

ESTUDO COMPARATIVO TÉCNICO-FINANCEIRO DE USINAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO MÓDULOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS E POLICRISTALINOS

Henrique Menezes Nunes (Alsol) - henrique.nunes@alsolenergia.com.br

Remington Phelipe da Silva Correa (ALSOL) - remington.correa@alsolenergia.com.br

Gustavo Malagoli Buiatti (ALSOL) - gustavo@alsolenergia.com.br

Rodrigo Latuf Andrade (Alsol) - rodrigolatuf@alsolenergia.com.br

Frederico Kos Botelho (ALSOL) - frederico.botelho@alsolenergia.com.br

José Vieira Neto (Alsol) - neto@alsolenergia.com.br

Vinicius de Carvalho Venancio (Alsol Energia) - vinicius.venancio@alsolenergia.com.br

Rafael Silva Carvalho (Alsol Energia) - rafael.carvalho@alsolenergia.com.br

Resumo:

Este trabalho apresenta um estudo de caso técnico-financeiro da comparação de desempenho de usinas fotovoltaicas compostas por módulos de silício monocristalinos e policristalinos. Em um primeiro momento é apresentado a metodologia de análise técnica da solução utilizando dados reais obtidos através de uma janela de 4 meses de medição. Após isso é apresentado uma análise financeira entre ambas tecnologias comparando o custo inicial de investimento, valor presente líquido e diferentes cenários analisando os aspectos de eficiência e custo de cada tecnologia.

Palavras-chave: *Energia Solar, Estudo técnico-financeiro, módulos fotovoltaicos*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

ESTUDO COMPARATIVO TÉCNICO-FINANCEIRO DE USINAS FOTOVOLTAICAS UTILIZANDO MÓDULOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINOS E POLICRISTALINOS

Henrique Menezes Nunes – henrique.nunes@alsolenergia.com.br

Remington Phelipe da Silva – remington.correa@alsolenergia.com.br

Gustavo Malagoli Buiatti – gustavo@alsolenergia.com.br

Rodrigo Latuf de Andrade – rodrigolatuf@alsolenergia.com.br

Frederico Kós Botelho – frederico.botelho@alsolenergia.com.br

José Vieira Neto – neto@alsolenergia.com.br

Vinícius de Carvalho Venâncio – vinicius.venancio@alsolenergia.com.br

Rafael Alexandre Silva de Carvalho – Rafael.carvalho@alsolenergia.com.br

Alsol Energias Renováveis, Departamento de Estratégia e Inovação

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo de caso técnico-financeiro da comparação de desempenho de usinas fotovoltaicas compostas por módulos de silício monocristalinos e policristalinos. Em um primeiro momento é apresentado a metodologia de análise técnica da solução utilizando dados reais obtidos através de uma janela de 4 meses de medição. Após isso é apresentado uma análise financeira entre ambas tecnologias comparando o custo inicial de investimento, valor presente líquido e diferentes cenários analisando os aspectos de eficiência e custo de cada tecnologia.

Palavras-chave: Energia Solar, Estudo técnico-financeiro, módulos fotovoltaicos

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da energia solar para a produção direta de eletricidade surgiu a partir da descoberta do francês Edmond Becquerel quando, ao observar um experimento com uma célula eletrolítica, percebeu que a eletricidade aumentava quando ela era exposta à luz (Ruther, 2012). Assim, a transformação da energia contida na radiação luminosa em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como efeito fotovoltaico. O efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade. A energia absorvida por esses materiais quebra as ligações químicas entre as moléculas presentes em suas estruturas. Assim, foi estudado o comportamento de vários tipos de materiais quando expostos à luz, até que se chegasse ao desenvolvimento da primeira célula fotovoltaica de silício, capaz de converter energia solar em eletricidade de forma suficiente para alimentar equipamentos elétricos.

Os semicondutores utilizados nos dispositivos de conversão fotovoltaica são compostos de elementos capazes de absorver a energia da radiação solar e transferir parte dessa energia para elétrons, produzindo pares de portadores de carga (elétrons e lacunas). Os materiais utilizados para fabricar dispositivos com essa finalidade são escolhidos considerando a equivalência de suas características de absorção com o espectro solar, além de custo de fabricação e os impactos ambientais causados na deposição do material. Os elementos semicondutores mais utilizados na indústria de dispositivos de conversão fotovoltaica atualmente são: silício (Si) monocristalino, policristalino e amorfo; arseneto de gálio (GaAs); disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂); disseleneto de cobre, gálio e índio (CuInGaSe₂); e telureto de cádmio (CdTe).

