



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**DESENVOLVIMENTO DE PLANTA PILOTO DE PRODUÇÃO DE CÉLULAS SOLARES E MÓDULOS
FOTOVOLTAICOS COM TECNOLOGIA NACIONAL**

Izete Zanesco*
PUCRS

Adriano Moehlecke
PUCRS

Jovani A. de Souza
ELETROSUL

Rodrigo G. Araújo
PETROBRAS

José F. P. Braga, Rubens A. Selinke
GRUPO CEEE

RESUMO

A produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos é atrativa no Brasil, devido a elevada incidência de energia solar. No entanto, no Brasil não há indústrias de células solares e módulos fotovoltaicos ativos. Para incentivar tecnologias nacionais foi desenvolvida uma planta piloto para fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da produção em escala piloto dos dispositivos fotovoltaicos. Foram desenvolvidos processos industriais de células solares com eficiência de 15,4 % e fabricadas e caracterizadas 12.000 células solares e produzidos 200 módulos fotovoltaicos com eficiência de até 12,7 %.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Solar, Células Solares, Módulos Fotovoltaicos, Planta Piloto, Processos Industriais

1.0 - INTRODUÇÃO

Investimentos em novas tecnologias para produção de energia elétrica estão sendo realizados devido a crescente demanda de energia, a preocupação com a preservação do meio ambiente, a necessidade de sistemas sustentáveis e de diversificação da matriz energética. Considerando estes aspectos e que o Brasil é um país com elevada incidência de energia solar em todo o território, o uso de sistemas fotovoltaicos em edificações, em forma de minirredes e centrais fotovoltaicas torna-se atrativo. Neste contexto, a produção de energia elétrica a partir da conversão direta da energia solar, denominada de energia solar fotovoltaica, ganha destaque por ser simples e rápida de instalar, ser modular, não contaminar o meio ambiente, ter uma fonte de energia inesgotável e gratuita, ser silenciosa e necessitar de pouquíssima manutenção. Os dispositivos que convertem a energia solar em elétrica são as células solares, que associadas eletricamente e encapsuladas formam um módulo fotovoltaico. Este dispositivo deve possuir resistência mecânica e durabilidade maior que 25 anos.

Em nível mundial, esta tecnologia de conversão de energia está avançada e em pleno crescimento, principalmente nos países desenvolvidos. Em 2008 a produção mundial foi de 7910 MW em módulos fotovoltaicos, com um crescimento de 85 % em relação a 2007 [1]. No entanto, em 2009 devido a crise econômica mundial o crescimento do mercado foi de 56 %, com produção de 12 GW [2]. Este valor é similar a potência da central hidrelétrica de Itaipu. O mercado é dominado por módulos com células solares fabricadas em lâminas de silício cristalino. Aproximadamente 81 % dos módulos fotovoltaicos comercializados no mundo são fabricados com este tipo de célula solar [3].

O Brasil é um país com uma pequena parte da população sem acesso à energia elétrica, geralmente localizada em locais afastados, segundo o Ministério de Minas e Energia. A dimensão continental e os baixos valores de demanda energética em locais isolados tornam o uso de sistemas fotovoltaicos em residências ou em forma de minirredes atrativo tanto do ponto de vista econômico quanto tecnológico [3], [4]. Outro aspecto importante é a diversificação da matriz energética brasileira associada ao aumento da demanda de energia elétrica. Considerando que a matriz de energia elétrica brasileira é dominada por centrais hidrelétricas, a produção de energia por meio de sistemas fotovoltaicos é naturalmente complementar. Nos períodos de chuva os reservatórios das centrais hidrelétricas estão com capacidade para atender a demanda e nos períodos de seca há muita radiação solar incidindo na superfície do território brasileiro. De forma similar, durante o dia há produção de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos e os reservatórios podem acumular água para produzir energia elétrica durante a noite.

A disseminação do uso de sistemas fotovoltaicos no Brasil está limitada por problemas de custo e de ausência de uma produção nacional competitiva internacionalmente. Além disso, os produtos importados são comercializados com preços acima do mercado internacional. Neste contexto, para incentivar tecnologias nacionais de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos [5], em 2004, o Ministério da Ciência e Tecnologia, articulou com a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (CEEE-GT) e Eletrosul Centrais Elétricas S.A. (ELETROSUL) um projeto para transferir a tecnologia de fabricação de células solares desenvolvida pela equipe do Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) para uma linha pré-industrial, a fim de verificar a viabilidade técnica e econômica da produção em larga escala. O objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da produção em escala piloto de células solares em silício e módulos fotovoltaicos com tecnologia nacional. O projeto foi inovador em três aspectos: 1) tecnologia: o desenvolvimento científico e tecnológico de células solares de silício com insumos de baixo custo e obtenção de dispositivos eficientes por meio de mecanismos de *gettering* foi patenteado pela PUCRS [6]; 2) ambiente: processos industriais foram desenvolvidos dentro do ambiente acadêmico, especificamente no parque tecnológico da PUCRS (TECNOPUC) e 3) gerenciamento: universidade e empresas gerenciaram o projeto por meio de um comitê gestor.

