

ANÁLISE QUÍMICA PRELIMINAR DA SUJIDADE DEPOSITADA EM DUAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NA ZONA URBANA DE FORTALEZA

Danielly Norberto Araujo (UFC) - danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Marcelo Ferreira Freitas Filho (UFC) - marcelinho_617@hotmail.com

PAULO C. M. CARVALHO (UFC) - carvalho@dee.ufc.br

Jose Marcos Sasaki (UFC) - sasaki@fisica.ufc.br

Resumo:

Sujidade é um dos parâmetros ambientais que mais afeta o desempenho de módulos Fotovoltaicos (FV), sendo apenas menos relevante do que a irradiação solar e a temperatura. A redução do desempenho FV devido à sujidade é influenciada não apenas pela quantidade acumulada de sujeira, mas também por sua composição física e química. As características química e física da sujidade depositada são específicas do local/módulo em estudo, pois dependem das características morfológicas do solo do local em que os módulos FV estão instalados, entre outros fatores. O presente artigo visa analisar a composição química da sujidade depositada em duas plantas FV instaladas na zona urbana de Fortaleza - CE: a planta FV 1, de 6 módulos, possui potência instalada de 1,5 kWp e a planta FV 2, de 12 módulos, possui potência instalada de 3,9 kWp. Para isso, as técnicas de Difração de Raios-X (DRX) e da Fluorescência de Raios-X (FRX) são utilizadas para análise. São identificadas as fases cristalinas de SiO_2 , de Fe_2O_3 , de $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, de NaCl e de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, e é constatada a presença dos elementos químicos: alumínio, silício, ferro e cálcio. Apesar da proximidade física das plantas FV, é notada uma pequena diferença na contribuição de determinados elementos químicos na composição das amostras de sujidade. Além disso, é observado que as duas técnicas de análise utilizadas, DRX e FRX, são complementares, pois os dados do FRX auxiliam na identificação das fases pelo conjunto de picos dos difratogramas.

Palavras-chave: *Sujidade, Plantas Fotovoltaicas, Composição Química.*

Área temática: *Conversão Fotovoltaica*

Subárea temática: *Aspectos técnicos de sistemas fotovoltaicos instalados*

ANÁLISE QUÍMICA PRELIMINAR DA SUJIDADE DEPOSITADA EM DUAS PLANTAS FOTOVOLTAICAS INSTALADAS NA ZONA URBANA DE FORTALEZA

Danielly Norberto Araujo – danielly.araujo@ee.ufcg.edu.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas

Marcelo Ferreira Freitas Filho – marceloferreira@alu.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica, Laboratório de Energias Alternativas

José Marcos Sasaki – sasaki@fisica.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Física, Laboratório de Raios X

Resumo. *Sujidade é um dos parâmetros ambientais que mais afeta o desempenho de módulos Fotovoltaicos (FV), sendo apenas menos relevante do que a irradiação solar e a temperatura. A redução do desempenho FV devido à sujidade é influenciada não apenas pela quantidade acumulada de sujeira, mas também por sua composição física e química. As características química e física da sujidade depositada são específicas do local/módulo em estudo, pois dependem das características morfológicas do solo do local em que os módulos FV estão instalados, entre outros fatores. O presente artigo visa analisar a composição química da sujidade depositada em duas plantas FV instaladas na zona urbana de Fortaleza - CE: a planta FV 1, de 6 módulos, possui potência instalada de 1,5 kWp e a planta FV 2, de 12 módulos, possui potência instalada de 3,9 kWp. Para isso, as técnicas de Difração de Raios-X (DRX) e da Fluorescência de Raios-X (FRX) são utilizadas para análise. São identificadas as fases cristalinas de SiO_2 , de Fe_2O_3 , de $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, de NaCl e de $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, e é constatada a presença dos elementos químicos: alumínio, silício, ferro e cálcio. Apesar da proximidade física das plantas FV, é notada uma pequena diferença na contribuição de determinados elementos químicos na composição das amostras de sujidade. Além disso, é observado que as duas técnicas de análise utilizadas, DRX e FRX, são complementares, pois os dados do FRX auxiliam na identificação das fases pelo conjunto de picos dos difratogramas.*

Palavras-chave: *Sujidade, Plantas Fotovoltaicas, Composição Química.*

1. INTRODUÇÃO

A preferência pela utilização da energia solar para conversão em energia elétrica tem promovido vários estudos em relação aos fatores que afetam o desempenho dos módulos FV. Nesse contexto, parâmetros ambientais, tais como intensidade de irradiação solar, temperatura do ar, sujidade, umidade relativa e vento, possuem grande impacto no desempenho dos módulos (Kazem; Chaichan, 2016).

