

# ANALISES DOS PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS COMERCIAIS

José de Arimatéia Alves Vieira Filho – arimateia.eng@outlook.com

Pedro Ferreira Torres – pedro.ftorres@itec.ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

**Resumo.** Tendo em vista os constantes desenvolvimentos tecnológicos, esse trabalho objetiva atualizar um estudo realizado em 2014. Para tanto, foram extraídos os parâmetros de 185 módulos fotovoltaicos de diferentes fabricantes. São apresentados os seguintes dados: eficiência, tensão de circuito aberto, corrente de curto circuito, fator de preenchimento, e os coeficientes de temperatura. Por fim é apresentando o comparativo entre o mercado em 2014 e 2017.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Módulos fotovoltaicos, Coeficientes de temperatura

## 1. INTRODUÇÃO

Baixo impacto ao meio ambiente, retardo no aquecimento global (inibe a instalação de termoeletricas), baixos custos de manutenção, *payback* atrativo, alta disponibilidade de recurso primário (sol), instalação distribuída na rede elétrica com recurso financeiro dos próprios consumidores, são promessas quase boas demais para ser verdade. De acordo com a *European Photovoltaic Industry Association* (2017), o ano de 2016 teve um crescimento 50% maior do que em 2015 nos sistemas solares, isto é, 76,6 GW foi instalado e conectado à rede, com liderança da China que instalou 34,5 GW. Em 2016 a capacidade instalada global excedeu 300 GW, sendo 48 % relativo à região Ásia-Pacífico, seguida pelos europeus com 34 %. Segundo a mesma fonte, espera-se que ao final de 2017 tenha sido instalado 80 GW, só no Brasil já foram 9.442 sistemas de geração distribuída instalados desde o início do ano, totalizando mais de 107 MW, a maior parte de sistemas fotovoltaicos (ANEEL, 2017). A Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2017) tem expectativas do primeiro gigawatt (GW) do Brasil ser atingido ainda em 2017 e cerca de 7 GW em 2026.

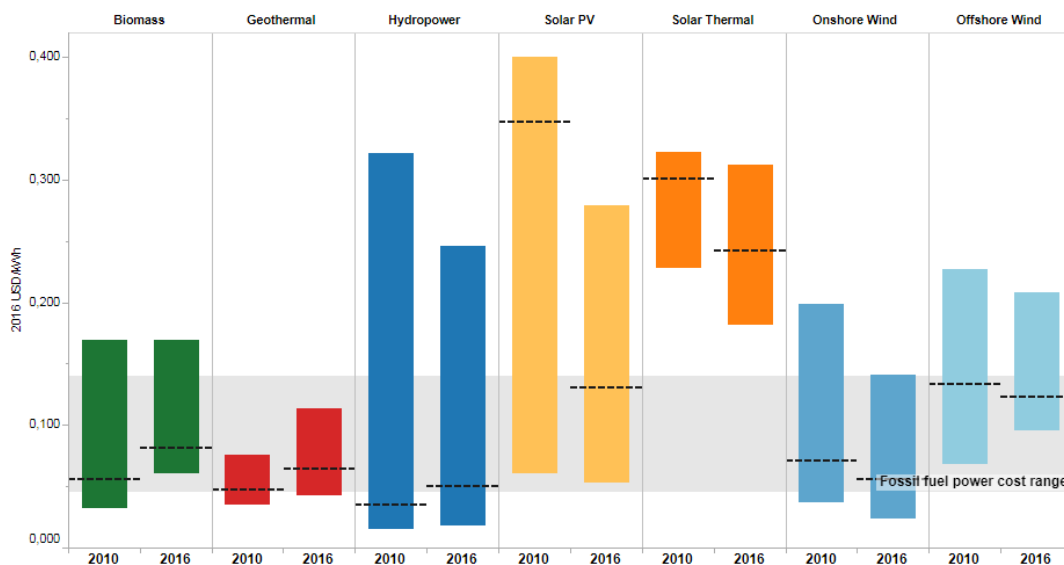


Figura 1 - Custo global nivelado de eletricidade 2010 – 2016 (IRENA, 2017)

Os dados supracitados demonstram que a energia solar está ganhando cada vez mais espaço e parece está longe do seu pico de crescimento. O *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2017) apresenta uma redução do custo médio da energia produzida de 0,347 USD/ kWh em 2010 para 0,131 USD/kWh em 2016 para geração a partir de Sistemas Fotovoltaicos (FV), Figura 1, essa rápida queda nos custos aumenta a competitividade da energia solar, incentiva investimentos e políticas nesse setor.

