



# ESTUDOS DA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA POR MEIO DE ARREFECIMENTO DE PAINÉIS SOLARES COM ÁGUA DE REUSO

B. E. S. Mendes\*<sup>1</sup>, J. L. Domingos<sup>1</sup>, A. J. Alves<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IFG – Instituto Federal de Goiás

**Resumo** - Este trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta para a implantação de técnica de melhoria de eficiência elétrica de painéis fotovoltaicos, através de arrefecimento com água de reuso em uma planta piloto. A água utilizada é proveniente do tratamento do esgoto de uma instituição de ensino. Esta é aplicada na superfície frontal dos painéis fotovoltaicos para melhoramento da conversão de energia, através de sistema de automação. Um sistema de aquisição de dados e supervisão permite monitoramento em tempo real das variáveis avaliadas, como temperatura, potência e eficiência do sistema.

**Palavras-Chave** – Água de Reuso, Arrefecimento, Eficiência Energética, Energia Solar.

## STUDIES ON IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN A PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM THROUGH COOLING SOLAR PANELS WITH REUSE WATER

**Abstract** – This work aims to present a proposal for the implementation of a technique for improving the electrical efficiency of photovoltaic panels, through cooling with reuse water in a pilot plant. The water used comes from the sewage treatment of an education institution. This is applied to the front surface of the photovoltaic panels to improve energy conversion through an automation system. A data acquisition and supervision system allows real-time monitoring of the variables evaluated, such as temperature, power and system efficiency.

**Keywords** – Cooling, Energy Efficiency, Reuse Water, Solar Energy.

### I. INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica, uma energia renovável, vem se tornando cada vez mais uma alternativa promissora às fontes de energia esgotáveis e poluidoras. A conversão direta da energia solar em energia elétrica é feita por módulos ou painéis fotovoltaicos feitos de material semicondutor, sendo o silício o material mais usado.

Os sistemas de geração fotovoltaica dependem diretamente da irradiação solar e são influenciados também pela temperatura de operação dos painéis e outros fatores, como sombreamentos e sujidade.

A eficiência e a potência de saída dos módulos dependem linearmente da temperatura de operação [1]. À medida que a temperatura do módulo aumenta, sua tensão de saída se torna menor e, conseqüentemente, diminui a potência de saída, reduzindo também a eficiência do módulo.

Em função dessa queda na eficiência dos painéis decorrente da elevação da temperatura em países com alto índice de radiação solar, como o Brasil, diversos estudos teóricos e práticos começaram a ser desenvolvidos para amenizar tal efeito, são os chamados sistemas híbridos fotovoltaico/térmico (PVT na sigla em inglês para *Photovoltaic Thermal*), sendo a integração entre um sistema com módulos fotovoltaicos e um coletor térmico, que utiliza fluido refrigerante aplicado na superfície dos módulos para resfriá-los, atuando como um sistema auto-limpante da superfície, removendo partículas de poeira que atrapalham a conversão energética [2].

Mais recentemente, estudos com água de reuso como fluido refrigerante tem sido feitos, provenientes da água da chuva ou de efluentes de esgotos tratados.

### II. OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo do artigo é apresentar e descrever um sistema de arrefecimento para melhoria de eficiência elétrica em painéis solares fotovoltaicos, através de arrefecimento com água de reuso em uma planta piloto.

#### A. Objetivos Específicos da Pesquisa

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- apresentar referencial teórico sobre fatores que afetam a eficiência de geração de sistemas fotovoltaicos e estudos mais recentes de técnicas de melhoria da eficiência;
- especificar as etapas de projeto, mostrando as características técnicas da planta piloto, a origem e características da água de reuso, e um sistema para aquisição de dados e supervisão para obter e monitorar as variáveis do sistema fotovoltaico com e sem arrefecimento;

\*breno\_esilvam@hotmail.com

### III. PARÂMETROS EXTERNOS QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Existem fatores ambientais e externos que afetam as células, módulos e a geração fotovoltaica. São eles a irradiância solar do local, a temperatura de operação da célula, os sombreamentos e a sujidade [3].