2.0 - INFRAESTRUTURA PARA O DESENVOLVIMENTO DA PLANTA PILOTO

A infraestrutura dos laboratórios do NT-Solar foi complementada a fim de implantar a planta piloto para produção de células solares e módulos fotovoltaicos com tecnologia nacional. É constituída de 16 laboratórios, conforme ilustra a Figura 1, com uma área total de 950 m². O maior laboratório é o relativo à fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos, com um total de 210 m² de salas limpas classe 10.000.



Figura 1 – Equipamentos e laboratórios utilizados para o desenvolvimento da planta piloto de produção de células solares e módulos fotovoltaicos.

O Laboratório de Células Solares está dividido nos seguintes laboratórios: Difusão, Química, Fotolitografia, Filmes e Metais, Corte, Soldagem e Laminação e mais uma circulação. Os outros laboratórios são: Montagem, Módulos, Simulação, Óptica, Caracterização, Certificação, Classificação e Medidas Internas e Externas. Este é o primeiro laboratório especialmente projetado para o desenvolvimento de células solares e módulos fotovoltaicos no Brasil. Os equipamentos são industriais e automatizados, para reproduzir a produção em larga escala bem como o desenvolvimento de P&D&I. Na Figura 2 apresenta-se um detalhe da entrada de lâminas de silício no forno de difusão e das amostras na evaporadora de metais. As linhas de atuação da equipe do NT-Solar estão focadas no desenvolvimento de células solares em lâminas de silício e módulos fotovoltaicos convencionais e concentradores e instalação e análise de sistemas fotovoltaicos.

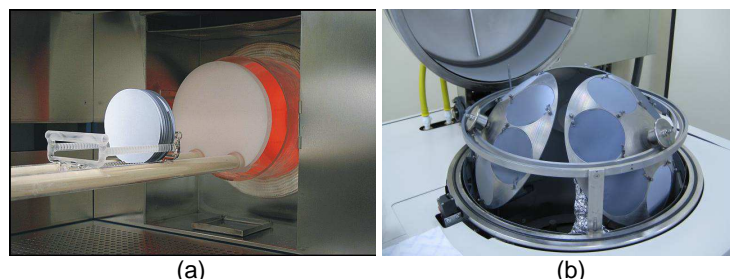


Figura 2 – (a) Lâminas de Si entrando no forno de difusão de fósforo e (b) detalhe do suporte para as lâminas de Si na câmara de processamento da evaporadora.

3.0 - IMPLEMENTAÇÃO DA LINHA DE FABRICAÇÃO PILOTO

3.1 Desenvolvimento dos Processos de Fabricação de Células Solares

Foram desenvolvidos dois processos industriais de fabricação de células solares para produção em escala piloto. O processo desenvolvido para células solares com campo retrodifusor de Al foi denominado de “alta eficiência” e o processo que resulta em dispositivos sem campo retrodifusor foi denominado de “baixo custo”. Na Figura 3 compara-se a estrutura das células solares desenvolvidas, típicas da indústria. As etapas dos processos de fabricação de células solares são resumidas na Tabela 1. Observa-se que o processo de alta eficiência é constituído de mais etapas e, consequentemente, o custo de produção é maior.

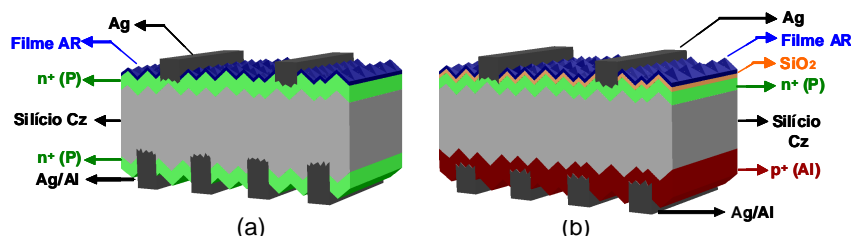


Figura 3 – Estrutura de células (a) sem e (b) com campo retrodifusor de Al.

Tabela 1 – Principais etapas da fabricação de células solares com o processo de “baixo custo” e com o processo de “alta eficiência” (com campo retrodifusor de Al).