Existe uma grande quantidade de aparelhos e tecnologias para produzir energia solar através do efeito fotovoltaico, mas a que se destaca comercialmente são painéis compostos por células de silício monocristalinas ou policristalinas, como dito anteriormente, devido ao seu custo benefício atrativo e tecnologia amplamente difundida. Os módulos solares ficam expostos diretamente à irradiação, esse absorve calor em ambiente de temperatura degradante e de difícil dissipação faz com que a temperatura de operação seja alta, o que não é desejável, pois esses painéis foram projetados para ambiente europeu e, quando submetidos ao stress de temperatura, a sua eficiência cai drasticamente (Villalva, 2012).

Hoje em dia, 90% dos geradores instalados no mundo são feitos à base de silício cristalino. Dentro deste, o silício monocristalino é o mais antigo e o que mantém o domínio do mercado (60%), sendo utilizado em todo o tipo de aplicações terrestres de média e elevada potência. O silício policristalino, constituído por um número muito elevado de cristais, é uma alternativa por um lado um pouco mais barata, mas por outro, menos eficiente (Castro, 2008). O silício cristalino (c-Si) é a mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e que ainda hoje apresenta a maior escala de produção a nível comercial. O c-Si consolidou a sua presença no mercado fotovoltaico internacional devido a possuir uma robustez extrema e uma elevada fiabilidade.

Em termos de eficiência, as células monocristalinas (m-Si) individuais possuem um maior rendimento quando comparadas as células de silício policristalino (p-Si). No entanto, esta tecnologia é mais cara devido às técnicas complexas utilizadas na sua produção sendo necessária uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita. O silício policristalino (p-Si) apresenta menor custo de produção dada a maior imperfeição cristalina, a qual resulta num material menos eficiente

aquando da conversão fotovoltaica, fator este que é parcialmente compensado com um maior aproveitamento da área do painel. A Fig.1 apresenta as diferenças físicas das duas tecnologias.



Figura 1: Aspectos de módulos de silício monocristalino e policristalino (da esquerda para a direita) (Calaia, 2011)

A partir dessa diferença de eficiência e custo das duas tecnologias mais utilizadas no mercado, este artigo tem como objetivo de apresentar uma análise técnico-financeira a respeito dessas tecnologias, utilizando dados de operação de módulos de silício monocristalino ao longo de 4 meses de estudo.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar uma análise de desempenho de módulos fotovoltaicos compostos por células de silício monocristalino e policristalino, a fim de fornecer subsídio para a tomada de decisões de investimentos em parques solares, baseados nos aspectos técnicos e financeiros de cada tecnologia. Para alcançar este objetivo, são analisados os parâmetros técnicos, como, energia gerada de cada tecnologia, e aspectos financeiros para a implantação de usinas fotovoltaicas no contexto de Geração Distribuída.

3. METODOLOGIA

Para a elaboração deste estudo foram montados dois arranjos fotovoltaicos, sendo um deles composto de módulos monocristalinos e o segundo de módulos policristalinos. Ambos os arranjos fazem parte de uma usina em estrutura fixa em solo com orientação e posicionamento ótimos (orientada ao Norte e 10° de inclinação) e contam com o mesmo inversor fotovoltaico. A usina estudada é produto de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL realizado em conjunto com as empresas Alsol Energias Renováveis e CEMIG, localizada na cidade de Uberlândia-MG. Os equipamentos utilizados em cada um dos arranjos estão listados nas Tab.1 e Tab.2.

