

ANÁLISE DE INEFICIÊNCIA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO QUANDO SUBMETIDO AO AMBIENTE DE INDÚSTRIAS CERÂMICAS

Álvaro Dantas de Medeiros Filho,

Resumo: O crescente uso da tecnologia fotovoltaica para a geração de energia elétrica ganha destaque em todo o país, proporcionando autonomia na geração de energia com uma vida útil em torno dos 25 anos, tornando-a viável a consumidores residenciais e empresários simultaneamente. A introdução de sistemas fotovoltaicos em indústrias de cerâmica vermelha é algo necessário. O gasto elevado em custo energético força as indústrias a procurarem a viabilização da instalação de sistemas fotovoltaicos, apesar de as indústrias de cerâmica vermelha disporem de ambientes propício ao acúmulo de fatores que ocasionam perda na eficiência do sistema fotovoltaico. Sendo assim, faz-se necessário um estudo de caso. O presente trabalho visou correlacionar os fatores de perda observados com eventuais perdas na eficiência de sistemas fotovoltaicos, e consequentemente uma diminuição na geração de energia elétrica. Assim, pode-se quantificar o impacto desses fatores, visando uma possível diminuição ou erradicação deles.

Palavras-chave: Módulo fotovoltaico; Energia solar; Energia sustentável.

1. INTRODUÇÃO

A principal fonte primária de energia do nosso planeta é o Sol. A superfície terrestre recebe continuamente uma quantidade de energia solar, essencialmente na forma de radiação, mais que suficiente para suprir as necessidades da população humana no globo. Apenas uma pequena parcela dessa energia é utilizada. Mesmo assim, com poucas exceções, direta ou indiretamente boa parte da energia usada pelo ser humano tem origem solar [1].

Com avanços tecnológicos houve uma maior acessibilidade e um incentivo considerável em relação ao uso de energias limpas e renováveis.

O Sol é uma fonte de energia renovável; sua utilização pode ser em formato de calor ou uma conversão direta de luz em eletricidade. Denominado como efeito fotovoltaico, essa transformação de luz em corrente elétrica acontece através da diferença de potencial existente em um material semicondutor, quando se é aplicado uma luz sobre ele [1].

A energia solar fotovoltaica é uma das fontes de energia renovável que mais cresce em todo o mundo, no Brasil ela ganha destaque por diversos fatores, fazendo com que empresários, instituições públicas e consumidores residenciais busquem ter acesso a esse sistema de geração de energia elétrica.

A implantação dessa energia em indústrias brasileiras de diversas áreas vem sendo cada vez mais frequente, pois considera-se a instalação de sistemas fotovoltaicos um bom investimento a longo prazo. Em comparação com outras indústrias a indústria de cerâmica vermelha demonstra uma insatisfação diante da instalação dessa tecnologia. Os sistemas fotovoltaicos instalados em área de indústrias de cerâmica vermelha apresenta uma perda na eficiência juntamente com uma incompatibilidade de geração entre os módulos de seu sistema. Com o presente trabalho, procura-se identificar os efeitos ocasionadores de perda em sistemas fotovoltaicos introduzidos em indústrias de cerâmica vermelha, assim viabilizando a instalação e operação de sistemas fotovoltaicos de energia de maneira eficiente.

2. ANÁLISE TEÓRICA

2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

A energia solar comparada às outras energias se destaca pela sua abundância e pelo fato de ter um enorme potencial a ser explorado. Foi observado que se conseguissem converter toda irradiância emitida pelo sol por apenas duas horas, seria suficiente para suprir o consumo energético anual da Terra [1].

O efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891), é o fenômeno físico que permite a conversão direta da luz em eletricidade [1]. Essa eletricidade é gerada a partir da diferença de potencial existente em um material semicondutor ao receber luz. O material denominado de semicondutor possui uma banda de valência, onde é permitida a presença de elétrons, e a banda de condução, sem a presença de elétrons. A faixa que fica entre essas duas bandas é chamada de banda proibida ou bandgap, representada por E_g e é a sua largura que determina se um material é semicondutor. Materiais isolantes, por exemplo, possuem um bandgap maior que 3 eV (elétron-volt), enquanto um material semicondutor apresenta um bandgap médio de 1 eV. Assim, os fótons com energia superior à banda proibida, ao incidirem sobre esse material poderão excitar os elétrons da banda de valência para banda de condução [1].