Sujidade é o terceiro parâmetro ambiental que mais afeta o desempenho de plantas FV, sendo apenas menos relevante do que a irradiação solar e a temperatura, e é devido ao acúmulo de partículas de poeira ou de outros contaminantes na superfície FV (Micheli et al., 2019). Poeira é definida como qualquer partícula de tamanho menor que 500 μm de diâmetro que entra na atmosfera por diferentes fontes como, por exemplos, vento, escapamento de veículos, erupções vulcânicas e poluição do ar (Darwish et al., 2015).

Poeira pode incluir pequenas quantidades de pólen, células humanas e de animais, carpetes, fibras têxteis (as vezes denominadas microfibras) e, mais comumente, minerais orgânicos de precipitação geomorfológica, como areia e argila. A composição da poeira, assim como outros fatores, varia de local para local, a depender das condições climáticas, geográficas e do grau de urbanização (Sarver et al., 2013). A redução no desempenho de módulos FV devido à sujidade depende não apenas da quantidade de sujeira acumulada, mas também da sua composição física e química (Saidan et al., 2016).

Exemplo disso é que em áreas urbanas espera-se que a sujidade coletada de superfícies FV seja dominada por poluentes provindos de emissões de veículos, por exemplo, enquanto que em locais de atividades agrárias, espera-se a presença de fertilizantes, areia ou matéria vegetal (Sarver et al., 2013). Em regiões desérticas, como o Oriente Médio, África do Norte e Índia, é esperado que a sujidade seja dominada por óxidos de silício, quartzo, illita, caulinita, esmectita, carbonatos, gipsita, feldspato e óxido de ferro (Kazmerski et al., 2016).

Em um estudo realizado na região Norte de Omã, país da península Arábia que possui uma grande área de extensão de deserto, é observado que a sujidade encontrada nos módulos FV é composta, principalmente, por óxidos de silício, como esperado. Além disso, em cidades industriais, é encontrada maior concentração de poluentes do que em cidades residenciais (Kazem e Chaichan, 2019). Em relação ao desempenho dos módulos FV, o maior declínio na produção de eletricidade foi em cidades industriais (18%) e o menor declínio em cidades residenciais (5,50%).

Em Évora e Alter do Chão, localizados na zona rural de Portugal, o impacto do transporte de poeira do Saara foi avaliado por Conceição et al. (2018). Para isso foram instalados vidros de alta transmitância em cada local e a sujeira encontrada, logo após os eventos de transporte de sujeira do Saara para Portugal, foi analisada. A sujidade em Alter do

Chão se apresentou de forma aglomerada, sendo composta, principalmente, por alumínio, silício e oxigênio, característicos em áreas desérticas. Já em Évora, as partículas de sujeira se apresentaram espalhadas e os principais componentes encontrados foram silício e cálcio, da areia do deserto e do mineral calcita.

Estudos sobre a sujeira em módulos FV têm se tornado crucial para entender as causas e efeitos no seu desempenho, e ainda, pesquisas realizadas a partir da deposição de sujeira natural são essenciais para o desenvolvimento de tecnologias de mitigação de sujeira, pois a composição química e a distribuição do tamanho das partículas determinam como a sujeira interage com a superfície FV e, portanto, afeta a aplicabilidade e a eficácia das técnicas de mitigação (Javed et al., 2017).

Logo, sabendo da importância e da necessidade da caracterização da sujeira em módulos FV, o presente artigo tem como objetivo realizar a análise da composição química da sujeira depositada em plantas FV instaladas no Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC). O LEA-UFC está localizado na zona urbana da cidade de Fortaleza, Ceará, próximo à uma avenida de grande movimentação de veículos (Av. Mister Hull).

A análise química da sujeira é realizada a partir das técnicas DRX e FRX. A técnica DRX utiliza a propriedade da difração aplicada aos raios-X, possibilitando a obtenção de importantes informações referentes à rede cristalina, tais como a identificação e a quantificação das fases presentes em uma planta policristalino multifásico, análise do tamanho do cristalito e a deformação da rede cristalina (Cullity, 2001).