Tabela 1: Equipamentos e modelos utilizados na UFV - módulos policristalinos

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	MODELO / CARACTERÍSTICA
Módulo Fotovoltaico	85	BYD 335 Wp / policristalino
Inversores	1	SMA STP 25000TL 25kW
Estrutura	1	Fixa em aço galvanizado com orientação para o Norte e inclinação de 10°

Tabela 2: Equipamentos e modelos utilizados na UFV - módulos monocristalinos

EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	MODELO / CARACTERÍSTICA
Módulo Fotovoltaico	80	JA 380 Wp / monocristalino
Inversores	1	SMA STP 25000TL 25kW
Estrutura	1	Fixa em aço galvanizado com orientação para o Norte e inclinação de 10°

Para uma análise mais adequada, foi escolhido o mesmo modelo de inversor, o mesmo tipo de material na estrutura fixa metálica, a mesma inclinação dos módulos (10°) e o mesmo plano de irradiação solar em ambas as conexões. Nas imagens Fig.2, Fig.3, Fig.4 e Fig.5 são apresentadas as imagens da instalação realizada.

- Conexão módulos policristalinos



Figura 2: Inversor utilizado na conexão dos módulos policristalinos



Figura 3: Mesa com módulos policristalinos

- Conexão módulos monocristalinos



Figura 4: Inversor utilizado na conexão dos módulos monocristalinos



Figura 5: Mesa com módulos monocristalinos

Com a instalação concluída, os dados disponibilizados nos inversores foram coletados e armazenados em um banco de dados por meio de um sistema supervisor. Os dados disponibilizados para análise em nuvem são amostrados dos inversores fotovoltaicos em corrente contínua e alternada, com uma taxa de amostragem de 15 segundos e armazenados a cada minuto, através de um algoritmo de consolidação. No que diz respeito aos dados analisados, as análises realizadas neste trabalho compreendem o período entre os dias 01/10/2019 e 31/01/2020. Para alcançar resultados com um menor grau de influências de fatores externos, principalmente o sombreamento, toda a análise técnica foi realizada considerando apenas os dados relativos à geração de energia dos arranjos no período entre as 11:00 e as 13:00, período em que o sol está a pino e sem riscos de sombreamento por outros arranjos ou obstáculos naturais. A Fig. 6 ilustra a curva de potência de um dos dias analisados para cada um dos arranjos.