Para aplicação fotovoltaica o condutor de silício é largamente utilizado. Os átomos do silício se caracterizam por possuir quatro elétrons que se ligam aos elétrons vizinhos, formando uma rede cristalina. Esta rede pode ser dopada com átomos de outros materiais que possuam características de doadores de elétrons ou receptores de elétrons, que é o caso do fósforo e do boro, respectivamente. Se à rede cristalina do silício forem adicionados átomos de fósforo, que possuem cinco elétrons de ligação, haverá então nove elétrons e um deles estará fracamente ligado ao átomo. Portanto o fósforo é um dopante doador de elétrons, conhecido como dopante n . Já no caso de uma dopagem da rede com átomos de três elétrons de ligação, como o átomo de boro, haverá a falta de um elétron. Essa falta do elétron é chamada de lacuna ou buraco. Por este motivo o átomo de boro é um dopante do tipo p , receptor de elétrons [1]. Ao se introduzir a uma face do silício puro átomos de boro e em outra face átomos de fósforo, forma-se uma junção chamada de pn . Assim os elétrons livres de n passam para a face p e os buracos da face p passam para a n , tornando a face p carregada negativamente devido ao excesso de elétrons e a face n eletricamente positiva devido ao acúmulo de lacunas. Quando a junção pn é exposta à energia solar, os fótons com energia superior ao bandgap ($E_f > E_g$) formarão pares elétron-lacuna, acelerando as cargas onde o campo elétrico é diferente de zero, gerando então uma corrente entre a junção e criando-se uma diferença de potencial. Ao se colocar um fio elétrico entre essas duas faces, surge a circulação de corrente elétrica. Este é o funcionamento básico de uma célula fotovoltaica [1].

Após a criação de corrente elétrica na célula fotovoltaica existem dois meios de fazer uso da energia, seja através de um sistema fotovoltaico isolado (SFI) ou um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (SFCR).

Denominado de autônomos, os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI) são normalmente instalados em locais sem acesso à rede elétrica, e necessitam de um elemento armazenador de energia [2]. Este elemento armazenador de energia é normalmente um conjunto de baterias que armazena a energia gerada durante o período do dia com luz solar e fornece essa energia durante a noite ou quando não há radiação solar. O fornecimento dessa energia pode ser tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada com a utilização de um inversor. Esse sistema também possui um controlador de carga que controla a carga e a descarga do banco de baterias [1,2].

Segundo Rüther [3], uma característica fundamental de sistemas fotovoltaicos instalados no meio urbano é principalmente a possibilidade de interligação à rede elétrica pública, dispensando assim os bancos de baterias necessários em sistemas do tipo autônomo e os elevados custos e manutenções decorrentes. Estes sistemas são chamados de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR) e são instalados de modo que, quando o gerador elétrico produz mais do que o necessário para o consumidor, o excesso é injetado na rede elétrica, essa instalação consumidora acumula então um crédito energético. Já se a geração for abaixo da energia demandada pela instalação consumidora, essa falta é suprida pela rede elétrica. De acordo com Urbanetz (2010) os SFCR's são vistos como uma forma de geração distribuída (GD) ao longo dos alimentadores da rede elétrica de distribuição, em baixa ou média tensão, e contribuem para disponibilizar energia próxima ao ponto de consumo. Este sistema é basicamente constituído pelo painel fotovoltaico e o inversor, assim uma de suas vantagens é a não utilização de elementos para armazenar a energia, já que toda a energia gerada é colocada em paralelo com a energia da rede [3].

