2x1 mm fornecido pela empresa *Wuxi Sveck*.

Caracterização dos materiais

A caracterização da transmitância e embaçamento do vidro e dos encapsulantes foi realizada utilizando um *Haze Meter* fornecido pela empresa *SKZ Industrial* modelo SKZ120C. A Tab. 1 apresenta os resultados de transmitância e embaçamento dos materiais. Vale ressaltar que os valores se referem aos materiais antes da laminação.

Tabela 1: Dados da caracterização dos materiais.

MATERIAL	TRANSMITÂNCIA (%)	EMBAÇAMENTO (%)
Vidro	94,48	20,05
Encapsulante frontal	85,68	88,50
Encapsulante traseiro	75,48	88,46

Fabricação do minimódulo

Os primeiros passos para a fabricação do minimódulo envolveram os cortes dos encapsulantes e do *backsheet*, todos com auxílio de um estilete convencional. Nesse contexto, no caso dos encapsulantes, foram cortadas tiras quadráticas de 300x300 mm, e, para o lado traseiro, foram feitos 2 cortes retangulares de 7x2 mm para a saída dos barramentos até os terminais. A Fig. 1 apresenta os detalhes dos cortes dos encapsulantes.



Figura 1: Corte dos encapsulantes.

Em seguida, realizou-se o corte do *backsheet*, também em tira quadrática, mas com dimensões de 310x310 mm. Além disso, assim como no corte dos encapsulantes, realizou o corte para a saída dos barramentos. Adiante, realizou-se o corte dos barramentos em L com o auxílio de um alicate convencional. O comprimento utilizado foi de 250 mm. Assim, realizou-se a soldagem entre os barramentos L e a célula. O distanciamento entre os barramentos e a célula foi de 6 mm. Nesse processo, utilizou-se posto de solda convencional produzido pela empresa *Quick*, modelo ESD 205. A temperatura utilizada na soldagem foi de 380 °C. A Fig. 2 apresenta os detalhes do final do processo de soldagem.

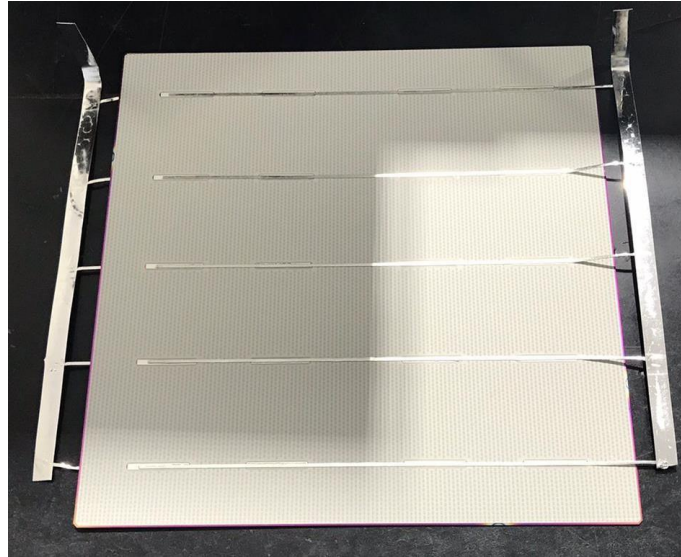


Figura 2: Barramentos soldados à célula.

É válido ressaltar que a soldagem entre os *busbars* e a célula foi realizada em uma *stringer* modelo MS100B produzida pela empresa *Wuxi Autowell Technology*. A temperatura de solda utilizada foi de 240 °C (± 10), enquanto a temperatura da base foi de 150 °C (± 10). A Fig. 3 apresenta o resultado do processo de soldagem supracitado.