Processo de Baixo Custo	Processo de Alta Eficiência
Ataque químico anisotrópico	Ataque químico anisotrópico
Limpeza química	Limpeza química
	Oxidação
Difusão de fósforo	Ataque do óxido e difusão de fósforo
	Deposição e difusão de alumínio
Evaporação do filme AR	Evaporação do filme AR
Metalização por serigrafia	Metalização por serigrafia
Isolamento das bordas	Isolamento das bordas

O ataque químico anisotrópico na superfície das lâminas de silício monocristalino é a etapa inicial para o processo de fabricação de células solares. O objetivo é formar micropirâmides para reduzir a refletância. Após o corte das lâminas, a refletância é da ordem de 33 %. Com a otimização deste processo de obtenção de textura para conjuntos de 18 amostras, foi obtida a refletância média entre 400 nm e 1050 nm de $(12,0 \pm 0,1) \%$. Na Figura 4 mostra-se a superfície das lâminas de silício após o processo de textura, obtida com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura.

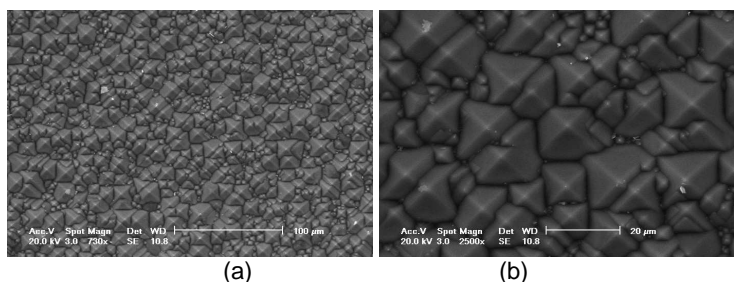


Figura 4 – Superfície de lâminas de silício monocristalino após a texturação com ampliação de (a) 730 vezes e de (b) 2500 vezes.

Para realizar os processos de difusão para formação das regiões altamente dopadas, foi implementada uma análise de limpeza química superficial, visando a eficácia do processo e a redução dos custos de produção. As lâminas foram colocadas em suportes específicos para 18 amostras e mergulhadas nas soluções químicas. Estes suportes foram especialmente desenvolvidos para o mínimo volume da solução e máximo número de lâminas.

A difusão de fósforo para formar o emissor foi implementada a partir do dopante POCl_3 e foi otimizada experimentalmente para células solares com e sem campo retrorrefletor, também denominado de BSF (*back surface field*) de Al. Para a análise foram fabricadas células solares e medidas as características elétricas. Foram implementados vários processos para otimizar o fluxo de gases durante a difusão de fósforo no tubo de quartzo para 54 e 100 amostras. Para o processo de “alta eficiência” também foi otimizada a difusão de alumínio para formar o campo retrorrefletor, que tem por objetivo reduzir a recombinação dos portadores minoritários na região posterior da célula solar. Outro parâmetro avaliado foi a passivação das superfícies da lâmina de Si após a formação das regiões dopadas.

A etapa seguinte foi a implementação e otimização experimental da formação do filme antirreflexo para reduzir a refletância, pois este parâmetro afeta diretamente a corrente de curto-circuito das células solares. Esta análise foi implementada em duas etapas. A primeira etapa foi focada na avaliação da influência da variação da espessura do filme antirreflexo (AR) de TiO_2 na refletância das lâminas de Si texturadas, após a queima das pastas metálicas. Observou-se que a refletância aumenta ligeiramente após a queima devido à alteração da espessura e do índice de refração do filme AR. Na segunda etapa foi otimizada a espessura do filme AR para lâminas de Si com e sem passivação de óxido de silício.

Uma etapa importante para obtenção de células solares de qualidade é a metalização por serigrafia. Este é o processo utilizado pelas indústrias atuais para formação da malha de metalização. A metalização por serigrafia caracteriza-se pela deposição de uma pasta que contém um material condutor sobre o substrato e, então, é secada e queimada em ambiente controlado em forno de esteira para produzir a malha metálica. Inicialmente foi otimizada por simulação a malha de metalização para a região frontal com emissor n^+ e para a região de BSF p^+ . A malha de metalização consiste de duas barras coletoras e trilhas de 100 μm de largura. A metalização foi realizada após a evaporação do filme antirreflexo com o mesmo processo para células de “baixo custo” e de “alta eficiência”. Utilizaram-se as pastas de prata PV156 e de alumínio PV202, ambas produzidas pela DuPont, para a face frontal e posterior das lâminas, respectivamente. Após a metalização, realizou-se o isolamento entre a região frontal e posterior com um equipamento laser. Os processos de fabricação das células solares foram desenvolvidos e otimizados visando a obtenção de dispositivos de alta eficiência e redução do custo do processo.