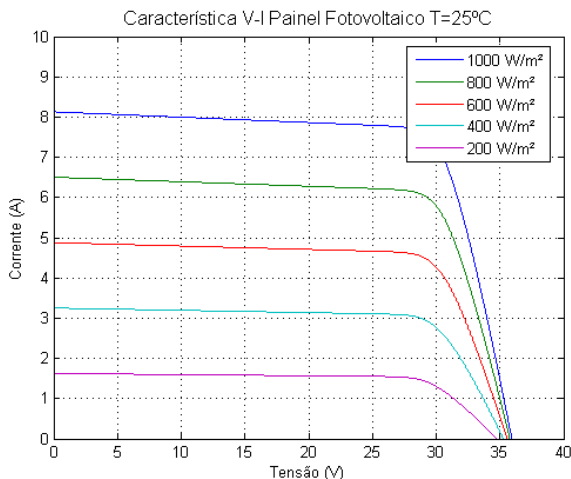
#### A. Irradiância Solar

A corrente gerada através da conversão fotovoltaica depende da quantidade de fótons capazes de contribuir para o efeito fotovoltaico. Assim, a corrente elétrica e a tensão geradas através deste processo são sensíveis à variação da irradiância solar [3].

A corrente elétrica aumenta linearmente com o aumento da irradiância solar incidente, ao passo que a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, se mantida a mesma temperatura.

A Figura 1 ilustra as curvas I-V de uma célula fotovoltaica de silício cristalino em vários níveis de irradiância solar, mantida na temperatura de 25°C.

Figura 1: Influência da irradiância solar na curva Tensão-Corrente de uma célula fotovoltaica de silício à 25°C.



#### B. Temperatura de Operação

Variações na temperatura ambiente afetam a temperatura de operação da célula fotovoltaica. O aumento da temperatura ambiente faz com que aumente a temperatura de operação da célula, reduzindo sua tensão de circuito aberto [3]. Portanto, a redução da tensão provocará uma perda de potência da célula ou módulo e consequente perda de eficiência de conversão.

As Figuras 2 e 3 apresentam o comportamento de tensão, corrente e potência para diferentes temperaturas.

#### C. Sombreamentos

Um fator importante para perda de geração é o sombreamento parcial dos módulos fotovoltaicos. Estes sombreamentos podem ser causados por árvores, construções próximas ao sistema, sujeira como folhas, dejetos de pássaros, ou até mesmo um módulo sombreando outro, no caso de um projeto mal dimensionado [3].

Figura 2: Curva Tensão-Corrente em diferentes temperaturas (Irradiância de 1000W/m²).

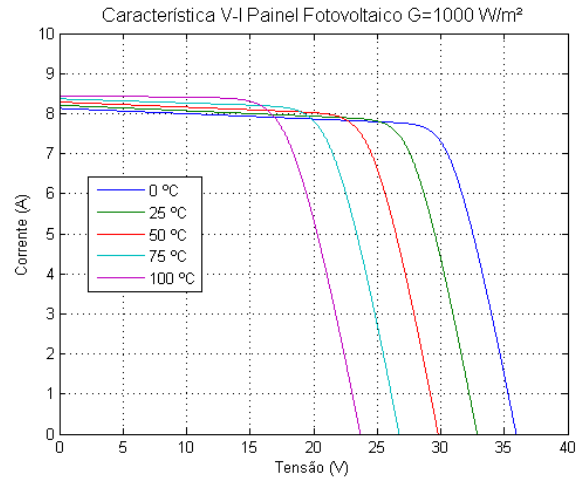
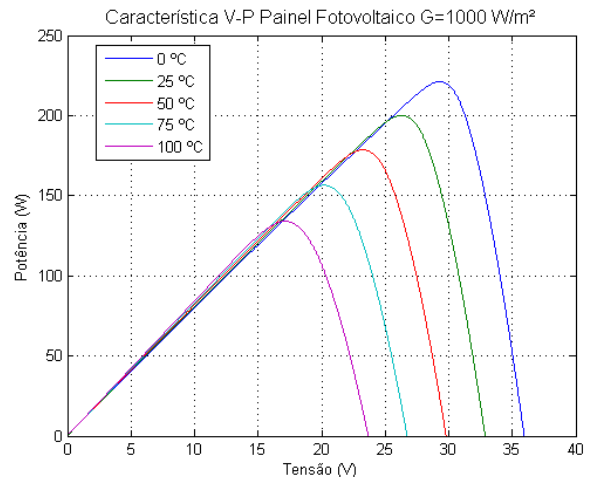


Figura 3: Curva Tensão-Potência em diferentes temperaturas (Irradiância de 1000W/m²).