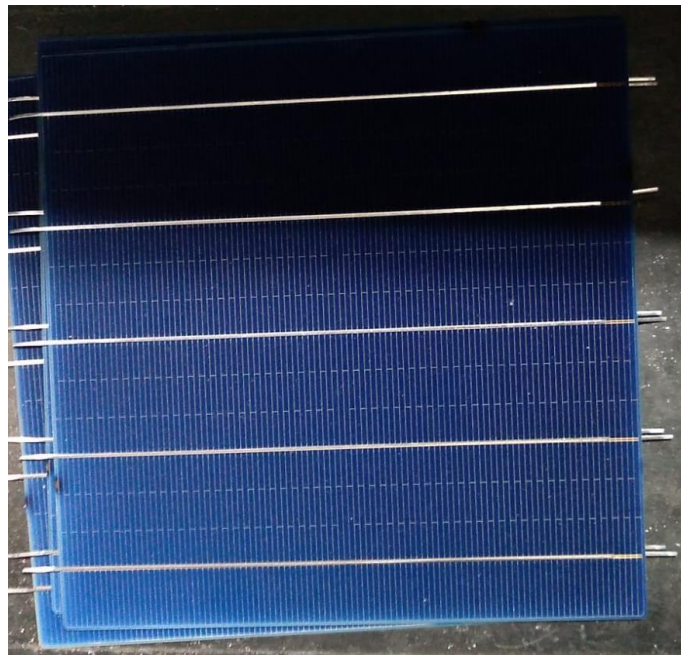


Figura 3: *Busbars* soldados à célula.

Prosseguindo com a fabricação do minimódulo, a etapa seguinte baseou-se no posicionamento do conjunto vidro-encapsulante-célula-encapsulante-*backsheet*, que foi prosseguido pela etapa de laminação. A Fig. 3 apresenta o detalhe do posicionamento antes da colocação do *backsheet*.

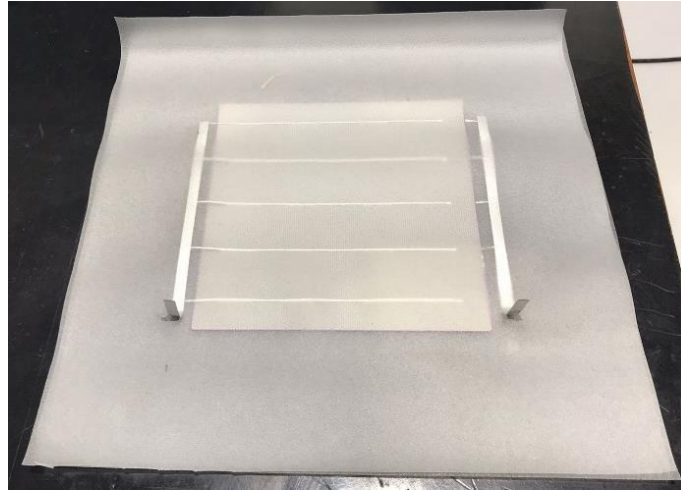


Figura 4: Posicionamento do conjunto vidro-encapsulante-célula-encapsulante.

Para a laminação utilizou-se uma laminadora semiautomática modelo ZST-AYB-11-22 produzida pela empresa *Qinhuangdao Zenithsolar Technological*. Cabe lembrar que neste processo, visando minimizar o vazamento de encapsulante na região da saída dos barramentos no *backsheet*, utilizou-se duas tiras de fita de alta temperatura. Ainda sobre a laminação, a temperatura utilizada no processo foi de 150 °C, enquanto a pressão foi de 65 kPa. A Tab. 2 apresenta em detalhes a duração das etapas de todo o processo de laminação.

Tabela 2: Duração das etapas de laminação.

Etapas	Tempo (s)
Estabilização térmica	60
Pressurização a vácuo	240
Laminação	470
Despressurização	21
Inflação	60

Por fim, é válido ressaltar que as rebarbas de *backsheet* foram cortadas após a laminação, assim, a dimensão total do minimódulo foi de 300x300 mm, ou seja, a área total do equipamento foi de 0,09 m².

Caracterização do minimódulo

Para a caracterização elétrica, o ensaio foi realizado utilizando um simulador solar *Pasan modelo HighLight A+A+A+* produzido pela empresa Meyer Burger com célula de referência calibrada pelo instituto Fraunhofer (200678).

3. RESULTADOS

A Fig. 5 apresenta o resultado do processo de fabricação do minimódulo fotovoltaico logo após a laminação. Assim, é possível observar claramente a área útil do equipamento a partir da face frontal – representada pela célula. Além disso, é possível notar a simetria na distribuição do distanciamento entre os barramentos e a célula.