3.2 Fabricação, Classificação e Caracterização de Células Solares

Após a otimização dos processos foram fabricadas 5.714 com o processo de “baixo custo” e 6.969 dispositivos com o processo de “alta eficiência”, totalizando a fabricação de 12.683 células solares pseudoquadradas de 80 mm x 80 mm, de 61,59 cm^2 de área, em escala piloto. Na Figura 5 mostra-se uma das células produzidas. As células foram fabricadas em lâminas de silício crescido pela técnica Czochralski, tipo p, dopadas com boro, resistividade de base entre 7 $\Omega\cdot\text{cm}$ e 13 $\Omega\cdot\text{cm}$ e com 310 μm de espessura. As células foram caracterizadas por meio da medição da curva I-V (corrente em função da tensão elétrica aplicada) sob iluminação de 1000 W/m^2 , espectro AM1,5G e temperatura da célula de 25 $^\circ\text{C}$, em simulador solar, conforme as normas internacionais de medição. Foram utilizadas como padrão células solares fabricadas com os dois processos desenvolvidos e calibradas no Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar (*Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme*), na Alemanha.

Com o processo de “baixo custo”, a maior eficiência alcançada foi de 13,4 %, obtida da característica elétrica I-V mostrada na Figura 6. Nesta figura também se apresenta o resultado de uma das células solares medida no Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar, com eficiência de 13 %.

Na Figura 7 mostram-se as características elétricas da célula solar com a maior eficiência e daquela medida no Instituto Fraunhofer, fabricadas em escala piloto com o processo de “alta eficiência”. A maior eficiência foi de

16,1%, maior que o dispositivo medido na Alemanha. Comparando os resultados das melhores células solares obtidas com os dois processos desenvolvidos, nota-se que o fator de forma (FF) é similar para ambos os processos com valor elevado e da ordem de 0,78. A principal diferença ocorre na tensão de circuito aberto (Voc) e na densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), devido a formação do campo retrodifusor. A Voc de 553 mV aumenta para 587 mV com a formação do BSF de Al, com um aumento percentual de 6 %. O aumento na Jsc é de 3%. O acréscimo na corrente de curto-circuito é explicado pelo aumento da resposta espectral da célula solar com BSF de Al na região do infravermelho próximo, como mostra a Figura 8. Nota-se também um pequeno aumento da resposta espectral na região do ultravioleta, pois a dopagem de fósforo no processo de alta eficiência é menor e há passivação de superfície com uma camada de óxido de silício.

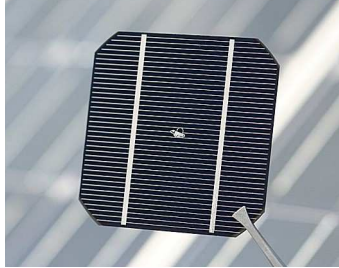


Figure 5 – Célula solar de silício fabricada em escala piloto.

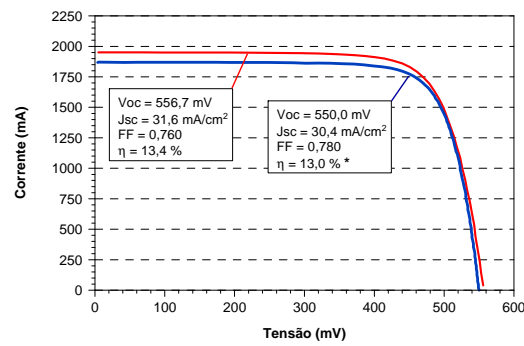


Figura 6 – Características elétricas da célula solar com maior eficiência e da célula solar medida no Instituto Fraunhofer (identificada por um *), fabricadas em escala piloto com o processo de “baixo custo”.

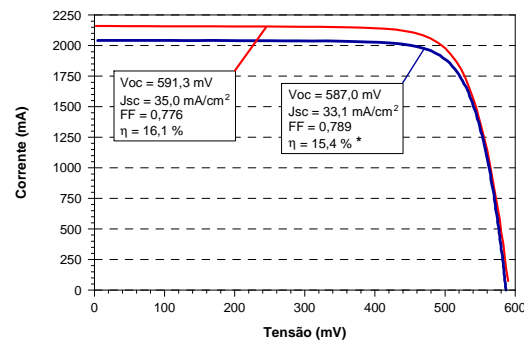


Figura 7 - Características elétricas da célula solar com maior eficiência e da célula solar medida no Instituto Fraunhofer (identificada por *), fabricadas em escala piloto com o processo de alta eficiência.

As células solares foram classificadas em quatro classes segundo a densidade de corrente de curto-circuito e o fator de forma [7]. A classificação pelo primeiro parâmetro é usada porque as células são conectadas em série nos módulos fotovoltaicos. As células classe D apresentam baixo FF e, devido ao valor deste parâmetro, não são adequadas para a fabricação de módulos fotovoltaicos. A Tabela 2 apresenta as classes de células solares. Na Tabela 3 e na Tabela 4 apresentam-se as características elétricas médias das células solares para cada classe, fabricadas com o processo de “baixo custo” e “alta eficiência”, respectivamente. Observa-se que para as categorias A, B e C a eficiência média é de $(12,7 \pm 0,4) \%$ para células de “baixo custo”. A Jsc diminui, porém o FF aumenta ligeiramente, mantendo a mesma eficiência para as três classes. Os resultados da classificação das células de alta eficiência estão na Tabela 4 e verifica-se que a eficiência média é de $(14,9 \pm 0,4) \%$, $(14,7 \pm 0,5) \%$ e $(14,0 \pm 0,6) \%$ para células na categoria A, B e C, respectivamente. Nota-se que na categoria C, todos os parâmetros elétricos decrescem ligeiramente. Novamente, observa-se o efeito da formação do campo retrodifusor de Al nos parâmetros elétricos quando se comparam as células de baixo custo com as de alta eficiência. A Voc aumenta em aproximadamente 25 mV e a Jsc em aproximadamente $1,5 \text{ mA/cm}^2$, com aumento percentual de ambos

parâmetros de entorno de 5 %.