No Brasil, por exemplo, Resolução Normativa (RN) 482/12 da ANEEL no Brasil, que em resumo define o sistema de compensação de energia elétrica para prosumidores (produtores consumidores), em 2015 foi facultado aos Estados

cobrar o Imposto sobre Circulação de Mercadores e Serviços (ICMS) sobre a energia solar, 20 Estados isentaram sua cobrança. O PIS e COFINS foram isentados pela Lei nº 13.169, a RN nº 687/15 atualizou a RN 482/12 quanto aos limites de capacidade instalada, além de reduzir a burocracia de conexão dos sistemas, e possibilitar a geração compartilhada. Os Projetos de Lei do Senado (PLS) 167/2013 e 8322/2014 discutem a isenção de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI) para painéis fotovoltaicos e similares, o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia visa criar linhas de crédito e valores de referência para venda de energia solar (PORTAL SOLAR, 2017; ENGIE, 2017)

Nesse contexto, esse trabalho objetiva apresentar um estudo sobre algumas características elétricas dos módulos comerciais existentes no mercado, para descrever o estado da arte desta tecnologia. Os dados são apresentados graficamente e comparados com o mercado em 2014, ao final é apresentado um resumo tabelado das principais contribuições discutidas ao longo do texto. Explicações mais aprofundadas das características físico químicas podem ser encontradas em Zilles (2012), Poncé-Alcántara (2014) e Singh (2012), que apresentam discussões sobre a transmissão e captação de energia dos fótons, mobilidade dos elétrons, coeficientes de temperatura de corrente de curto circuito, tensão de circuito aberto e de máxima potência.

## 2. DESCRIÇÃO

Para realização dessa pesquisa partiu-se de um ranking estabelecido (Aggarwal, 2017) dos painéis solares mais eficientes disponíveis no mercado, dos trinta e três fabricantes foram selecionados os dez primeiros para compor este trabalho:

Tabela 1 - Avaliação de Eficiência de Módulos Fotovoltaicos por Fabricante e Quantidade de Módulos Considerados na Pesquisa

#	FABRICANTE	MAIOR EFICIÊNCIA (%) (Aggarwal, 2017)	QTD.
1	SunPower	22.2	9
2	Panasonic	21.6	5
3	LG	19.5	30
4	Heliene Inc.	19.3	37
5	Solaria	19.3	8
6	Itek Energy	18.94	12
7	JinkoSolar	18.57	69
8	Renogy Solar	18.5	4
9	Silevo	18.5	4
10	Silfab	18.4	8

Vale ressaltar que algumas marcas consolidadas no mercado, como a Canadian Solar, ficaram de fora por diferenças decimais no percentual com relação ao décimo lugar: o vigésimo colocado, por exemplo, Seraphin, apresentou apenas 0,88% de diferença. Em geral os módulos são do tipo mono e policristalinos, sendo que a Panasonic apresentou módulos com heterojunção de finas camadas de silício amorfo recobrimdo silício tipo n, e módulos com tecnologia bifacial do mesmo fabricante, além da Silevo com módulos de *Híbrido Tunneling-Junction* (HTJ), somando um total de 185 modelos analisados, sendo a JinkoSolar a que possui a maior quantidade de produtos, e por esse motivo as linhas Eagle Dual, PERC e HC dessa não foram incluídas nessa pesquisa. Somente os modelos com dados disponíveis nos respectivos sites dos fabricantes foram considerados.

## 3. RESULTADOS

Para melhor visualização todos os dados coletados são apresentados a seguir na forma gráfica, de forma a enfatizar a região de maior concentração desses.