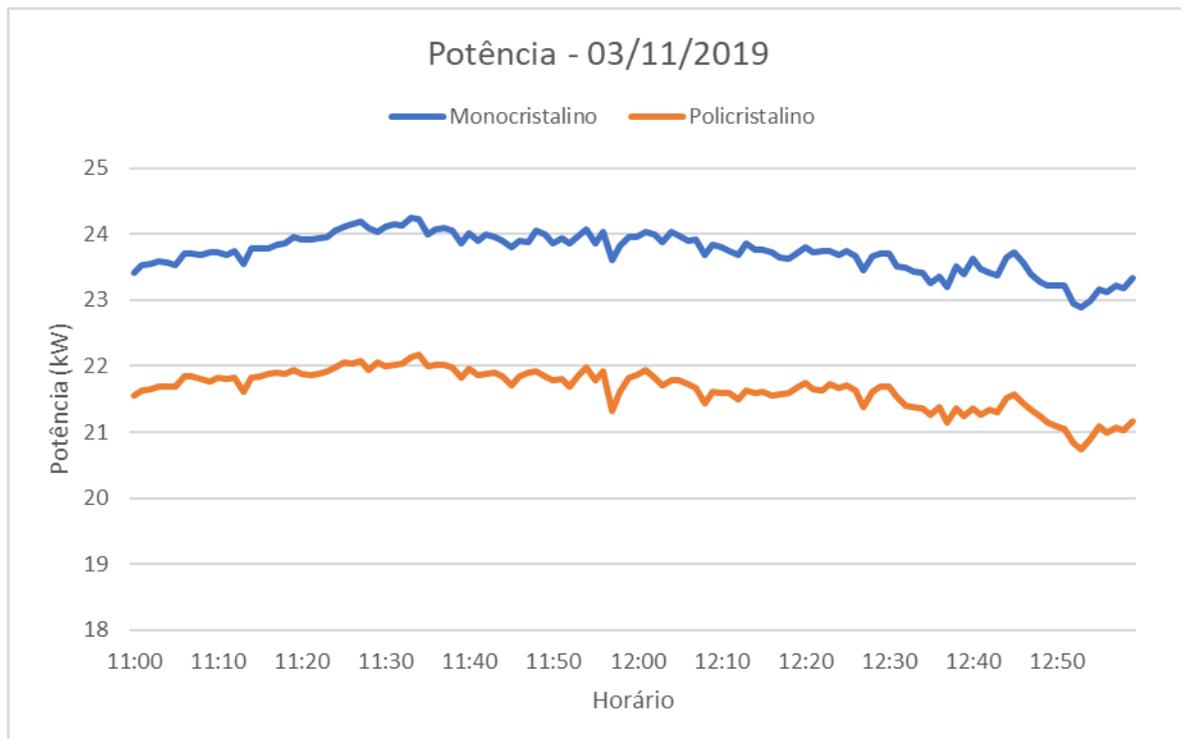


Figura 6: Potência gerada no dia 03/11/2019

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a análise dos dados durante os meses de outubro, novembro, dezembro de 2019 e janeiro de 2020, os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 7.

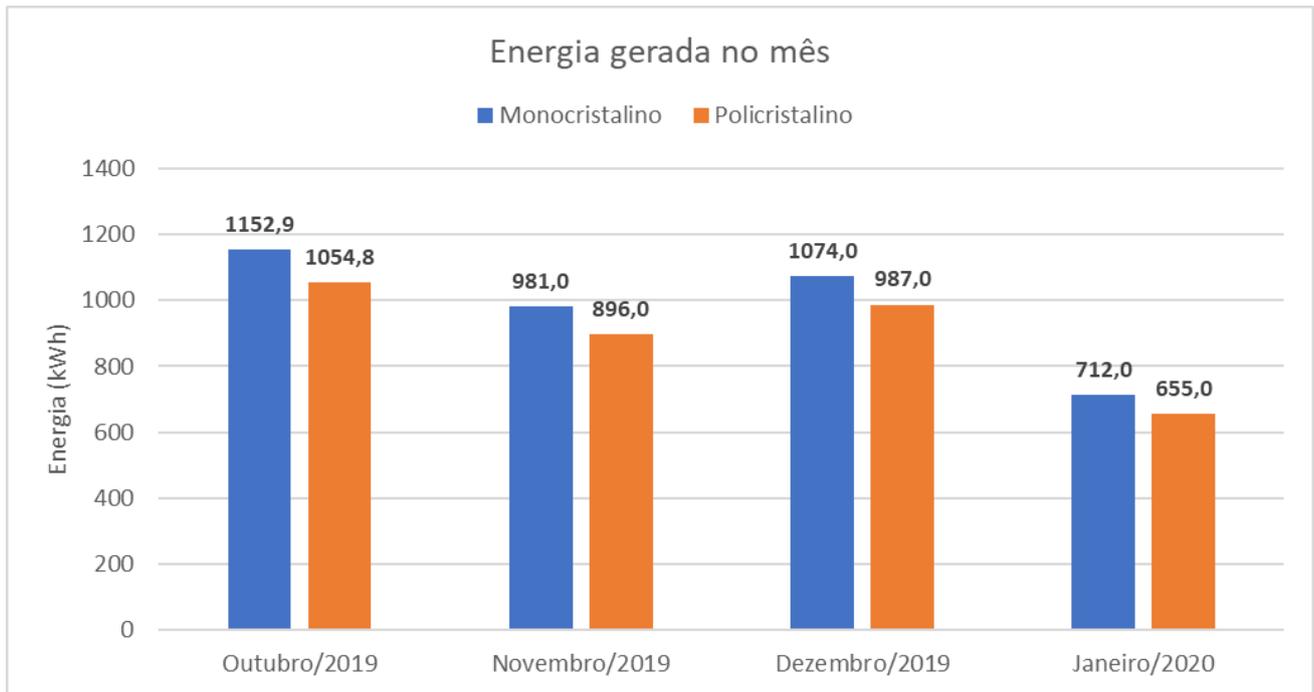


Figura 7: Energia gerada nos meses

Como pode ser observado na Fig. 7, houve uma diferença significativa na ordem de 8% entre o montante de energia gerada pelo arranjo monocristalino e policristalino. Entretanto, para verificar se esta diferença se dá apenas pelo fato da diferença de tecnologias é necessário realizar uma análise mais aprofundada. Devemos levar em consideração que cada arranjo conectado ao inversor de 25kW pode estar sobrecarregado, levando à necessidade de uma análise normalizada por potência contínua (Wp) instalada em cada inversor.