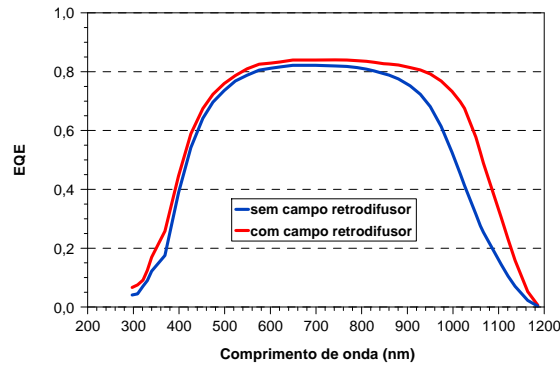


Figura 8 - Eficiência quântica externa em função do comprimento de onda para as células solares com e sem campo retrodifusor de Al.

Tabela 2 - Classificação das células solares fabricadas em escala piloto com os dois processos desenvolvidos segundo a Jsc e FF.

Classe	Processo de Baixo Custo	Processo de Alta Eficiência
A	$FF > 0,7$ e $J_{sc} \geq 31,5 \text{ mA/cm}^2$	$FF > 0,7$ e $J_{sc} \geq 34 \text{ mA/cm}^2$;
B	$FF > 0,7$ e $31 \text{ mA/cm}^2 < J_{sc} < 31,5 \text{ mA/cm}^2$	$FF > 0,7$ e $33,2 \text{ mA/cm}^2 < J_{sc} < 34 \text{ mA/cm}^2$
C	$FF > 0,7$ e $J_{sc} \leq 31 \text{ mA/cm}^2$	$FF > 0,7$ e $J_{sc} \leq 33,2 \text{ mA/cm}^2$;
D	$FF < 0,7$	$FF < 0,7$

Tabela 3 - Valores médios da tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência (η) das células solares fabricadas em escala piloto com o processo de “baixo custo” na classe A, B, C e D.

Classe	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
A	549 ± 6	$31,6 \pm 0,2$	$0,733 \pm 0,020$	$12,7 \pm 0,4$
B	548 ± 6	$31,3 \pm 0,2$	$0,739 \pm 0,018$	$12,7 \pm 0,4$
C	548 ± 5	$30,8 \pm 0,2$	$0,749 \pm 0,018$	$12,7 \pm 0,4$
D	549 ± 3	$31,4 \pm 0,3$	$0,68 \pm 0,03$	$11,7 \pm 0,6$

Tabela 4 - Valores médios da tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência (η) das células fabricadas em escala piloto com o processo de “alta eficiência” na classe A, B, C e D.

Classe	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	η (%)
A	575 ± 6	$33,9 \pm 0,3$	$0,751 \pm 0,013$	$14,9 \pm 0,4$
B	574 ± 8	$33,2 \pm 0,4$	$0,756 \pm 0,017$	$14,7 \pm 0,5$
C	565 ± 8	$32,0 \pm 0,6$	$0,745 \pm 0,024$	$14,0 \pm 0,6$
D	562 ± 5	$31,6 \pm 0,7$	$0,61 \pm 0,04$	$11,2 \pm 0,9$

Das células solares fabricadas com o processo de “baixo custo”, 52,6 % foram classe B e 28,2 % foram classe A. Somando as células solares classe A, B e C, o percentual de dispositivos foi de 89,4 %, conforme mostra a Figura 9-a. Considerando as células solares nestas três classes e que 98,9 % das lâminas não foram danificadas durante o processamento, a eficiência de produção foi de 88,4 %. Da Figura 9-b constata-se que 90,2 % das células solares fabricadas com o processo de “alta eficiência” foram classe A, B e C. Portanto, considerando as células solares nestas três classes e que 95,1 % dos dispositivos chegam ao final do processo sem problemas de perdas, a eficiência de produção deste processo foi de 85,8 %. Este valor é um pouco menor que o valor de 88,4 %, obtido para células solares sem BSF, devido ao aumento das etapas do processo de fabricação.