2.2 FATORES QUE AFETAM CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

2.2.1 Efeito da irradiância solar

De forma semelhante ao que ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos módulos fotovoltaicos (células fotovoltaicas associadas e confinadas em uma moldura) é diretamente influenciado pela irradiância solar e pela temperatura submetida às células. A corrente elétrica gerada pelo módulo aumenta com o aumento da irradiância solar. A corrente de curto-circuito (maior valor em corrente disponibilizado pelo módulo quando a tensão nos terminais é zero) tem um aumento linear com a irradiância, como mostra a Figura 1 [1].

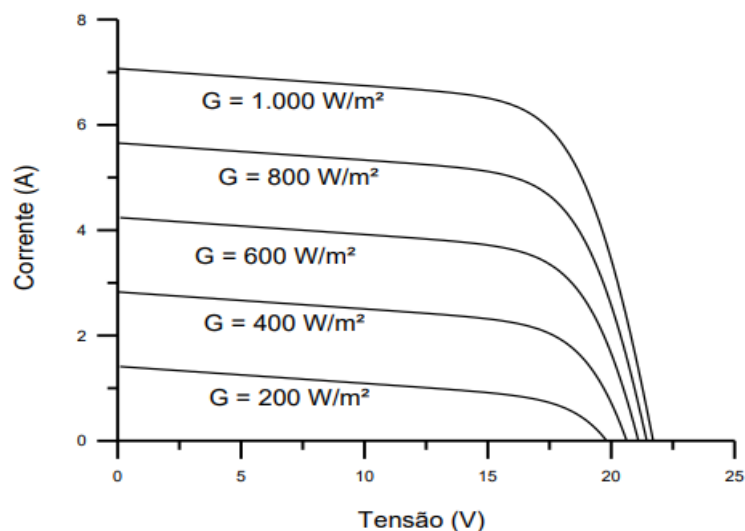


Figura 1. Resultante em gráfico da variação da irradiância solar sobre módulo fotovoltaico à 25°C, obtendo curva característica *I-V*. [1]

2.2.2 Efeito da temperatura

A incidência de radiação solar e a variação da temperatura do ambiente implicam em uma variação de temperatura nas células que compõem os módulos. A Figura 2, mostra curvas *I-V* para diversas temperaturas de célula, deixando evidente que há uma queda de tensão importante com o aumento da temperatura da célula. A corrente sofre uma elevação muito pequena que não compensa a perda causada pela diminuição da tensão do sistema [1].

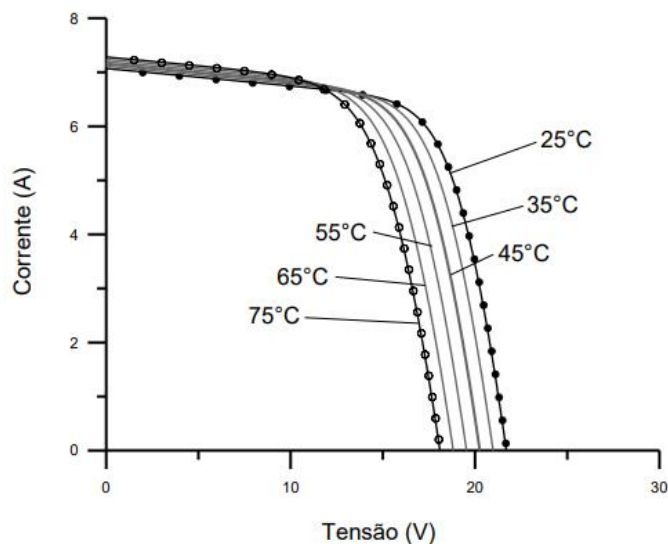


Figura 2. Gráfico relacionado à variação de temperatura em módulo fotovoltaico, explanado em sua variação de curva I - V característica para cada valor. [1]

Uma vez que as condições-padrão de ensaio não representam, na maioria dos casos, condições operacionais reais, as normas definem uma temperatura nominal para a operação das células nos módulos, na qual as características elétricas podem se aproximar mais das características efetivas verificadas em campo. Cada módulo responde de uma maneira, variando de acordo com o semicondutor utilizado e quantidade de células. Obtendo uma variação de valores para as temperaturas nominais de suas células, que é utilizada para determinar quais módulos obtêm uma eficiência melhor em ambientes adversos que poderá ser introduzido [1].