Já a técnica de FRX permite identificar os elementos presentes em uma amostra e estabelecer a proporção em que cada elemento. Uma fonte de radiação de elevada energia (raios-X) provoca a excitação dos átomos da substância que se pretende analisar. A técnica é precisa, rápida e não-destrutiva para análises elementares, tanto quantitativas quanto qualitativas usando o princípio de medida dos comprimentos de onda e intensidade das radiações emitidas pelos elementos (Callister e Rethwisch, 2008).

2. METODOLOGIA

As amostras de sujeira foram coletadas a partir de duas plantas FV que estão instaladas no LEA. Essas plantas são interligadas à rede elétrica da UFC, estão orientadas para o norte geográfico e possuem ângulo de inclinação de 10°. A planta FV 1 foi instalada em julho de 2016, possui potência instalada de 1,50 kWp e é composta por 6 módulos YL250P-29b conectados em série. Já a planta FV 2 foi instalada em setembro de 2018, possui potência instalada de 3,90 kWp e é composta 12 módulos JKM325PP distribuídos em duas *strings* com 6 módulos, cada *string*. Na Fig. 1 é mostrada a visão aérea da instalação das plantas no LEA, evidenciando a proximidade do laboratório com a avenida.



Figura 1 – Visão aérea das plantas FV do LEA – UFC.

A coleta da sujidade das duas plantas foi realizada no dia 30/09/2019, sendo observado que a última chuva registrada anterior ao dia 30 mencionado foi no dia 22/09/2019 de 0,20 mm. A sujidade se apresentou de forma concentrada nas bordas inferiores dos módulos das plantas FV, indicando que a chuva registrada no dia 22/09/2019 não possuiu efeito de limpeza, além disso, dejetos de pássaros foram encontrados. Nas Fig. 2 e 3 são mostradas as condições de sujidade encontradas nos módulos FV das plantas 1 e 2, respectivamente, no dia 30/09/2019.



Figura 2 – Sujidade encontrada nos módulos FV da planta1.



Figura 3 – Sujidade encontrada nos módulos FV da planta2.

No processo da coleta da sujidade, utilizou-se uma espátula de plástico e um pincel, além disso, a fim de evitar contaminação da sujeira, houve a esterilização do material utilizado na coleta e o uso de uma luva, como pode ser observado na Fig. 4.



Figura 4 – Processo de coleta da sujidade.

A análise da composição química da sujidade das plantas FV foi realizada no Laboratório de Raios-X (LRX) da UFC e as técnicas de DRX e de FRX foram utilizadas. O método de DRX foi realizado em um difratômetro do modelo XPert Pro MPD® – PANalytical, cujo princípio de funcionamento baseia-se na difração, que é o desvio que a luz, ou no caso o raio-x, sofre ao ser espalhado pelos elementos atômicos que formam os planos cristalinos.

A caracterização dos compostos presentes na amostra baseia-se na análise do espectro emitido com a variação do ângulo de incidência (ângulo de Bragg), cada composto possui seus picos característicos, porém vale ressaltar que as confirmações dos resultados só podem ser realizadas por meio de cálculos, sendo a análise dos picos algo preliminar. Para o presente artigo a posição angular (2θ) foi definido entre 10° e 100° , a fim de abranger um grande intervalo.

O FRX foi realizado no ZSXMini II – Rigaku® e baseia-se num princípio básico da química que é o salto eletrônico. Ao receber energia o elétron salta para uma camada mais externa e ao retornar a camada original à energia é emitida na forma de fóton. Cada elemento químico possui sua emissão de energia característica. O equipamento utilizado abrange um espectro, em relação à tabela periódica, do flúor ao urânio, sendo uma análise semi-quantitativa, podendo ser em forma elementar ou em forma de óxido, no presente trabalho foi realizada uma análise elementar, vale ressaltar que também poderia ser realizada uma análise dos óxidos, porém a análise elementar foi escolhida, pois ela auxilia também na análise dos resultados do DRX.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na presente seção são apresentados os resultados e discussões acerca do estudo da composição da sujidade coletada nas duas plantas FV do LEA.