3.3 Fabricação e Caracterização de Módulos Fotovoltaicos

Para a fabricação dos módulos fotovoltaicos, primeiramente foi implementado um sistema de lavagem dos vidros. Também foram otimizados experimentalmente os processos de soldagem das células solares em tiras e de

encapsulamento. Foi desenvolvido um molde específico para a soldagem entre as tiras das células solares e montagem do módulo com vidro, EVA e filme posterior (copolímero fluorado). Foi desenvolvida uma etiqueta com código de barras com informações das células solares e materiais utilizados na fabricação de cada módulo fotovoltaico. Todos os parâmetros do processo de laminação e cura do EVA foram otimizados experimentalmente. Para completar a fabricação do módulo fotovoltaico foi projetada e implementada a estrutura de alumínio e colocada a caixa de conexão. Na Figura 10 ilustra-se o módulo fotovoltaico desenvolvido, que possui as seguintes dimensões: 774 mm x 358 mm x 35 mm.

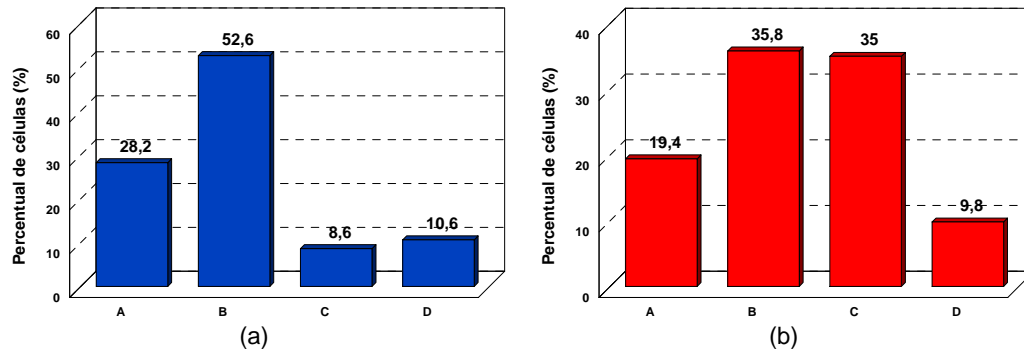


Figura 9 – Distribuição das células solares segundo a classificação baseada na J_{sc} e FF, fabricadas com o processo de (a) “baixo custo” e de (b) “alta eficiência”.



Figure 10 – Módulo fotovoltaico fabricado em escala piloto.

Após a otimização completa do processo de fabricação, foram produzidos 200 módulos fotovoltaicos com células solares com e sem campo retrodifusor de Al. Todos os módulos foram caracterizados eletricamente sob condições padrão (1000 W/m^2 , espectro AM1,5G, 25°C), em simulador solar. Além da medida das características I-V, três testes foram realizados: resistência a torção, resistência a carga mecânica e resistência de isolamento para 1000 V, segundo a norma internacional IEC 61215 [8].

Na Tabela 5 apresentam-se os valores médios da V_{oc} , I_{sc} , FF, eficiência (η_{Mod}), potência máxima (P_{mp}) e tensão (V_{mp}) e corrente elétrica (I_{mp}) no ponto de máxima potência para os módulos fotovoltaicos fabricados com células solares sem e com BSF de Al. Com células solares fabricadas com o processo de “baixo custo” foram produzidos 94 módulos fotovoltaicos. O valor médio da potência foi de $(28,3 \pm 0,9) \text{ W}$ ou $(28,3 \text{ W} \pm 2,5 \%)$. A potência média dos 106 módulos fabricados com células solares de “alta eficiência” foi de $(34,2 \pm 0,9) \text{ W}$, ou seja $(34,2 \text{ W} \pm 2,6 \%)$, conforme pode-se verificar na Tabela 5. Destaca-se que o desvio padrão da potência é baixo, inferior a 3 %, demonstrando a repetibilidade dos processos envolvidos. Para módulos com células solares com BSF a potência é 20 % maior, porém o custo de produção também é maior.

Tabela 5 - Valores da tensão de circuito aberto (V_{oc}), da corrente de curto-circuito (I_{sc}), fator de forma (FF), eficiência (η_{Mod}), potência máxima (P_{mp}) e tensão (V_{mp}) e corrente elétrica (I_{mp}) no ponto de máxima potência para os módulos fotovoltaicos fabricados com células solares sem e com BSF de Al.

Tipo de Célula	V_{oc} (V)	I_{sc} (A)	FF (%)	η_{Mod} (%)	P_{mp} (W)	V_{mp} (V)	I_{mp} (A)
Baixo Custo	$19,7 \pm 0,2$	$1,97 \pm 0,01$	$73,0 \pm 1,5$	$10,0 \pm 0,2$	$28,3 \pm 0,7$	$15,7 \pm 0,3$	$1,80 \pm 0,02$
Alta Eficiência	$20,9 \pm 0,2$	$2,13 \pm 0,04$	$76,8 \pm 0,7$	$12,1 \pm 0,3$	$34,2 \pm 0,9$	$17,1 \pm 0,2$	$2,00 \pm 0,04$

Na Figura 11 comparam-se as curvas I-V dos módulos fotovoltaicos com maior eficiência produzidos com células solares com e sem campo retrodifusor de Al. Verifica-se que a potência dos melhores módulos para cada processo foi de 30,4 W com eficiência de 10,8 % e de 36 W, com eficiência de 12,7 %, respectivamente. A eficiência dos módulos com células com campo retrodifusor de alumínio é aproximadamente 2 % maior.