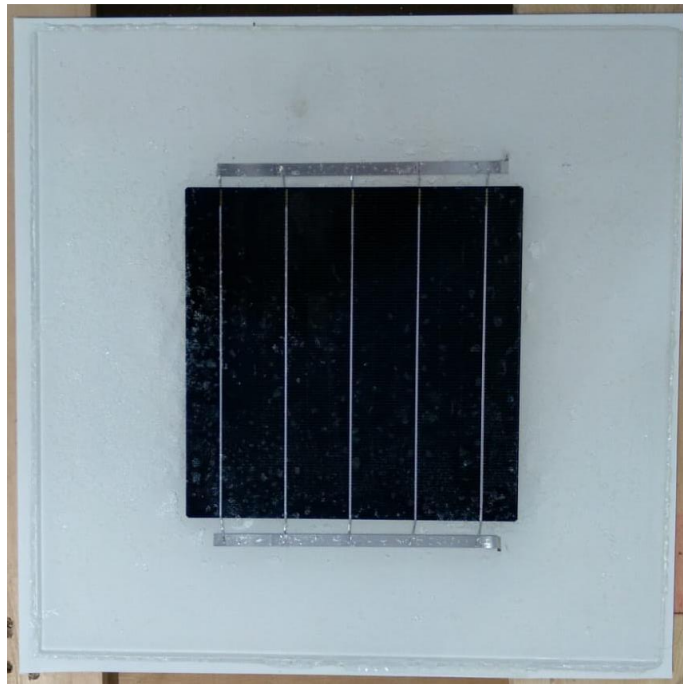


Figura 5: Detalhes visuais do minimódulo logo após a laminação.

Ainda através da Fig. 5, é possível observar diversas bolhas com tamanhos variados em toda extensão do minimódulo. Estas bolhas foram causadas possivelmente pelo tempo de permanência do conjunto dentro da laminadora na etapa de estabilização térmica. Isso acontece em função da transformação do EVA do estado sólido para líquido ainda com a presença de ar na atmosfera da região interna da laminadora (Lange *et al.*, 2011). Outro ponto importante observado refere-se as regiões das bordas do minimódulo com excesso dos encapsulantes, bem como a adesão entre os componentes, ou seja, não houve indicativos de pontos de delaminação nessas regiões logo após a etapa de laminação. Ainda sobre os aspectos visuais, a Fig. 6 apresenta o minimódulo logo após o corte dos excessos de encapsulantes e *backsheet* – com auxílio de um estilete.

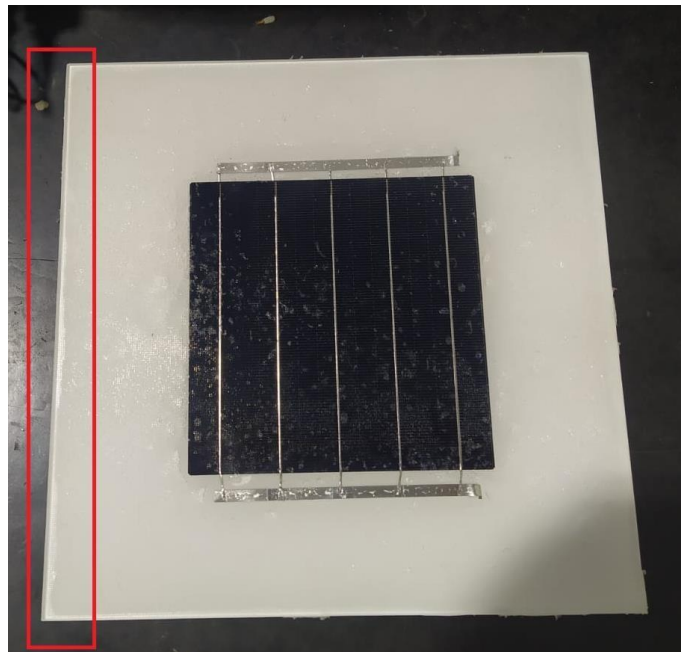


Figura 6: Detalhes visuais do minimódulo após o corte das rebarbas de encapsulantes e *backsheet*.