2.2.3 Efeitos de sombreamento

Os módulos contêm células fotovoltaicas associadas em série. Quando uma ou mais destas células recebe menos radiação solar do que as outras da mesma associação, sua corrente vai limitar a corrente de todo o conjunto série. Esta redução de radiação incidente pode ocorrer por um sombreamento parcial do módulo, depósito de sujeira sobre o vidro, ou algo que tenha caído sobre o módulo, dentre outras possibilidades. O efeito de redução de corrente no conjunto de células do módulo acaba sendo propagado para todos os módulos conectados em série. Além da perda de potência no gerador fotovoltaico, há o risco de danos ao módulo parcialmente sombreado, uma vez que a potência elétrica gerada que não está sendo entregue ao consumo é dissipada no módulo afetado, às vezes sobre apenas uma de suas células. Neste caso pode ocorrer o fenômeno conhecido como “ponto quente” (por vezes referenciado no Brasil pelo termo inglês “hotspot”), que produz intenso calor sobre a célula afetada, com ruptura do vidro e fusão de polímeros e metais [1].

A Figura 3 mostra o efeito do sombreamento sobre apenas uma das células de um dos 4 módulos conectados em série. Ao cobrir a metade de uma das células, a corrente daquele módulo é reduzida pela metade. Como consequência, a corrente de todos os módulos no conjunto em série também é reduzida.

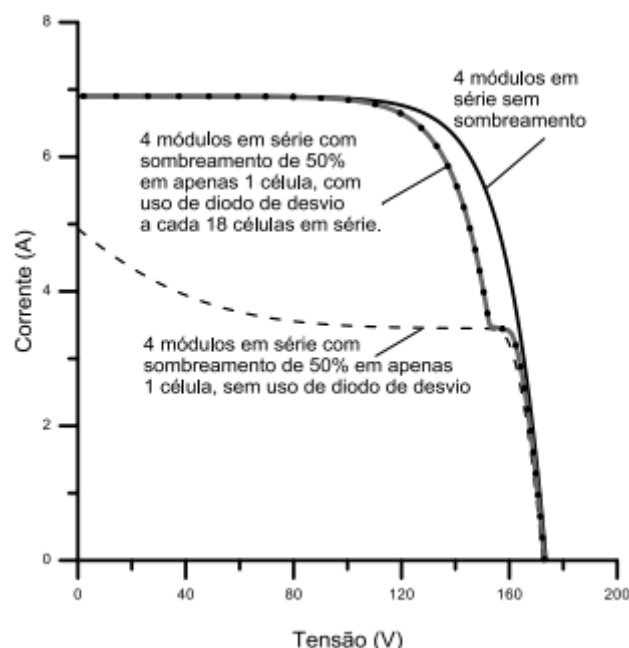


Figura 3. Curva I - V para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva I - V para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma de suas células, que passa a receber 50 % da irradiância original (linha tracejada); curva I - V com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos). [1]

2.2.3 Efeito de sujidade

A sujidade, também conhecido do inglês como “Soiling”, refere-se às partículas de contaminação sob superfícies ópticas, sendo que estas causam um impacto significativo de deterioração e perda de eficiência energética devido às perdas por absorção, dispersão da luz incidente e excesso de calor em ponto específico [4]. Embora os estudos relacionados a melhora do desempenho fotovoltaico tenham avançado ao longo dos anos, a interferência de fatores ambientais e naturais, tais como: poeira, maresia, excrementos de pássaros, neve, etc., resultam na ineficiência do desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Desta forma, para garantir a eficiência ideal e rendimento energético máximo, é necessário manter o sistema limpo e se possível livre dos empecilhos citados [5].