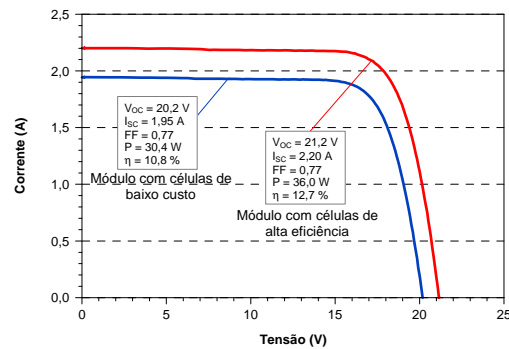


Figura 11 - Curvas I-V de módulos fotovoltaicos fabricados com células de baixo custo e com células de alta eficiência.

4.0 - CONCLUSÕES

Os principais resultados do projeto podem ser resumidos em: 1) desenvolvimento tecnológico em nível industrial de dois processos de fabricação de células solares em silício alcançando a eficiência de 15,4 % e de 13 %, com confirmação externa e um processo para módulos fotovoltaicos; 2) implantação de uma linha completa de fabricação de células e módulos fotovoltaicos; 3) fabricação e caracterização de mais de 12.000 células solares e 200 módulos fotovoltaicos, permitindo a avaliação de produção em escala industrial; 4) base para a elaboração de um plano de negócios para uma indústria de célula solares e módulos fotovoltaicos e 5) divulgação do projeto e da tecnologia na mídia. Com o processo de “baixo custo”, foi alcançada a eficiência média de $(12,7 \pm 0,4) \%$ em células solares de $61,59 \text{ cm}^2$. Para o processo com campo retrodifusor de Al, a eficiência média foi de $(14,4 \pm 0,6) \%$. Com os dois tipos de células solares foram fabricados módulos fotovoltaicos com potência média de $(28,3 \text{ W} \pm 2,5 \%)$ e $(34,2 \text{ W} \pm 2,6 \%)$. Este tipo de projeto foi inédito no Brasil, colocando o País com capacidade tecnológica para fábricas de células solares e módulos fotovoltaicos. Em resumo, foi a primeira vez que uma planta piloto para desenvolvimento de tecnologias fotovoltaicas industriais foi implementada no ambiente acadêmico, combinando pesquisa, desenvolvimento industrial e formação de recursos humanos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) HIRSHMAN, W. P.. Little smiles on long faces. **Photon International**, 2009, pp. 170-206.
- (2) HIRSHMAN, W. P.. Surprise, surprise. Solar cell production for 2009 hits 12 GW, an incredible 56-percent increase over 2008. **Photon International**, 2010, pp.176-199.
- (3) DINIZ, S. A. C., MENDONÇA, M.S.C.C., ALMEIDA, F.Q., COSTA, D., ALVARENGA, C.A.. Current status and prospects of the photovoltaic rural electrification programmes in the state of Minas Gerais, Brazil. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, 6, 1998, pp. 365-377.
- (4) DE GOUVELLO, C.; MAIGNE, Y.. **Eletificação Rural Descentralizada. Uma Oportunidade para a Humanidade, Técnicas para o Planeta** – CRESEB-CEPEL, 2003, Rio de Janeiro. 453p.
- (5) MOEHLECKE, A., ZANESCO, I.. Pilot plant to develop cost-effective photovoltaic modules. **Proceedings of the 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Milão, 2007, pp. 1772-1775.
- (6) MOEHLECKE, A., ZANESCO, I.. Processo de Fabricação de Células Solares. Reg. de Patente nº004262, 2003.
- (7) MOEHLECKE, A., ZANESCO, I.. Pilot production of n^+pn^+ and n^+pp^+ silicon solar cells: efficiency x yield. **Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Valencia, 2010, pp. 2497-2500.
- (8) INTERNATIONAL STANDARD IEC 61215. **Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules – Design Qualification and Type Approval**. 1993. 77p.

6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FINEP, CEEE-GT, ELETROSUL, PETROBRAS e PUCRS por meio do convênio FINEP 0997/04 e a equipe do NT-Solar que fabricou e caracterizou os dispositivos fotovoltaicos.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Izete Zanesco

Local e ano de nascimento: Bento Gonçalves-RS, 1965

Local e ano de graduação/pós-graduação: Porto Alegre-RS, 1987, Licenciatura em Física pela UFRGS; Porto Alegre-RS, 1991, Mestrado em Engenharia na Área de Energia pela UFRGS; Madri-Espanha, 1996, Doutorado em Engenharia pela Universidade Politécnica de Madri – UPM.