Os módulos de silício cristalino possuem células associadas em série. Se uma dessas células receber menos irradiação provocada por um sombreamento, sua corrente limitará a corrente de todo o conjunto em série no módulo, limitando também a corrente de todos os módulos conectados em série [4].

Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, o efeito do sombreamento também acarreta riscos ao módulo sombreado, pois este irá sofrer aumento de temperatura devido ao aumento da resistência interna da célula, gerando os chamados “pontos quentes”. De forma a evitar os pontos quentes, são introduzidos os diodos de desvio (*by-pass*) que permitem a passagem da corrente sem danificar a célula através de um caminho alternativo.

#### D. Sujidade

Sistemas fotovoltaicos são instalados em locais sujeitos ao acúmulo de matéria particulada em sua superfície, devido à poluição ambiente e sujeira presente no ar. Podem ser encontradas substâncias como poeira contendo areia, cinzas, cimento, dejetos de pássaros e materiais originados por combustão [3].

Essa deposição de sujidade no módulo tem um impacto direto no desempenho do sistema fotovoltaico, reduzindo a absorção da irradiância, funcionando como uma barreira para a passagem dos fótons, e afetando a geração de energia elétrica.

A sujidade acumulada nestes sistemas depende do ambiente e das condições climáticas verificadas no local. Fatores como precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar, velocidade do vento e a inclinação dos módulos fotovoltaicos contribuem ou prejudicam na limpeza. Portanto a limpeza periódica dos módulos se faz bastante necessária para manutenção da produtividade [3].

#### IV. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As células e módulos fotovoltaicos são, em sua maioria, fabricados a partir de materiais semicondutores, como o silício, o mais comum [5].

Em condições laboratoriais ou condições padrões de teste (STC), com o atual estado da arte da tecnologia, é possível produzir células individuais de cristal de silício com eficiência superior a 24%. Ainda assim, devido a contínuas pesquisas no campo das células solares, o valor teórico alcançável da eficiência se direciona aos 30%. Porém, comercialmente, a eficiência é de apenas 13 a 19% podendo chegar em 24% nos próximos anos [6].

O rendimento das células depende de diversos fatores e a operação em módulo possui eficiência global inferior à eficiência das células individuais devido ao fator de empacotamento, à eficiência ótica de cobertura do módulo e, à perda nas interconexões elétricas das células [6].

Alguns rendimentos, de acordo com a tecnologia e/ou materiais das células, podem ser vistos na Tabela I.

Tabela 1: Rendimento médio obtido em células e módulos fotovoltaicos

Materiais e/ou tecnologias	Células	Módulos
Silício monocristalino – m-Si	14% a 25%	14% a 21%
Silício policristalino – p-Si	20%	13% a 16,5%
Orgânicas	12%	7% a 12%
Filmes finos	9% a 16%	7% a 13%
Silício amorfo – a-Si	9%	6% a 9%
Telureto de Cádmio - CdTe	14,4%	9% a 11%
Seleneto de Cobre, Índio e Gálio - CIGS	22%	10% a 12%
Híbrido - HJT		23%

Os efeitos da inclinação e orientação dos painéis na eficiência do gerador dependem da razão entre a radiação direta e difusa locais, bem como da fração de albedo (reflexão dos arredores), que é característica do ambiente que circunda a instalação. Como regra, a inclinação ótima com relação à horizontal para incidência solar máxima em regime anual é dada pela latitude local. A orientação ideal é a de uma superfície voltada para o equador (norte geográfico para

instalações no hemisfério sul e sul geográfico para instalações no hemisfério norte) [5].

#### A. Estudos Recentes na Literatura

Estudos são feitos para implementar o resfriamento em painéis fotovoltaicos para melhorar a eficiência energética de um sistema instalado no Instituto Federal de Goiás, em Goiânia. Nos experimentos são feitas medições instantâneas de potência e temperatura em dois painéis fotovoltaicos, um submetido a resfriamento com água de reuso (água da chuva) em sua superfície frontal e outro em condições normais de uso. Os resultados mostram que menores taxas de fluxo no sistema de resfriamento geram um maior custo-efetividade na eficiência dos painéis, obtendo-se um ganho de potência dos painéis de até 11,99% [7].