Um importante fator que é de grande influência sobre a deposição de poeira sobre os painéis fotovoltaicos está diretamente relacionado ao seu ângulo de inclinação. Desta forma, se o módulo estiver a uma inclinação de 0° , o acúmulo de impurezas sobre o painel será grande como é demonstrado na Figura 4. Onde o módulo está submetido a variações curtas de angulação, enquanto se estivesse a 90° a quantidade seria muito menor devido à autolimpeza, ocasionado pelas chuvas e também em virtude da ação da gravidade [4].



Figura 4. Superfície de módulo fotovoltaico parcialmente coberto por uma fina camada de areia. (Autoria própria)

3. METODOLOGIA

Para a pesquisa foi feito uso de equipamentos e aplicativos distintos que manipulados de maneira correta conseguiram trabalhar em prol de um único propósito, que se trata da identificação de efeitos ocasionadores de perda em sistemas fotovoltaicos introduzidos a indústrias de cerâmica vermelha.

Um módulo fotovoltaico de 10 W foi utilizado para geração de energia e um multímetro digital acoplado ao módulo. Um resistor de 15 Ω foi utilizado em série com o sistema para proporcionar uma melhor segurança numa possível oscilação repentina de corrente. O sistema foi montado sobre uma estrutura a partir de conexões e canos de Policloreto de polivinila (PVC), conforme mostrado na Figura 5.



Figura 5. Aparato montado (Autoria própria)

O módulo fotovoltaico disponibiliza de uma potência máxima de 10W, valores em voltagem que vão de 0 V a 22 V e correntes que variam entre 0 A e 0,56 A de acordo com a incidência sobre a superfície do mesmo.

A medição da geração foi feita acoplando o multímetro aos terminais do módulo, tanto para medição da voltagem quanto da corrente. Para a amperagem foi medida a corrente de curto-circuito, que se trata do maior valor de corrente fornecido pelo módulo [6].

Duas indústrias de cerâmica vermelha, localizadas na cidade de Carnaúba dos Dantas-RN, disponibilizaram seus espaços para a pesquisa: J. A. Dantas e Família e Cerâmica Chico de Keka. A análise das áreas para a pesquisa foram feitas antes da montagem da aparelhagem. O intuito foi escolher um local propício para a instalação de uma possível usina fotovoltaica de energia, onde a coleta de dados se assemelha o máximo com o que poderia acontecer com um sistema mais complexo.

Para o análise da direção do vento foi usado um aplicativo para Android que tem por objetivo fazer uma estimativa do valor em graus que seria disponibilizado por uma bússola.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presença do módulo fotovoltaico em duas indústrias cerâmicas foi essencial para se efetuar o análise dos ocasionadores de ineficiência no sistema, tudo aquilo que pode-se considerar um empecilho na introdução da tecnologia no ambiente da indústria, tendo em vista que o intuito da pesquisa esteja relacionado a viabilização da introdução da tecnologia em cerâmicas.

Na cerâmica J.A. Dantas e Família o módulo obteve valores consideravelmente bons (dias ensolarados sem presença de nuvens), até que a chaminé do forno de uma indústria cerâmica vizinha, em momento de queima, lançou uma nuvem de fumaça sobre o aparato. A fumaça ocasionou um sombreamento parcial no módulo que refletiu em uma queda drástica em sua geração de energia, seguidos de ventos que traziam consigo barro em formato de poeira, algo que agrava mais a situação.

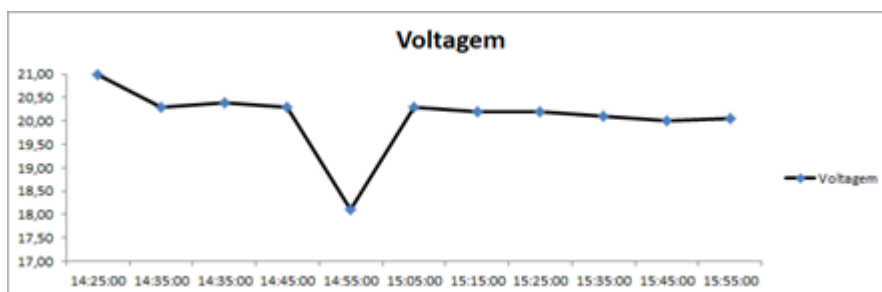
A Figura 6 demonstra a Indústria Cerâmica J.A. Dantas e Família e consequentemente o local de instalação do aparato. A indústria causadora da nuvem de fumaça fica localizada ao lado esquerdo da imagem.