Assim, através da Fig. 6 é possível observar pontos de delaminação nas laterais do minimódulo causados pela ação das forças durante o corte das “rebarbas” assim como indicado no destaque em vermelho. Nesse contexto, é possível

concluir que a pressão durante a laminação devesse ser maior (Krauter *et al.*, 2019). Ainda sobre os aspectos visuais, a Fig. 7 apresenta a imagem de eletroluminescência do minimódulo.



Figura 7: Imagem de eletroluminescência do minimódulo.

Através da Fig. 7 é possível observar a homogeneidade da luz em toda a faixa da célula, indicando que não houve falhas nos processos de soldagem. Além disso, nota-se também a existência de duas trincas transversais na região do canto direito inferior da célula.

Com relação aos aspectos elétricos, a Fig. 8 apresenta a curva característica IV, bem como a curva de máxima potência do minimódulo nas condições padrão de teste, STC, isto é, 1000 W/m², 25 °C e espectro AM 1,5.

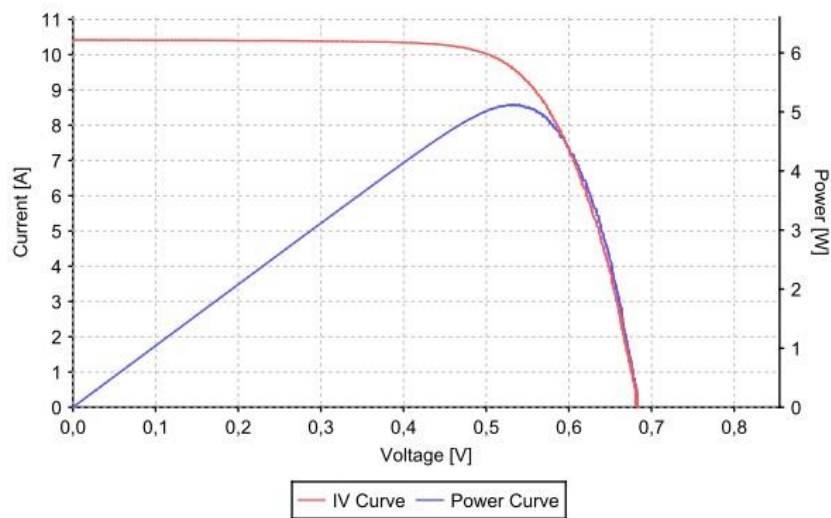


Figura 8: Curva Característica IV e curva de máxima potência do minimódulo nas STC.

Complementando os resultados da Fig. 8, a Tab. 3 apresenta os valores absolutos da caracterização elétrica do minimódulo. Através dela é possível observar resultados como a potência máxima (Pmp), corrente de máxima potência (Imp), tensão de máxima potência (Vmp) etc.

Tabela 3: Especificações elétricas do minimódulo para condições de irradiância 1.000 W/m², temperatura de célula 25 °C e espectro AM 1,5.

Parâmetros	Valor
------------	-------

Potência máxima (Pmp)	5,12 W
Corrente de curto-circuito (Isc)	10,42 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	0,68 V
Corrente de máxima potência (Imp)	9,60 A
Tensão de máxima potência (Vmp)	0,53 V
Resistência série (Rs)	0,0076 Ω
Eficiência do módulo	5,68%

Nota-se que a potência máxima do minimódulo foi menor que a potência da célula fornecida pelo fabricante – indicando um fator de potência *cell-to-module* (CTM) de 92,4%. O valor inferior de Pmp, 5,12 W, em comparação com a potência nominal apresentada pelo fabricante da célula, 5,54 W, pode estar associado às perdas ópticas no minimódulo em função das diversas bolhas no equipamento que aumentam a reflexão da luz, além da perda de transmitância pelo mau acoplamento dos materiais fazendo com que parte da luz escape, isto é, não seja absorvida pela célula (Muñoz-García *et al.*, 2011). Além disso, outro detalhe importante que pode ter contribuído com a perda de potência está associado as duas trincas transversais na célula, que dificultam o transporte de elétrons entre os *fingers* e os *busbars*, além de reduzir a área de conversão de energia pelo efeito fotovoltaico, bem como reduzir a resistência *shunt* do equipamento – aumentando as perdas por correntes parasitas. Por fim, os demais valores de Isc e Voc estão de acordo com as especificações do fabricante enquanto a baixa eficiência do minimódulo está associada a grande área fora da cobertura da célula fotovoltaica.