Um modelo técnica e economicamente viável de um kit de resfriamento a água para sistemas fotovoltaicos existentes em Portugal, considerando aspectos de um produto em escala comercial. Para este sistema considera-se não só as perdas de água e energia no sistema de resfriamento, otimizando para uma situação industrial real, como aspectos econômicos, custos de investimentos, durabilidade e manutenção. O protótipo do sistema de resfriamento de água foi instalado em uma *string* de 5kW (25 painéis) de uma usina de energia solar fotovoltaica de 20kW instalada em Lisboa, Portugal, aplicando-se água na superfície frontal dos painéis. Os experimentos analisaram como os painéis, com e sem resfriamento, tiveram sua eficiência afetada. A análise dos dados mostrou que o kit de resfriamento pode aumentar a produção energética anual em 12% [8].

Já no Reino Unido, uma técnica de resfriamento multiconceito é desenvolvida para reduzir o superaquecimento de módulos fotovoltaicos, para aumentar a eficiência e potência de saída. O experimento foi realizado com dois painéis fotovoltaicos de 250W montados a altura de 37cm, criando um espaço para resfriamento do ar. A técnica usada consiste em refrigerar a superfície frontal de um painel com água e dissipar o calor utilizando um dissipador de calor de alumínio na superfície traseira do mesmo painel, estando o outro painel em condições normais sem os aparatos. O dissipador de calor de alumínio consistia em uma placa de alumínio com aletas em alumínio para ajudar a refrigerar. O resultado foi um aumento na eficiência de 3%, tornando o painel mais eficiente e produtivo [9].

Um estudo do uso de duas fontes de água de reuso é realizado para análise da melhoria da eficiência de painéis fotovoltaicos instalados no Instituto Federal de Goiás. Os estudos são baseados em análises qualitativas e quantitativas de dois tipos de efluentes: proveniente de tratamento anaeróbico de uma indústria alimentícia (laticínio), e proveniente de tratamento biológico, Sistema *Wetland* construído, para tratamento de água cinza, em unidade residencial. As análises quantitativas se basearam principalmente em análises físico-químicas das amostras dos dois efluentes e dos parâmetros elétricos de melhoria de eficiência dos painéis em comparação com painéis sem arrefecimento. As análises qualitativas avaliam a presença ou ausência de corrosão, inscrustração ou embaçamento dos painéis arrefecidos. A bancada de estudos é composta por quatro painéis de 5W divididos em dois com e dois sem arrefecimento. Após os estudos, do ponto de vista das análises

físico-químicas, os dois efluentes atenderam às exigências das normas brasileiras para fins de reuso não-potável. Do ponto de vista dos parâmetros elétricos, as eficiências dos painéis foram acrescidas de 5,22% e 6,57% com efluentes industriais e provenientes das *Wetlands* respectivamente. Das análises qualitativas, não foram observados sinais de corrosão, incrustação e embaçamento nos painéis arrefecidos [10].

## V. ESTUDO DE CASO: PLANTA PILOTO

O estudo de caso apresenta um sistema fotovoltaico instalado no Campus Aparecida de Goiânia do IFG, com estudo do arrefecimento dos painéis fotovoltaicos com água de reuso proveniente do efluente de um sistema de tratamento de esgoto bruto do campus. O esgoto bruto, captado na rede de esgoto do campus, é primeiramente tratado em um reator anaeróbico e em seguida a água na saída deste recebe um tratamento secundário, em um sistema de tratamento biológico por zonas de raízes, também conhecido como sistema *Wetlands*.

### A. Etapas do Projeto

#### 1) Características técnicas e de projeto da planta piloto

O sistema fotovoltaico da planta piloto do Campus Aparecida é composto por um sistema de geração com 18 painéis fotovoltaicos da marca GCL, em um total de 5,85kWp de potência instalada no solo. As especificações técnicas dos painéis são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Especificações técnicas dos painéis fotovoltaicos do fabricante GCL

Materiais e/ou tecnologias	Modelo	Potência	Eficiência
Silício policristalino – p-Si	GCL-P6/72	325Wp	16,7%

A potência de 5,85kWp está instalada no solo de forma a facilitar a implantação do sistema de arrefecimento e monitoração da geração fotovoltaica, possibilitando a comparação com a geração de parte do sistema que não contempla o arrefecimento. O sistema está configurado com 2 *strings* de 9 painéis em cada, sendo uma com arrefecimento (*string* superior) e a outra a temperatura ambiente (*string* inferior). Entre as 2 *strings* há um espaço de 10cm para instalação de calha para coletar a água e devolver ao sistema de esgoto, fechando o ciclo, como mostrado na Figura 4.