Figura 6. Indústria Cerâmica J.A. Dantas e Família (Autoria própria)

A Figura 7-a e 7-b representa em gráfico os dados obtidos em volt e ampere, respectivamente, demonstrando em números o comportamento do módulo ao ser introduzido no ambiente da indústria. Tanto a voltagem quando a amperagem tem um decaimento contínuo, referente ao acúmulo de poeira sobre o aparato que ocasiona uma incompatibilidade de geração entre as células refletindo na geração do módulo como um todo.

(a)



(b)

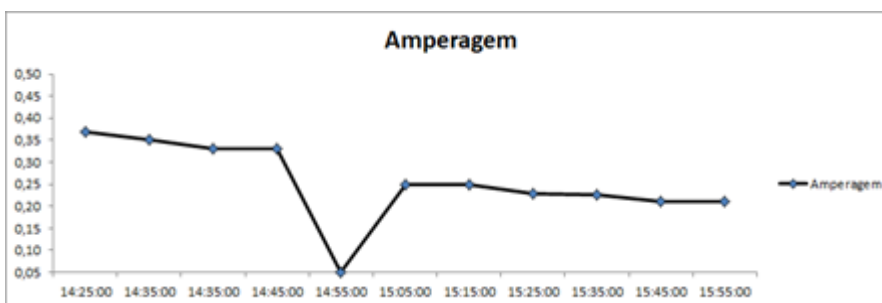


Figura 7-a, 7-b. Representação gráfica de dados obtidos na Indústria Cerâmica J.A. Dantas e Família. (Autoria própria)

Na Indústria Cerâmica Chico de Keka, há grande quantidade de impurezas, referente a correntes de ar que carregam consigo poeira e empecilhos causadores de *mismatch*. Devido a condição do tempo, nuvens dispersas, o sistema apresentou oscilações durante o período de tempo de duas horas e dez minutos, na última análise pela manhã após observar que sobre o aparato se fazia presente uma leve camada de poeira foi feita uma ligeira limpeza, o resultado foi uma crescente nos dados, provando que o acúmulo de poeira compromete a geração de energia do sistema como um todo.

Nas Figuras 8 e 9 demonstram o aparato instalado em um local sujeito a barro em formato de poeira proveniente do fluxo de automóveis existente ali próximo, algo que não existirá caso seja instalado uma Usina Fotovoltaica. O fluxo de automóveis ali próximo é o principal causador de ineficiência do módulo, causando um sombreamento parcial acarretando na geração incompatível entre as células fotovoltaicas existentes no módulo, fazendo se criar uma ineficiência do sistema como um todo.



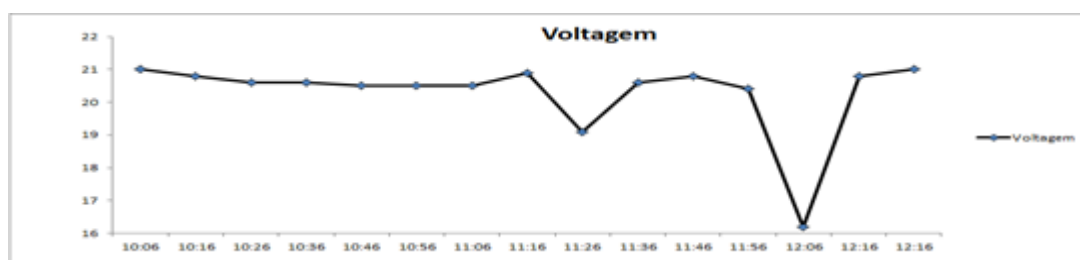
Figura 8. Aparato montado na Indústria Cerâmica Chico de Keka (Autoria própria)