3.1 Análise por FRX (Semi-quantitativa)

A partir da análise elementar utilizando o princípio do FRX, por meio das Tab. 1 e 2, que o alumínio (Al), o silício (Si), o cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K) e o Cloro (Cl) são os elementos mais abundantes na amostra coletada das plantas FV. O equipamento utilizado nesta análise abrange a um intervalo dos elementos químicos do flúor ao urânio, o que não inclui o carbono, que possivelmente está presente devido à proximidade do laboratório com a Av. Mister Hull, pois os hidrocarbonetos são os principais componentes da combustão realizada em motores de veículos.

Os resultados encontrados a partir da técnica FRX são condizentes com o esperado, pois segundo Morawska e Zang (2002), compostos como alumínio e ferro são comumente oriundos de transporte rodoviário, especificamente do desgaste do motor de veículos. Além disso, Al, Si, K, Ca, Ti e Fe podem ser originários das partículas suspensas advindas do solo. A presença de Cl é explicada pelo fato de Fortaleza ser uma cidade litorânea.

Tabela 1 – Dados do FRX da planta1

Elemento químico	Porcentagem em massa (%)
Si	36,6740
Fe	19,5480
Ca	18,2730
Al	8,8692
K	6,7172
Cl	4,1792
Ti	2,3395
S	0,9433
Zn	0,8499
Mn	0,6313
P	0,4322
Zr	0,2955
Cu	0,1250
Sr	0,1228

Tabela 2 – Dados do FRX da planta2

Elemento químico	Porcentagem em massa (%)
Si	40,2330
Fe	17,2820
Ca	17,1800
Al	10,3060
K	6,4511
Cl	2,8078
Ti	2,7184
S	0,6923
Zn	0,6205
Mn	0,5592
P	0,5036
Zr	0,3366
Cu	0,1741
Sr	0,1349

3.2 Análise por DRX

O software *X-Pert Highscore Plus*, Panalytical B.V. Almelo, Holanda, © 2001 Koninklijke Philips Electronics N.V (All rights reserved) foi utilizado para identificação das fases correspondentes aos compostos químicos das amostras de sujidade, por meio da comparação entre a fase de cada composto químico do banco de dados, que foi refinado por meio da seleção na tabela periódica dos elementos químicos mais presentes no FRX, dos com a fase obtida no DRX.

Na planta FV 1, foram identificados os seguintes componentes com alta probabilidade de ocorrência: SiO₂, que pode ter como fonte a areia, Fe₂O₃, que pode ter como origem de elementos ferrosos, de NaCl, possivelmente originária da salinidade oriunda do oceano, já que Fortaleza é uma cidade litorânea, KAl₂(AlSi₃O₁₀)(OH)₂, mineral do grupo dos silicatos que pode ter como origem rochas sedimentares, C₆H₈O₆, composto de origem orgânica.

Os resultados obtidos da análise da planta FV 1 se assemelham com os da planta FV 2, diferindo apenas na amplitude dos picos. Tal fato era esperado, pois as plantas possuem as mesmas características de instalação, estando localizadas no mesmo telhado, possuindo o mesmo ângulo de inclinação e mesma direção. Nas Fig. 5 e 6 são apresentados os resultados obtidos da técnica DRX para as plantas FV 1 e 2, respectivamente.

Há de enfatizar que a análise por meio do software *X-Pert Highscore Plus* não é totalmente precisa, pois o programa trabalha com probabilidades, sendo então necessário a realização de uma análise chamada de refinamento estrutural, por meio do método Rietveld de refinamento estrutural para a confirmação dos resultados.