Coordena em conjunto com o Dr. Adriano Moehlecke, o Núcleo de Tecnologia em Energia Solar. Zanesco publicou mais de 66 artigos em revistas e congressos internacionais e nacionais na área de energia solar fotovoltaica. Atualmente é professora da Faculdade de Física e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais - PGETEMA, ambos da PUCRS. A Dra. Izete Zanesco é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq e foi coordenadora do PGETEMA e vice-presidente para Ciência e Tecnologia da ISES-Brasil (International Solar Energy Society).

Adriano Moehlecke

Local e ano de nascimento: São Leopoldo-RS, 1965

Local e ano de graduação/pós-graduação: Porto Alegre-RS, 1987, Licenciatura em Física pela UFRGS; Porto Alegre-RS, 1991, Mestrado em Engenharia na Área de Energia pela UFRGS; Madri-Espanha, 1996, Doutorado em Engenharia pela Universidade Politécnica de Madri – UPM.

Ele coordena em conjunto com a Dra. Izete Zanesco, o Núcleo de Tecnologia em Energia Solar. Moehlecke publicou mais de 66 artigos em revistas e congressos internacionais e nacionais na área de energia solar fotovoltaica. Atualmente é professor da Faculdade de Física e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais - PGETEMA, ambos da PUCRS. O professor recebeu vários prêmios pelas contribuições ao desenvolvimento de células solares como: Prêmio Extraordinário ao trabalho de doutorado em 1998, Prêmio Jovem Cientista em 2002 e Medalha Negrinho do Pastoreio (governo RS) em 2002.

Jovani Afonso de Souza

Local e ano de nascimento: Urubici-SC, 1956

Local e ano de graduação/pós-graduação: Florianópolis-SC, 1993, Bacharelado em Química pela UFSC; Osaka-Japão, 1993, Pós-Graduação em Polymer Materials and Technology pelo Osaka Municipal Training Institute.

É químico da ELETROSUL Centrais Elétricas S/A. Tem experiência na área de Química, com ênfase em Físico-Química. Foi membro do comitê gestor do projeto “Planta Piloto de Produção de Módulos Fotovoltaicos com Tecnologia Nacional”, convênio FINEP 0997/04.

Rodrigo Guido Araújo

Local e ano de nascimento: Caratinga, Minas Gerais, 1967.

Local e ano de graduação / pós-graduação: Rio de Janeiro-RJ, 1997, Graduação em Engenharia Elétrica, ênfase em Eletrotécnica pela UFRJ; Rio de Janeiro-RJ, 2000, Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ.

É engenheiro de equipamentos da PETROBRAS e trabalha no Centro de Pesquisas e Desenvolvimento. Atua em energia solar fotovoltaica, tendo participado de diversos projetos cobrindo praticamente toda a cadeia de valor dessa tecnologia.

José Francisco Pereira Braga

Local e ano de nascimento: Porto Alegre, 1952

Local e ano de graduação/pós-graduação: Porto Alegre, 1976, Graduação em Engenharia Elétrica pela PUCRS. Foi Presidente do Grupo CEEE, Diretor da CEEE-GT e da CEEE-D, Vice-Presidente da ABRATE e Conselheiro da FIERGS e CIGRÉ. Atua no setor de energia elétrica nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Foi membro do comitê gestor do projeto “Planta Piloto de Produção de Módulos Fotovoltaicos com Tecnologia Nacional”, convênio FINEP 0997/04.

Rubens Alessandro Selinke

Local e ano de nascimento: Florianópolis – SC, 1973

Local e ano de graduação/pós-graduação: Florianópolis-SC, 1999, Engenharia Elétrica na UFSC; Porto Alegre-RS, 2003, Mestrado em Engenharia Elétrica na PUCRS; Porto Alegre-RS, 2009, MBA em Finanças Empresariais FGV.

Engenheiro Eletricista concursado do Grupo CEEE, ocupando atualmente função de Assistente Executivo de Diretor. Membro do Comitê de Energia da Câmara Americana de Comércio - AMCHAM-RS. Já ocupou as funções de Chefe da Divisão de Gestão e Planejamento Estratégico e foi Assistente Executivo do Diretor-Presidente, entre outras funções no Grupo CEEE. Também foi Conselheiro do CREA-RS, Assessor Técnico do Secretário de Minas Energia e Telecomunicações do RS - SEMC e Professor Adjunto da Universidade Luterana do Brasil - ULBRA. Foi membro do comitê gestor do projeto “Planta Piloto de Produção de Módulos Fotovoltaicos com Tecnologia Nacional”, convênio FINEP 0997/04.