### 3.2 EFICIÊNCIA

Diferente do exposto na Tabela 1, nenhum dos módulos comerciais da SunPower atingiu mais 22,2% de eficiência, o que indica a possibilidade de Aggarwal (2017) ter considerado módulos ainda não disponíveis no mercado, mas divulgados pela empresa em artigos e comerciais. Em contraste com o levantamento realizado por Braga Jr. (2014), nesta pesquisa quase 50 % dos módulos apresentaram potência entre 305 W e 395 W, com menor potência de 205 W, Figura 2, enquanto aquele obteve valor mínimo abaixo de 25 W e maior concentração de módulos entre 100 W e 250 W. Ainda, seus dados de eficiência se concentraram entre 13.5 % e 15.5 %, e no levantamento atual os módulos estão entre 17 % e

19 %, caso se desconsidere os módulos da JinkoSolar, 16,5% a 19,5% . Tais valores estão referidos às condições padrões de testes (STC).

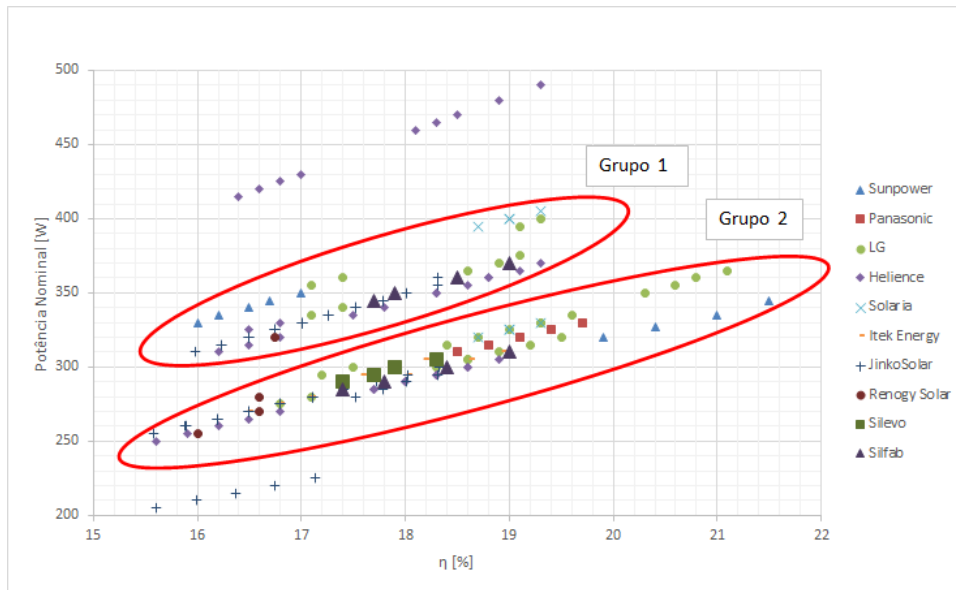


Figura 2- Análise da Eficiência dos Módulos

Pela Figura 2, pode-se fazer dois agrupamentos conforme a quantidade de células: Grupo 1 e 2 com 72 e 60 respectivamente, ambos em maioria, ou seja, poucos possuem quantidades diferentes de células, mas possuem área total comparáveis. Observa-se uma relação linear crescente entre a potência nominal e a eficiência dos módulos com a mesma quantidade de células, sendo as retas deslocadas positivamente no eixo vertical conforme se incrementa células, ou seja, quanto maior a área efetiva do módulo maior a sua potência nominal, Figura 3.