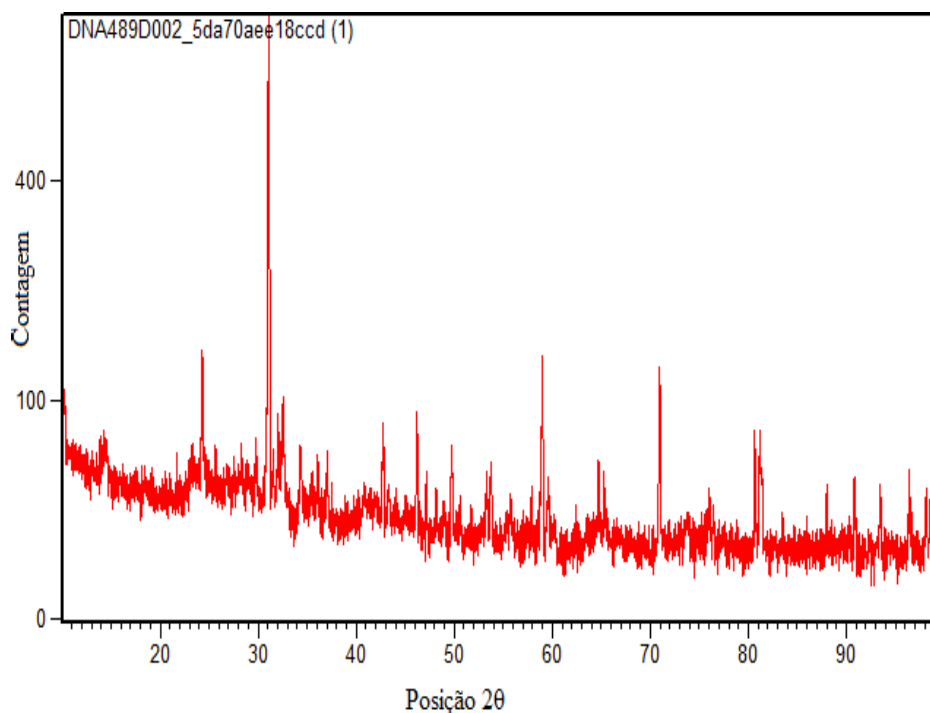


Figura 5 – Difratoograma da amostra da planta FV 1.

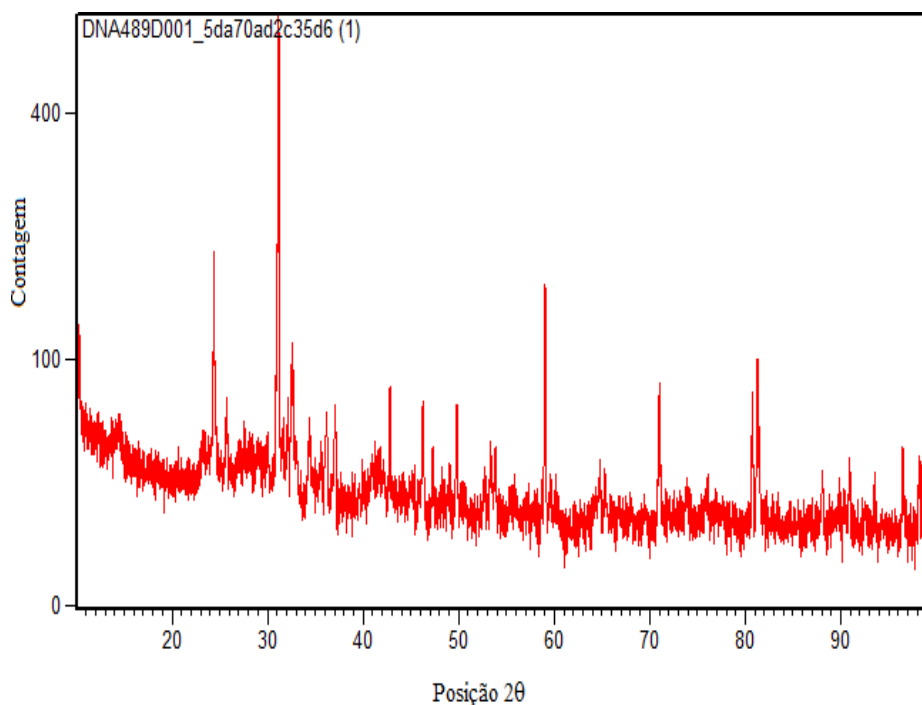


Figura 6 – Difratoograma da amostra da planta FV 2.

4. CONCLUSÃO

A redução do desempenho de módulos FV devido à sujidade é influenciada não só pela quantidade de sujeira acumulada, mas por outros fatores também, como a composição química das partículas de sujeira, por exemplo. No presente artigo, foi realizada uma análise da composição química da sujidade de duas plantas FV instaladas no LEA-UFC, que está localizado na cidade de Fortaleza, próximo a uma avenida de grande movimentação de veículos. As técnicas de análise DRX e FRX foram utilizadas para caracterização química da sujidade das plantas FV, sendo visto que as sujidades das duas plantas foram semelhantes, já que estão localizadas no mesmo telhado. Além disso, a composição química da sujidade das plantas foi condizente com a literatura, sendo encontrados elementos químicos na

técnica FRX como Si, Al, Fe, Ca e Ti, que podem ser decorrentes da sujidade oriunda da avenida e de solo re-suspenso. Na técnica DRX foram encontrados compostos como: SiO_2 , Fe_2O_3 , NaCl , $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ e $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$. Os resultados obtidos da análise da planta FV 1 se assemelham com os da planta FV 2, diferindo apenas na amplitude dos picos noDRX.