#### 2) Sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos

O sistema de arrefecimento dos painéis fotovoltaicos é composto por um sistema de abastecimento de água de reuso, que utiliza água proveniente de um sistema de tratamento do esgoto do campus, e um sistema de distribuição dessa água coletada. O sistema de tratamento de esgoto do campus, constituído pelo sistema UASB e sistema *Wetland* é mostrado na Figura 5.

A água de reuso proveniente da saída do sistema de tratamento do esgoto do campus é bombeada até uma caixa d'água com capacidade de 10.000 litros. A partir da caixa d'água, a água de reuso escorre por gravidade via tubulação até 3 válvulas solenoides, acionadas por um Controlador

Figura 4: Estrutura de fixação dos painéis no solo com duas *strings* de 9 painéis.



Figura 5: Sistema de tratamento de esgoto do Campus Aparecida, composto por reator UASB e *Wetland*.



Lógico Programável (CLP). Sensores de temperatura do tipo termopar estão instalados nas superfícies traseiras de 3 painéis com arrefecimento e 3 sem arrefecimento, para comparação das temperaturas, bem como na tubulação de entrada e na saída da água (calha). As válvulas liberam a saída de água quando a média das 3 temperaturas dos sensores da *string* sem arrefecimento atingirem a temperatura de *setpoint* de 40°C, que foi definida conforme estudos realizados em [5].

A água de reuso liberada pelas válvulas solenoides segue através de mangueiras de poliuretano de 8mm até perfis de alumínio com furos de 1,5mm de diâmetro, instalados sobre as bordas superiores dos painéis, onde é aplicada de maneira uniforme sobre a superfície frontal dos painéis. Posteriormente, a água é coletada pela calha instalada na parte inferior dos painéis, de onde volta ao sistema de esgoto via tubulação, fechando o sistema. O processo é mostrado nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6: Tubulação hidráulica, válvula solenoide e mangueiras de poliuretano.



Figura 7: Detalhes da tubulação com mangueiras de poliuretano.



Figura 8: Perfis de alumínio na borda dos painéis.



### 3) Sistema de aquisição de dados e supervisão

O sistema de aquisição de dados e supervisão é composto por sensores de temperatura (termopares), transmissores de temperatura, válvulas solenoides, CLP, rede de comunicação e armazenamento de dados, integrando um sistema de supervisão de parâmetros como temperatura, tensão, corrente e potência do sistema fotovoltaico.

Os sensores termopares conectados às superfícies traseiras dos painéis fotovoltaicos convertem a temperatura para sinais analógicos que são transmitidos ao CLP. O processo de controle e aquisição de dados se inicia como o CLP fazendo a leitura dos valores dos termopares e controlando a abertura e fechamento das válvulas, quando a média das 3 temperaturas

dos painéis sem arrefecimento atingir a temperatura de *setpoint*. O inversor do sistema fornece os valores de tensão, corrente e potência.

Os dados do sistema fotovoltaico e do sistema de arrefecimento são concentrados, transmitidos e armazenados na “nuvem”. Isto possibilita o desenvolvimento de sistema supervisor *online*. A Figura 9 mostra vista interna do quadro com dispositivos (Fonte de tensão, CLP e *Flexy*) instalados. A planta projetada tem por referência dispositivos comerciais e amplamente empregados na indústria, de maneira a garantir a robustez do sistema.

Figura 9: Vista interna do quadro com dispositivos (fonte de tensão, CLP e *Flexy*).



### B. Resultados Parciais

A pesquisa encontra-se em andamento com os sistemas de arrefecimento e aquisição de dados e supervisão parcialmente instalados.

Um sistema piloto é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Sistema de arrefecimento de painéis fotovoltaicos instalados no Campus Goiânia do IFG.