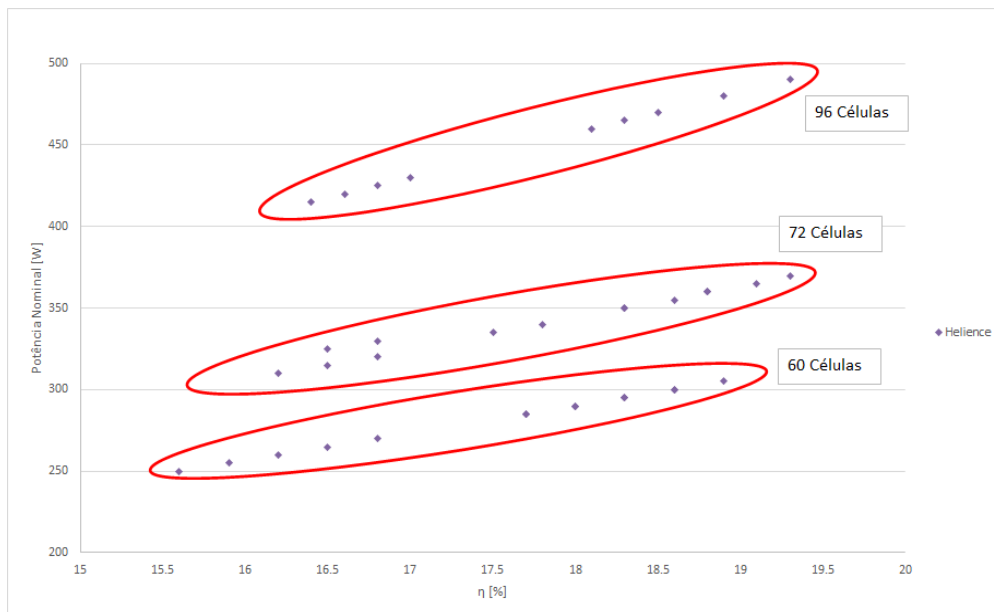


Figura 3 - Análise da Eficiência dos Módulos: Helienc

Ainda, percebe-se que a Helienc produz os módulos de maior potência, 490 W e 19,3 % de eficiência, mas são módulos de 96 células monocristalinas com área consideravelmente superior aos demais, cerca de 20 %. Uma comparação (eficiência; potência) mais adequada se faz dentro do Grupo 1, liderado pela Solaria (19,3 %; 405 W) e seguida pela LG (19,3%; 400 W) ambas monocristalinas, com uma pequena diferença de potência que possivelmente se dá pela diferença entre as áreas de exposição dos módulos. Priorizando agora a eficiência em detrimento da potência confirma-se a liderança da SunPower (21,5%; 345 W) seguida pela LG (21,1%; 365 W), ambas com tecnologia monocristalina, destaca-se que a LG possui área 6% maior que a SunPower e utiliza 60 células, contra 96 da SunPower, portanto, apesar de quantidades diferentes de células as áreas são equiparáveis.

Em geral, em uma única folha de dados se obteve mais de três potências diferentes para módulos com as mesmas dimensões, contendo os mesmos tipos e tamanhos de células, formando assim uma linha de produtos com características

muito próximas. Confirma-se o resultado de Braga Jr. (2014), a mesma área pode gerar diferentes potências, o que pode ser percebido mesmo entre marcas diferentes para áreas próximas.

### 3.3 COEFICIENTES DE TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO, CORRENTE DE CURTO CIRCUITO E FATOR DE FORMA

Dentre os parâmetros necessários para um bom dimensionamento, têm-se a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e a corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ), com esses valores é possível fazer uma caracterização aproximada do módulo em termos do ponto de máxima potência, mesmo estando em campo sem acesso à folha de dados ou dados de placa, pois  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$  são facilmente medidos (ZILLES, 2012). A tensão de circuito aberto dos módulos depende de quantas células são colocadas em série. A Figura 4 apresenta os intervalos de  $V_{oc}$  dos módulos para determinada quantidade de células.