Agradecimentos

Danielly Norberto Araújo agradece à CAPES pela bolsa de mestrado e Paulo C. M. Carvalho agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador concedida e pelo suporte financeiro ao projeto (420133/2016-0 Universal 01/2016). Os autores agradecem à Estação Agroclimatológica do Centro de Ciências Agrárias da UFC pela disponibilidade dos dados de precipitação e à UFC pela disponibilidade de laboratórios e equipamentos.

REFERÊNCIAS

- Callister Jr, W. D., e Rethwisch, D. G. (2008). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*, 7 Edição. Rio de Janeiro, LTC Editora.
- Conceição, R., Silva, H. G., Mirão, J., Gostein, M., Fialho, L., Narvarte, L., e Collares-Pereira, M. (2018). Saharan dust transport to Europe and its impact on photovoltaic performance: A case study of soiling in Portugal. *Solar Energy*, vol. 160, pp.94-102.
- Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray Diffraction*. Vol. 3. New Jersey: Prentice hall.
- Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M. A., e Alawadhi, H. (2015). Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 735-744.
- Javed, W., Wubulikasimu, Y., Figgis, B., e Guo, B. (2017). Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha, Qatar. *Solar Energy*, vol. 142, pp.123-135.
- Kazem, H. A., e Chaichan, M. T. (2016). Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman. *Solar Energy*, vol. 139, 68-80.
- Kazem, H. A., e Chaichan, M. T. (2019). The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels' outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman. *Solar Energy*, 187,30-38.
- Kazmerski, L. L., Diniz, A. S. A., Maia, C. B., Viana, M. M., Costa, S. C., Brito, P. P., ... & de Oliveira Cruz, L. R. (2016). Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale. *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, n. 3, pp.719-729.
- Lawrence, C. R., e Neff, J. C. (2009). The contemporary physical and chemical flux of aeolian dust: A synthesis of direct measurements of dust deposition. *Chemical Geology*, vol. 267, n. 1-2, pp. 46-63.
- Micheli, L., Deceglie, M. G., e Muller, M. (2019). Predicting photovoltaic soiling losses using environmental parameters: An update. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 27, n. 3, pp. 210-219.
- Morawska, L., e Zhang, J. J. (2002). Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, vol. 49, n. 9, pp. 1045-1058.
- Saidan, M., Albaali, A. G., Alasis, E., e Kaldellis, J. K. (2016). Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 499-505.
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., e Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 22, pp. 698-733.

CHEMICAL ANALYSIS OF THE DEPOSITED SOILING ON PHOTOVOLTAIC PLANTS INSTALLED IN THE URBAN AREA OF FORTALEZA

Abstract. *Soiling is one of the environmental parameters that most affect the performance of Photovoltaic (PV) modules, being only less relevant than solar irradiation and temperature. The reduction in PV performance due to soiling is influenced not only by the accumulated amount of soiling, but also by its physical and chemical composition. The chemical and physical characteristics of the deposited soiling are specific to the site/module under study, as they depend on the soil morphological characteristics of the place where the PV modules are installed, among other factors. This paper aims to analyze the chemical composition of the soiling deposited in two PV plants installed in the urban area of Fortaleza-CE: plant 1, of 6 modules, has installed capacity of 1.5 kWp and plant 2, of 12 modules, has installed power of 3.9 kWp. For this, X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Fluorescence (XRF) techniques are used for analysis. The crystalline phases of SiO_2 , Fe_2O_3 , $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$, NaCl and $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ are identified, and the presence of the chemical elements: aluminum, silicon, iron and calcium is found. Despite the physical proximity of the PV plants, which belong to the same roof, there is a slight difference in the contribution of certain chemical elements in the composition of soil samples. In addition, it is observed that the two analysis techniques used, DRX and FRX, are complementary since the FRX data help in the identification of the phases by the diffractogram peaksets.*

Key words: *Soiling, Photovoltaic Plants, Chemical Composition.*