Utilizando os dados da Tab.1 e Tab.2, e multiplicando o número de módulos pela potência nominal de cada um, o arranjo monocristalino foi instalado com uma potência de 30,4kWp e o arranjo policristalino com uma potência de 28,47kWp. Com isso, foi verificado uma diferença de potência instalada entre os arranjos de aproximadamente 6,3%, o que nos leva a verificar que na prática o ganho na geração de 8% entre o arranjo monocristalino e policristalino pode ser menor.

Entendido essa diferença, foi então realizado uma normalização com relação aos valores presentes na Fig. 7 e a potência de módulos instalada. Os resultados obtidos se encontram na Fig. 8.

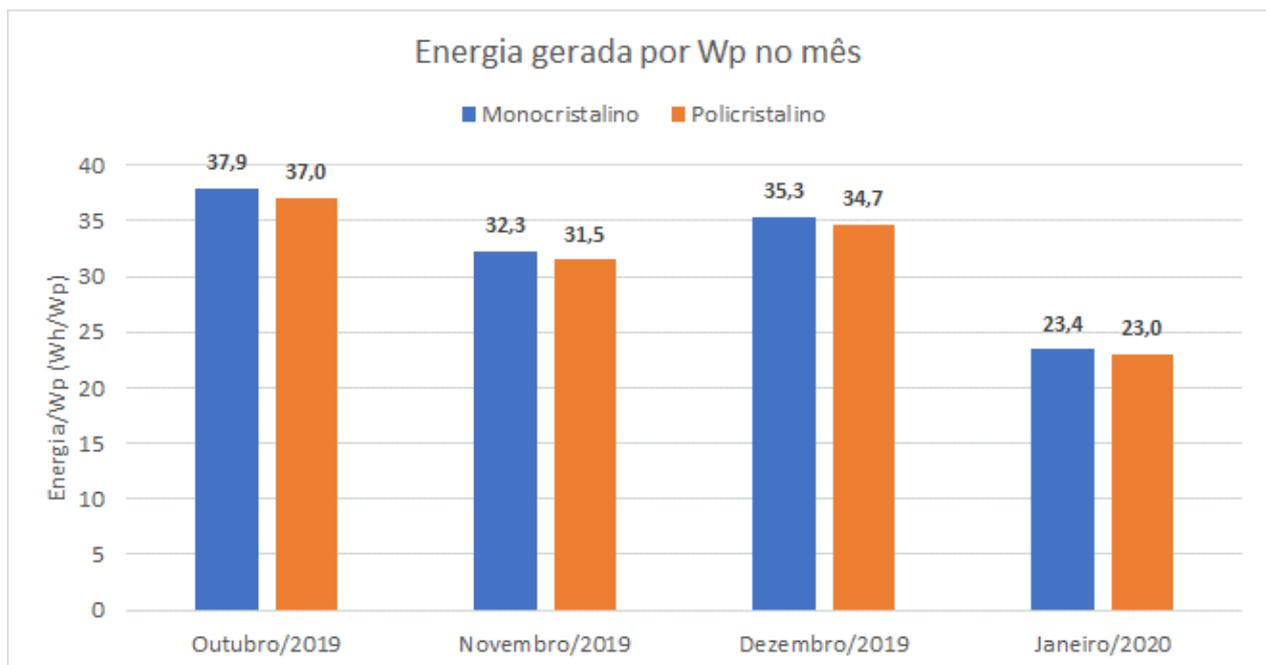


Figura 8: Energia gerada por Wp nos meses

Observando a Fig. 8 e realizando uma análise normalizada da energia gerada por cada arranjo com relação à potência instalada, temos uma diferença média 2,12%, o que nos leva a conclusão que o arranjo monocristalino possui realmente uma performance mais satisfatória quando comparado ao arranjo policristalino. Entretanto, uma vez que a tecnologia na fabricação de células de silício monocristalino é mais complexa, o seu preço ao consumidor final é naturalmente maior do que um módulo policristalino. Por isso, faz-se necessário uma análise não só pelo ponto de vista técnico, mas também contemplando o aspecto financeiro de cada tecnologia. Segundo dados obtidos da empresa Alsol Energias Renováveis, a média dos preços dos módulos fotovoltaicos praticados em mercado estão representados na Tab.3. Foi considerado o valor de dólar de R\$4,15, o valor médio entre os meses de outubro, novembro e dezembro de 2019 e janeiro de 2020.