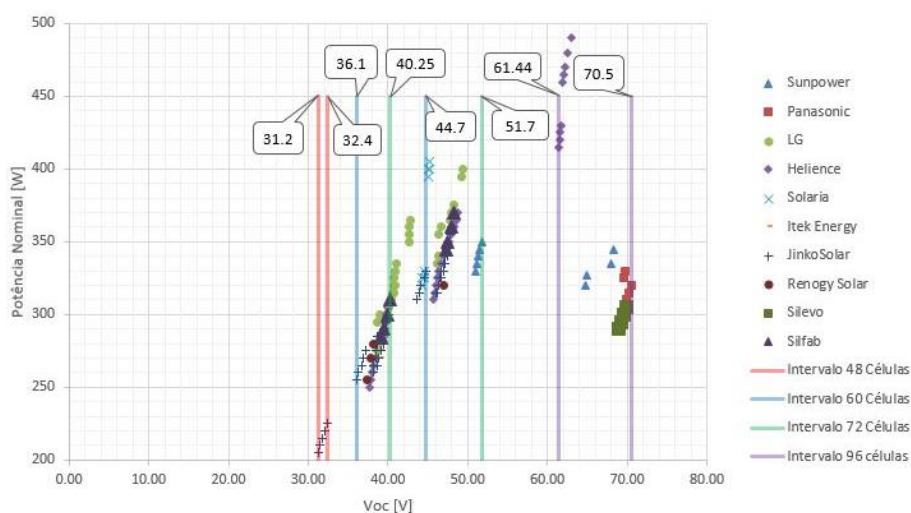


Figura 4 - Análise da tensão de circuito aberto

Em Braga Jr. (2014) foram apresentados módulos de 36, 50, 64 e 80 células, os quais não estão presentes nas folhas de dados analisadas. Ainda, o mesmo autor mostra que era possível utilizar um único valor, no lugar de um intervalo, para descrever o  $V_{oc}$  de módulos com a mesma quantidade de células. Comparando com os dados analisados na Figura 4, há diferenças de quase 10 V entre módulos de mesma quantidade de células, além de existir um intervalo de tensão em que há módulos tanto de 60 como de 72 células, ou seja, associações em paralelo de células estão sendo utilizadas. Dos 185 módulos analisados 84 e 74 são de 60 e 72 células respectivamente.

O próximo parâmetro é a corrente de curto circuito, que está concentrada em um intervalo de 8,83 A à 11,48 A, enquanto em Braga Jr. (2014) era possível definir grupos de acordo com as dimensões das células. O resultado atual demonstra uma variabilidade de área de células em torno de  $15,6 \times 15,6$  cm ( $243$  cm<sup>2</sup>), com um pequeno grupo variando de 5,59 A à 6,46 A, composto por módulos de tecnologias de heterojunção, HTJ e monocristalinas e áreas de células em torno de  $13 \times 13$  (169 cm<sup>2</sup>).

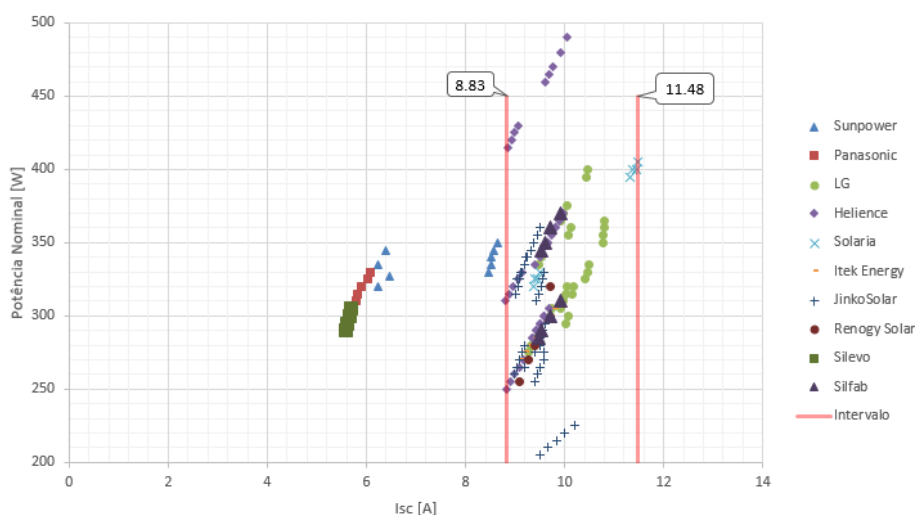


Figura 5 - Análise da corrente de curto circuito

Quanto ao fator de preenchimento (fill factor), Figura 6, dado pela relação entre a potência máxima de saída ( $V_{pmax} \times I_{pmax}$ ) pelo máximo "ideal" ( $V_{oc} \times I_{sc}$ ), houve maior aproximação de 0,8 do que em Braga Jr. (2014), com dados bastante concentrados entre 0,75 e 0,79, reflexo do maior domínio da tecnologia por parte de outros fabricantes.