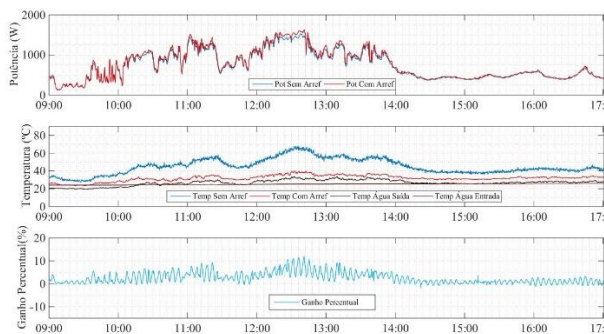


O sistema possui 6 painéis com arrefecimento e 6 sem arrefecimento para comparação. As variáveis analisadas são a

temperatura de um painel com arrefecimento, a temperatura de um painel sem arrefecimento, a temperatura da água na caixa d'água de armazenamento (entrada do sistema), a temperatura da água na calha de coleta (saída do sistema), bem como tensões e correntes de cada sistema. O período diário considerado é entre as 9 e as 17 horas.

A análise dos dados compreendidos no período entre dezembro de 2018 e janeiro de 2019 apresenta ganho percentual de potência de cerca de 3%. Os ganhos efetivos de potência e energia desta planta encontram-se em [5]. Esse percentual varia se comparado aos estudos internacionais, sendo cada caso analisado com suas particularidades. A Figura 11 exibe gráficos das potências, temperaturas e ganho percentual do dia 19 de janeiro de 2019.

Figura 11: Gráficos de potência, temperaturas e ganho de potência percentual do dia 19 de janeiro de 2019.



## VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposta para melhoria da eficiência energética de uma planta de geração fotovoltaica em uma instituição de ensino, por meio da implementação de sistema de arrefecimento com água de reuso proveniente de tratamento do esgoto do próprio Campus.

O sistema instalado foi apresentado, e o monitoramento e análise de dados possibilitarão avaliações tendo por referência estudos realizados em planta piloto. Assim, há uma expectativa na comprovação da melhoria da manutenção da capacidade de conversão de energia elétrica do sistema fotovoltaico por meio do uso de um sistema de arrefecimento com água de reuso.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, B. Seshadri, “Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review”, *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311-321, 2013.
- [2] J. Ji, J. Lu, T. Chow, W. He, G. Pei, “A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/ thermal water-heating system with natural circulation”, *Applied Energy, Elsevier Ltd*, vol. 84, pp. 222-237, 2007.
- [3] J. A. A. da Silva, Tratamento de dados meteorológicos e análise de desempenho do sistema fotovoltaico da EMC/UFG, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG, Goiânia, 2019.

- [4] J. T. Pinho, M. A. Galdino, *Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos*, Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, Março de 2014.
- [5] L. M. Santos, Estudos de melhoria da eficiência energética em painéis fotovoltaicos pela aplicação de água, Dissertação de Mestrado Profissional, PPG em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, Goiânia, 2018.
- [6] E. Almeida, A. C. Rosa, F. C. L. S. Dias, K. T. M. Braz, L. T. C. Lana, O. C. E. Santo, T. C. B. Sacramento, *Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica*, Universidade FUMEC, Março de 2016.
- [7] L. M. Santos et al, “Technical analysis of the application of water in the improvement of the electrical efficiency in photovoltaic panel”, In: *IEEE Chilecon*, 2017, Disponível em: <http://chilecon2017.ubiobio.cl/wp-content/uploads/2017/09/IEEE-Chilecon2017-Program-25-sept.pdf>.
- [8] A. F. A. Castanheira, J. F. P. Fernandes, P. J. Costa Branco, “Demonstration Project of a cooling system for existing PV power plants in Portugal”, *Applied Energy*, vol. 211, pp. 1297-1307, 2018.
- [9] L. Idoko, O. Anaya-Lara, A. McDonald, “Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique”, *Energy Reports*, vol. 4, pp. 357-369, 2018.
- [10] A. C. Vaz et al, Avaliação de água de reuso para utilização em melhoria de eficiência energética de painéis fotovoltaicos, *Congresso Sustentabilidade na Gestão Ambiental*, pp. 117-124, Lisboa, Portugal, 2019.