Tabela 3: Valores comerciais das tecnologias dos módulos em Wp

TECNOLOGIA	IMPORTADO	NACIONAL
Monocristalino	R\$1,33/Wp	R\$1,70/Wp
Policristalino	R\$1,20/Wp	R\$1,58/Wp

Com os valores por Wp dos módulos, é possível agora encontrar o valor unitário de um módulo. Para isso, foi considerado um módulo de 335Wp para monocristalino e policristalino. Os valores encontrados estão apresentados na Tab.4.

Tabela 4: Valores unitários dos módulos de 335Wp

TECNOLOGIA	IMPORTADO	NACIONAL
Monocristalino	R\$444,88	R\$570,00
Policristalino	R\$403,17	R\$528,30

Analisando a Tab.4, pode-se observar que os módulos importados são mais baratos que os nacionais (diferença de R\$125,12), sendo mais interessantes a serem utilizados.

Para continuar a análise financeira do problema, é necessário encontrar a produção específica de cada tecnologia de acordo com a performance técnica para compreender a diferença de geração entre eles. Considerando uma produção específica de 1550kWh/kWp/ano (Buiatti *et al.*, 2018), pode-se encontrar a produção específica de cada módulo. Os valores estão apresentados na Tab.5. Para a tecnologia monocristalina, foi utilizado o ganho de produtividade em relação à tecnologia policristalina encontrada de 2,12%.

Tabela 5: Valores de produção específica dos módulos

TECNOLOGIA	PRODUÇÃO ESPECÍFICA
Monocristalino	1582,86 kWh/KW/ano
Policristalino	1550 kWh/KW/ano

Considerando os dados da Tab.5 e a mesma taxa de degradação ao ano em ambas tecnologias, 2,5% no primeiro ano e o acréscimo de 0,7% a cada ano (Raupp *et al.*, 2016), é possível obter a energia gerada dos módulos durante os 25 anos de vida útil de um painel fotovoltaico, presente nos *datasheets* dos fabricantes dos módulos utilizados (Machado, 2014). É possível observar na Fig.9 observar essa regressão da geração de energia.