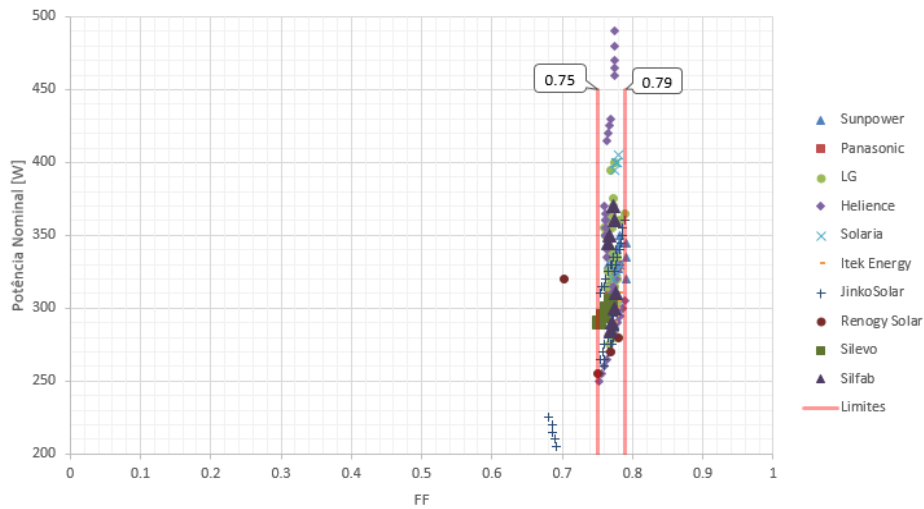


Figura 6 - Análise do fator de preenchimento (fill factor)

### 3.4 COEFICIENTES DE TEMPERATURA

Os coeficientes de temperatura (CT) relacionam de forma linear a variação de determinado parâmetro com a temperatura, e constitui-se da principal forma de avaliação do desempenho dos geradores. A Figura 7 demonstra que a maior concentração dos módulos com CT de máxima potência estão entre  $-0,42 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  e  $-0,37 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ , o que indica uma melhora com relação aos dados de Braga Jr. (2014), desconsiderando a JinkoSolar o intervalo fica  $-0,48 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  a  $-0,32 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Destacam-se a Panasonic com tecnologia de heterojunção, seguida pela Silevo, SunPower e LG de tecnologias monocristalinas, as quais geram as menores perdas de potência com o aumento da temperatura.

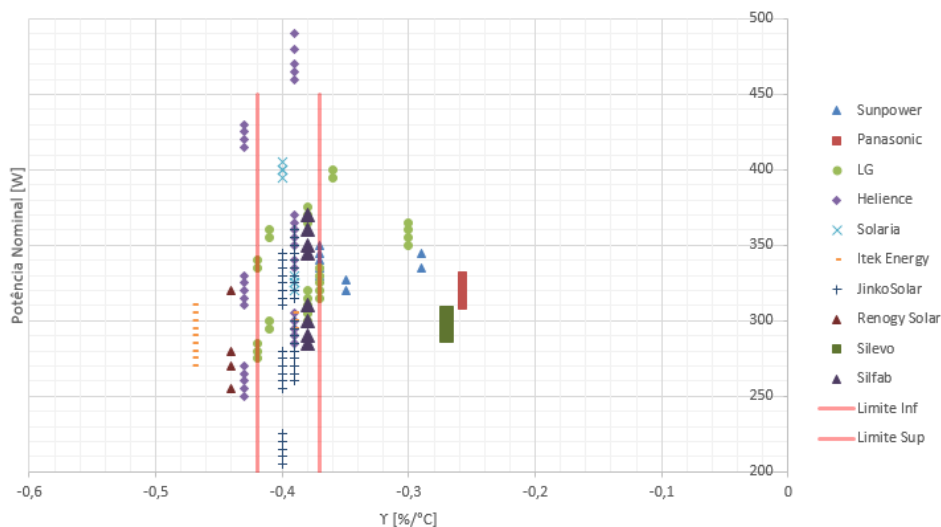


Figura 7 – Coeficientes de temperatura de potência

A Figura 8 apresenta os coeficientes de temperatura para corrente de curto circuito, conforme esperado apenas valores maiores que zero foram encontrados devido a composição do banco de dados ser de tecnologias mono e policristalinas, bem como em Braga Jr. (2014) os dados se concentraram entre  $0,03 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  e  $0,05 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ .

Por fim são apresentados os dados dos coeficientes de temperatura para tensão de circuito aberto, Figura 9, os quais concentram os dados entre  $-0,32 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$  e  $-0,28 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ , uma melhora significativa com relação a Braga Jr. (2014), o qual apresentou limite superior de  $-0,31 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Novamente há um destaque para Panasonic com heterojunção, seguida pela LG (monocristalino) e SunPower (monocristalino).