Figura 9. Tráfego de caminhões dentro da Indústria Cerâmica Chico de Keka (Autoria própria)

A Figura 10-a, 10-b é uma resultante gráfica obtida através de dados colhidos pela manhã na indústria de cerâmica vermelha Chico de Keka. Devido a condição do tempo, nuvens dispersas, o gráfico apresentou oscilações durante o período de tempo de duas horas e dez minutos, na última coleta pela manhã após observar que sobre o aparato se fazia presente uma leve camada de poeira foi feito uma ligeira limpeza, o resultado foi uma crescente nos dados, provando que o acúmulo de poeira compromete a geração de energia como um todo.

(a)



(b)

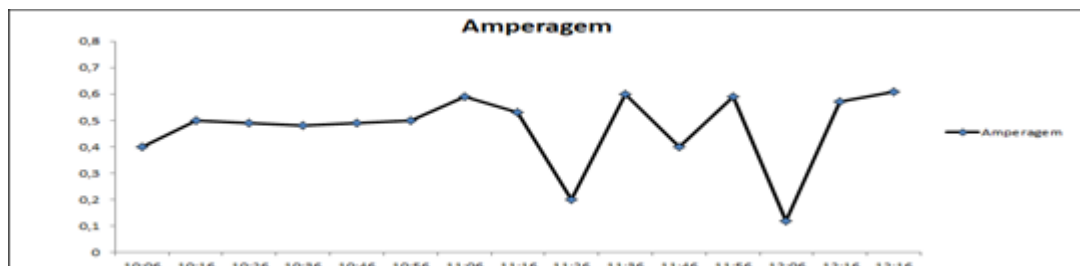


Figura 10. Representação gráfica de dados colhidos na Indústria Cerâmica Chico de Keka (Autoria própria)

O fator responsável por possíveis problemas de *mismatch*, incompatibilidade na geração individual das células fotovoltaicas, nos sistemas fotovoltaicos em ambas indústrias está diretamente ligado ao acúmulo de impurezas sobre a superfície do módulo fotovoltaico, nuvens natural e nuvens de fumaça criadas pela queima do material cerâmico, em ambos os casos a direção do vento é de extrema importância pelo fato de que ele dita por onde impurezas e empecilhos presentes no ar que habita aquela atmosfera deve seguir.

5. CONCLUSÃO

A partir do estudo exposto são confirmados os efeitos ocasionadores de perda em sistemas fotovoltaicos introduzidos a indústrias de cerâmica vermelha, que influenciam diretamente na eficiência do sistema fotovoltaico, diminuindo consideravelmente sua geração de energia. Confirmou-se que os principais fatores de perda estão relacionados ao acúmulo de impurezas sobre o módulo e nuvens de fumaça provenientes da queima dos materiais cerâmicos. Ambos os fatores ocasionam um sombreamento parcial da célula, acarretando numa queda na eficiência do sistema fotovoltaico como um todo.

Um estudo como esse é importante para indústrias de cerâmica vermelha, ou qualquer outro empreendimento, pelo fato de que ele visa analisar os fatores que ocasionam perda na eficiência do sistema fotovoltaico, assim proporcionando um melhor desempenho ao otimizar todo um sistema para a geração de energia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CRESESB. 2014
- [2] URBANETZ JR, J.; CASAGRANDE JR, E.; TIEPOLO, G. M. **Acompanhamento do desempenho do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica do escritório verde da UTFPR**. IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. 2014a.
- [3] RÜTHER, R. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: LABSOLAR, 2004.
- [4] SAYYAH, Arash; HORENSTEIN, Mark N.; MAZUMDER, Malay K.. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. Solar Energy.
- [5] MAGHAMI, Mohammad Reza et al. Power loss due to soiling on solar panel: A review. Renewable And Sustainable Energy Reviews

[6] VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.