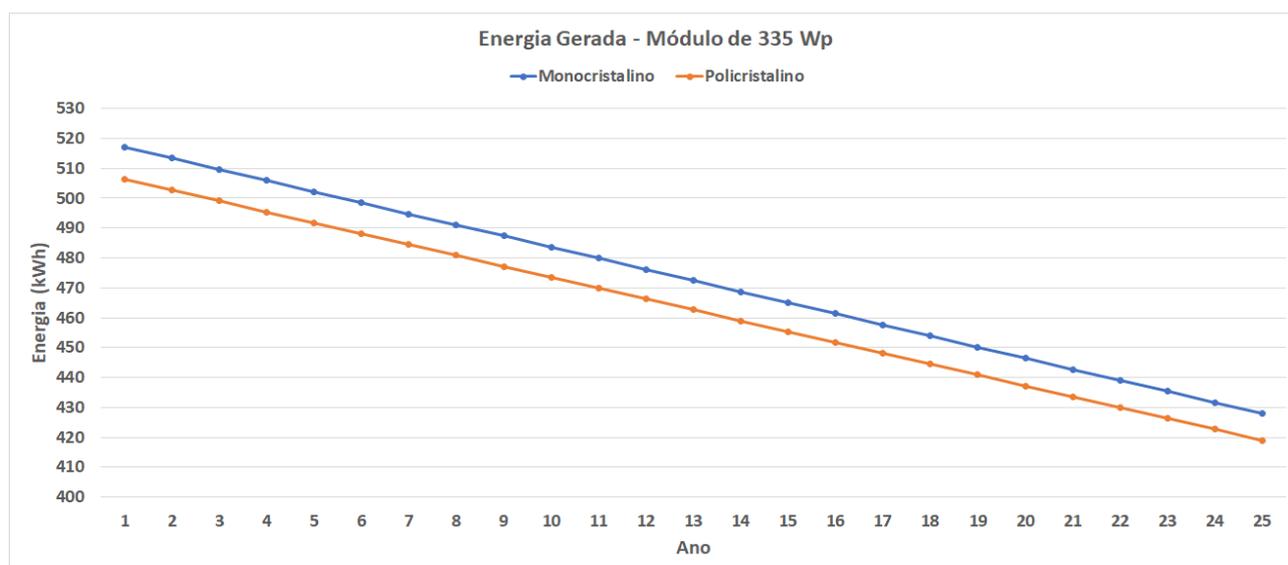


Figura 9: Energia Gerada ao longo dos anos

Realizando uma análise financeira do investimento das tecnologias considerando unidade consumidora conectada em Geração Distribuída, publicada na Resolução Normativa (RN) nº 482/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 17 de abril de 2012 (Aneel, 2014) na área da CEMIG de Baixa Tensão Comercial (tarifa R\$ 0,904/kWh), é possível projetar o Valor Presente Líquido (VPL) das duas tecnologias com base nos dados obtidos na Fig. 9. Considerando uma taxa de desconto de 4,5% (taxa SELIC média no período analisado) foram obtidos os seguintes valores apresentados na Tab. 6.

Tabela 6: Valores do valor presente líquido das tecnologias

TECNOLOGIA	VALOR PRESENTE LÍQUIDO
Monocristalino	R\$6059,02
Policristalino	R\$5925,23

Uma vez obtidos os valores de VPL de cada tecnologia, foi realizada uma análise de sensibilidade com o objetivo de verificar o impacto tanto do ganho de eficiência entre as tecnologias quanto sua diferença de preço no VPL para analisar os possíveis pontos de equilíbrio e regiões onde cada tecnologia é mais atrativa. Os cenários simulados se encontram na Fig. 10.

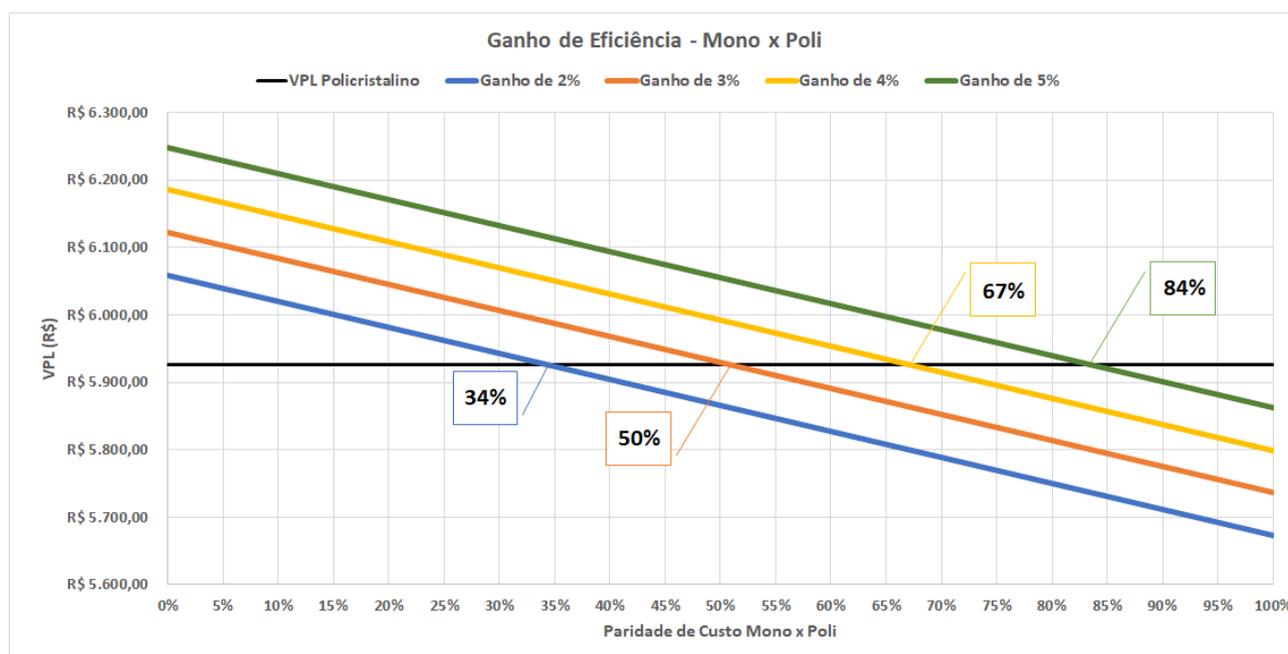


Figura 10: Ganho de eficiência das tecnologias

Primeiramente foi adotado como base o VPL do módulo policristalino (em preto). A partir disso, foram simulados quatro cenários de ganho de eficiência na produção energética do módulo monocristalino quando comparados com o policristalino. O primeiro cenário (em azul) é referente aos dados obtidos em campo (ganho de 2,12%) e os demais cenários foram simulados acrescentando um ganho adicional de 1% na eficiência a partir do cenário inicial.