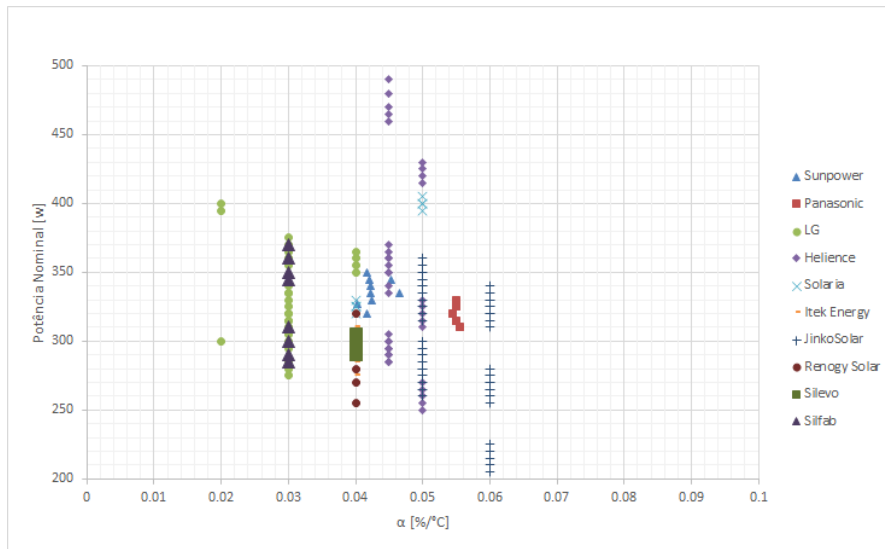


Figura 8 – Coeficiente de temperatura de corrente de curto circuito

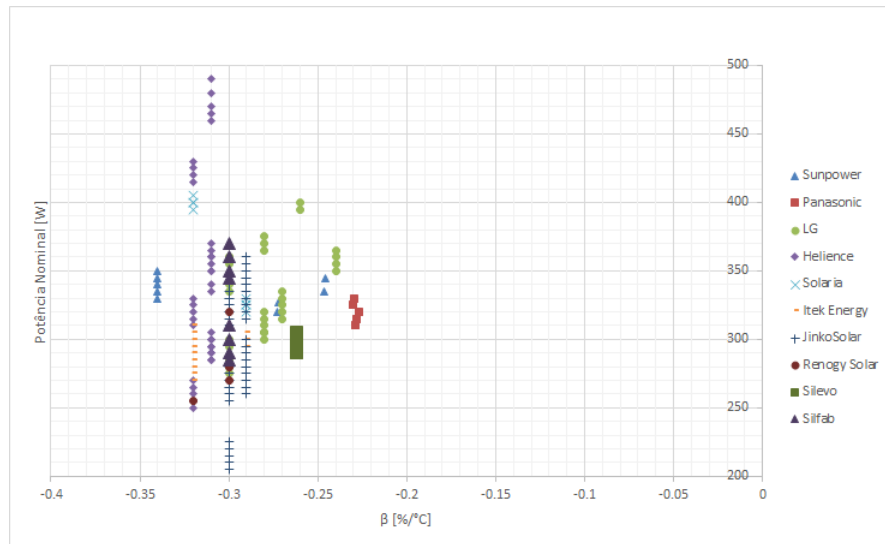


Figura 9 – Coeficiente de temperatura de tensão de circuito aberto

#### 4. RESUMO COMPARATIVO

Seguem os quadros com resumo dos dados obtidos nas Figura 2, Figura 4, Figura 5, Figura 7, Figura 8, Figura 9:

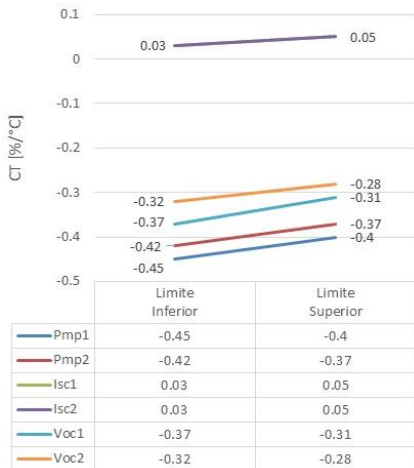


Figura 10 - Quadro Resumo: Índice 1 representa o mercado em 2014, índice 2 representa o mercado em 2017