4. CONCLUSÃO

O processo de fabricação do minimódulo fotovoltaico apresentado neste trabalho mostrou-se robusto tendo em vista os aspectos visuais e elétricos do equipamento produzido. No entanto, existe um amplo espaço para otimização em virtude dos pequenos defeitos visuais e perda de potência. A formação das bolhas no minimódulo possivelmente ocorreu em função do tempo de estabilização térmica do equipamento durante a etapa de laminação. Isto acontece devido a presença de ar durante o início da transformação do encapsulante do estado sólido para estado líquido. Além disso, a delaminação nas laterais do equipamento após o corte das rebarbas é um forte indicativo de que a pressão de laminação foi insuficiente para aumentar a resistência mecânica entre a junção vidro-encapsulante-célula-encapsulante *backsheet*. O baixo CTM do equipamento produzido, 92,4% - em comparação com os módulos fotovoltaicos convencionais de 60 e 72 células, pode estar associado as perdas ópticas em função das diversas bolhas presentes no minimódulo, ou ainda falhas no processo de laminação que reduzem a transmitância do conjunto vidro-encapsulante.

Agradecimentos

Reitera-se neste espaço o agradecimento especial à empresa BYD Energy do Brasil por ceder suas instalações e toda a infraestrutura do Laboratório de Energia Solar, Sustentabilidade e Semicondutores. Além disso, reitera-se também o agradecimento ao time de Pesquisa e Desenvolvimento da empresa.

REFERÊNCIAS

- Krauter, S.; Péridon, R.; Lippke, B.; Hanusch, M.; Grunow, P., 2019. PV module lamination durability. 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference, vol. 2, pp. 1697–1705.
- Lange, R. F. M.; Luo, Y.; Polo, R.; Zahnd, J., 2011. The lamination of (multi) crystalline and thin film based photovoltaic modules. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 19, n. 2, pp. 127–133.
- Muñoz-García, M.; Vela, N.; Chenlo, F.; Alonso-Garcia, M., 2011. Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions Solar Energy.
- Nascimento, C. A., 2010. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. Structural Engineer, vol. 88, n. 15, pp. 25–29.
- Ramos, C. D. M., 2006. Procedimentos para Caracterização e Qualificação de Módulos Fotovoltaicos. Universidade federal do rio grande do sul, vol. 1, n. 1, pp. 141-147.
- Silva, R. G.; Carmo, M. J., 2017. Energia solar fotovoltaica: uma proposta para melhoria da gestão energética. International Scientific Journal, vol. 12, pp. 129–147.
- Singh, J. P.; Guo, S.; Peters, I. M.; Aberle, A. G.; Walsh, T. M., 2015. Comparison of Glass/Glass and Glass/Backsheet PV Modules Using Bifacial Silicon Solar Cells. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 5, n. 3, pp. 783–791.
- Valêrra, A. M.; Brito, M. C. 2006. Meio século de história fotovoltaica. Gazeta de física, vol. 1, n. 4, pp. 11–17.

MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF A MINI-MODULE MONOFACIAL PHOTOVOLTAIC USING MONOCRYSTALLINE SILICON CELL

Abstract. *This work was based on the development and characterization of a monofacial minimodule with a monocrystalline silicon cell. For this, the following items were used: tempered glass with low iron content and antireflective layer, ethylene vinyl acetate (EVA) as an encapsulant - front and rear, monocrystalline silicon monofacial cell, dimensions of 158.75x158.75 mm, with power rated peak 5.54 W under standard test conditions (STC) 1000 W/m², 25 °C and 1.5 AM spectrum, tinned copper bus and KPF backsheet. The rolling temperature was 150 °C at a pressure of 65 kPa with a total rolling time of 851 seconds. The mini-module produced presented small bubbles, possibly caused by the long thermal stabilization time of the panel in the lamination process, maximum power of 5.12 W in STC conditions, indicating a Cell-To-Module (CTM) of 92.4%. The low CTM of the equipment produced was possibly caused by optical losses caused by the absorption and reflection of light in the bubbles.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic Module, Photovoltaic Cell.*