Visto isso, pode-se observar que, para cada 1% no ganho de produtividade dos módulos monocristalinos, há também um aumento na paridade de custo entre os módulos de aproximadamente 16%. Essa paridade indica o quão mais caro pode ser o módulo monocristalino para que o VPL dessa tecnologia ainda seja melhor do que a da tecnologia policristalina.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma análise referente a um comparativo técnico-financeiro de usinas fotovoltaicas utilizando módulos de silício com tecnologias monocristalinas e policristalinas.

Com base nas análises realizadas, foi identificado que o módulo monocristalino possui uma performance técnica mais satisfatória em uma análise normalizada de geração de energia, sendo em média 2,12% acima do policristalino. Além disso, com os valores encontrados de W_p por cada tecnologia de módulo e suas respectivas produções específicas nas condições apresentadas, foi possível determinar um Valor Presente Líquido de cada tecnologia e realizar uma análise de sensibilidade levando em consideração a eficiência e custo de cada tecnologia em diferentes cenários.

Foi observado que ganhos relativamente pequenos de eficiência da tecnologia monocristalina (1%) resultam em uma paridade de custo de aproximadamente 16%, o que indica uma correlação com alto grau de impacto entre qual tecnologia deve ser escolhida a depender do cenário financeiro e técnico analisado.

Agradecimentos

O estudo apresentado nesse trabalho faz parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Estratégico ANEEL intitulado “D721-ARRANJOS TÉCNICOS E COMERCIAIS PARA A INSERÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM COMBINAÇÃO COM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO BRASILEIRAS”. Os autores desse artigo gostariam de agradecer as entidades envolvidas Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), CEMIG e Alsol Energias Renováveis pela disponibilização da usina fotovoltaica e consultoria em todos os resultados e análises obtidos nesse artigo.

REFERÊNCIAS

- Aneel, 2014. Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica. Brasília: ANEEL, Cadernos Temáticos ANEEL. 28 p.
- Buiatti, G. M., Vieira Neto, J., Silva de Carvalho, R. A., Garcia Pacheco, V., de Oliveira, V. A., 2018. "Performance and Feasibility of Ongrid PV Systems Applied to Telecommunications Sites in Brazil," 2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Turin.
- Calaia, F. J. dos S., 2011. Estudo comparativo de três tecnologias fotovoltaicas, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Castro, R. M. G., 2008. Introdução à energia fotovoltaica.
- MACHADO, C.T.; MIRANDA, F.S., 2014. Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão. Revista Virtual Química, vol. 7, n. 1, p. 126-143. Universidade Federal Fluminense. Rio de Janeiro.
- Raupp, C. et al., 2016. "Degradation rate evaluation of multiple PV technologies from 59,000 modules representing 252,000 modules in four climatic regions of the United States," 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Portland, OR.
- Rüther, R., 2012. O potencial da energia solar fotovoltaica no Brasil: Estado-da-arte e integração nas redes urbanas, Seminário Tecnológico Geração de Energia Elétrica por Fonte Solar, Curitiba.
- Villalva, M. G.; Gazoli, J. R., 2012. Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica.

COMPARATIVE TECHNICAL-FINANCIAL STUDY OF PHOTOVOLTAIC PLANTS USING MONOCRYSTALLINE AND POLYCRYSTALLINE SILICON MODULES

Abstract. *This paper presents a technical-financial case study of the performance comparison of photovoltaic power plants composed of monocrystalline and polycrystalline silicon modules. At first, we present the methodology of technical analysis of the solution using real data obtained through a four-month window measurement. After that a*

financial analysis is presented between both technologies comparing the initial investment cost, liquid present value and different scenarios analyzing the efficiency and cost aspects of each technology.

Keywords: *Solar energy, Technical-financial study, photovoltaic modules*