Tabela 2 - Quadro Resumo

Células	Parâm.	Min.	Max
48	Voc [V]	31.2	32.4
60	Voc [V]	36.1	44.7
72	Voc [V]	40.25	51.7
96	Voc [V]	61.44	70.5
48 a 96	Isc [A]	8.83	11.48
48 a 96	P [W]	205	490
48 a 96	η [%]	15.58	21.5

Tabela 3 - Quadro Resumo (concentração ≈ 50%)

Células	Parâm.	Min	Max
48	Voc [V]	31.2	32.4
60	Voc [V]	39	41.5
72	Voc [V]	46.2	47.9
96	Voc [V]	64.8	70.5
48 a 96	Isc [A]	9.4	10.5
48 a 96	P [W]	305	395
48 a 96	η [%]	17	19

## 5. CONCLUSÃO

Tendo em vista os constantes desenvolvimentos tecnológicos, esse trabalho objetivou atualizar o estudo realizado em 2014. As informações obtidas nesse trabalho são análises desenvolvidas através dos dados coletados nos sites dos fabricantes, e objetivam dar suporte à estudos na área de sistemas fotovoltaicos. A atualização desses dados é um trabalho contínuo conforme sugerido por Braga Jr. (2014), e apresenta a descrição do mercado fotovoltaico em 2017. Muito embora se tenha considerado módulos de heterojunção, bifaciais e HTJ, esses não representam um percentual significativo no número de amostras, bem como os módulos de 48 e 96 células, o que deixa abertura para trabalhos futuros. Basicamente a melhora no CT de máxima potência se deu como consequência da melhora do CT de circuito aberto. Ainda, o intervalo de eficiência foi alterado de 13,7 % a 14,4 % em 2014 para 17 % e 19% em 2017.

## REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. BRASIL DEVE ATINGIR 1 GW DE ENERGIA SOLAR EM 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-deve-atingir-1-gw-de-energia-solar-em-2017.html>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- AGGARWAL, V., 2017. What are the most efficient solar panels on the market?. 2017. Disponível em: <<http://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>>. Acesso em: 9 out. 2017.
- ANNEL. Geração Distribuída. 2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/VerGD.asp>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- BRAGA JR., W. B.; MACÊDO, W. N.; PINHO, J. T., 2014. Analysis of characteristic parameters of commercial photovoltaic modules. Energy Procedia, v. 57, p. 4–13,
- DUPRÉ, O. et al., 2015. Experimental assessment of temperature coefficient theories for silicon solar cells. IEEE Journal of Photovoltaics, v. 6, n. 1, p. 1–5.
- ENGIE. Incentivos governamentais para quem usa energia solar. 2017. Disponível em: <<http://minhaenergiasolar.com.br/incentivos-governamentais-energia-solar/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. Global Market Outlook: For Photovoltaics 2017-2021. 2017.
- IRENA. LCOE 2010-2016. 2017. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- PONCE-ALCÁNTARA, S. et al., 2014. A Statistical Analysis of the Temperature Coefficients of Industrial Silicon Solar Cells. Energy Procedia, v. 55, p. 578–588.
- PORTAL SOLAR. A regulamentação dos créditos de energia solar. 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/a-regulamentacao-dos-creditos-de-energia.html>>. Acesso em: 17 nov. 2017.
- SINGH, P.; RAVINDRA, N. M., 2012. Temperature dependence of solar cell performance—an analysis. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 101, p. 36–45.
- ZILLES, R. et al., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. São Paulo: Oficina de Textos.

## ANALYSIS OF TEMPERATURE COEFFICIENTS OF COMERCIAL PHOTOVOLTAIC MODULES

**Abstract.** *Considering the constant technological developments, this work goal to update a study carried out in 2014. For this purpose, the parameters of 185 photovoltaic modules from different manufacturers were extracted. It's presented the following data: efficiencies, open-circuit voltages, short-circuit current, fill factor, and the temperature coefficients. At the end, it's also presented comparisons between the market at 2014 and 2017.*

**Key words:** *Solar Energy, Photovoltaic Modules, Temperature Coefficients*