

Instrumentação para mitigação do acúmulo de poeira estática em espelhos de detectores usados no controle da qualidade da fabricação de tubos de vidro FIOLAX®

Instrumentation for mitigating the static dust accumulation on detector's mirrors used in the quality control of the manufacture of FIOLAX® clear glass tubes

Lihoy Aguiar Bellissimo* e Alexandre Mello†

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

Laboratório de Lasers, Fotônica e Plasma Aplicado (LAPA/COMAN)

Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 - Ed. Cesar Lattes.

Urca, Rio de Janeiro - RJ. CEP 22290-180

Fabrizio F. Borghi‡

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Av. Athos da Silveira Ramos, 149 - Centro de Tecnologia – bloco A

Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ. CEP: 21941-909

Submetido: 13/06/2023

Aceito: 21/07/2024

Resumo: Este artigo tem por objetivo abordar a construção de uma instrumentação para a mitigação do acúmulo de poeira estática na superfície de espelhos de detectores industriais usados no controle de qualidade da fabricação de tubos FIOLAX® *clear* instalados nas linhas de produção em ambiente de indústria vidreira. A produção de tubos de vidro conta com diversos equipamentos para garantir a qualidade de produção e as especificações do produto. Dentre esses equipamentos estão os detectores de defeitos que possuem espelhos que refletem a superfície do tubo de vidro para os sensores que posteriormente serão transformados em imagens e sinais a serem analisados por um software especialmente desenvolvido para essa finalidade. O acúmulo de poeira estática na superfície do espelho afeta diretamente a detecção pois interfere no sinal enviado às câmeras dos detectores, acarretando na parada da linha de produção devido a necessidade de manutenção no equipamento para limpeza ou troca dos espelhos, gerando uma perda de até quinze horas mensais de produção. O método utilizado aborda uma combinação de vidro recoberto por filme fino de FTO e jato de ar ionizado, mudando a energia elétrica estática de superfície para mitigar o acúmulo de poeira e a ação mecânica do sopro de ar para afastá-las da área de interesse. O tratamento com ar ionizado apresentou o melhor resultado, foram encontrados sete vezes menos concentração de grãos de poeira em comparação com apenas o fluxo de ar não-ionizado e quinze vezes menor se comparado com as amostras do grupo controle (sem nenhum tratamento).

Palavras chave: Espelhos, Poeira Estática, Filme Fino, FTO, Ar ionizado.

Abstract: This article aims to address the construction of an instrumentation to mitigate the accumulation of static dust on the surface of mirrors of industrial detectors used in the quality control of the manufacture of FIOLAX® *clear* tubes installed in production lines in a glass industry environment. The production of glass tubes relies on a variety of equipment to ensure production quality and product specifications. Among these equipment are the defect detectors that have mirrors that reflect the surface of the glass tube to the sensors that will later be transformed into images and signals to be analyzed by software specially developed for this purpose. The accumulation of static dust on the surface of the mirror directly affects the detection because it interferes with the signal sent to the cameras of the detectors, resulting in the stoppage of the production line

due to the need for maintenance on the equipment to clean or change the mirrors, generating a loss of up to fifteen monthly production hours. The method used approaches a combination of glass covered by FTO thin film and ionized air jet, changing the surface static electrical energy to mitigate the accumulation of dust and the mechanical action of air blowing to move them away from the area of interest. The treatment with ionized air showed the best result, seven times less concentration of dust grains were found in comparison with the non-ionized air flow alone and fifteen times lower when compared to the samples of the control group (without any treatment).

Keywords: Mirrors, Static Dust, Thin-Film, FTO, Ionized Air.

1. Introdução

1.1 Contextualização e Objetivo

O desenvolvimento deste trabalho é fruto da parceria do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) com a empresa SCHOTT Technologies Brazil Ltda. A SCHOTT Technologies Brazil faz parte da SCHOTT AG, um grupo industrial internacional de origem alemã dedicado à fabricação de vidros especiais para diversas finalidades, entre elas para a fabricação de vidros de envases farmacêuticos.

A produção de tubos de vidro FIOLAX® clear é essencial para a indústria farmacêutica pois está diretamente ligada ao envase, armazenamento e aplicação de medicamentos e substâncias controladas nas áreas de pesquisa e medicina. Através de uma cadeia de indústrias de transformação, os tubos são moldados e se tornam ampolas, seringas, carpules, entre outros com finalidades similares, figura 1.



Figura 1: Foto com exemplos de produtos que podem ser fabricados a partir de tubos de vidro FIOLAX®: a) carpule, b) seringa, c) ampola e d) frasco, respectivamente [1].

Para garantir a qualidade e as especificações do produto existem equipamentos medidores e detectores de defeitos nos tubos de vidro ao longo da linha de produção [2].

Em um ambiente industrial de produção vidreira há presença de diversos particulados de grãos de poeira em

suspensão no ar. Essa poeira afeta diretamente os detectores através do acúmulo de poeira nos espelhos onde a imagem da superfície do tubo é refletida para as câmeras que geram e enviam as imagens para um software de detecção e controle digital computadorizado.

O objetivo deste artigo é desenvolver uma instrumentação que mitigue o acúmulo de poeira na superfície do espelho de um detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro que estão passando na linha de produção. Os experimentos mencionados neste artigo ocorreram em ambiente real de produção industrial e os resultados foram obtidos em condições similares às de operação dos equipamentos instalados ao longo da linha de produção vidreira.

1.2 Detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro

A linha de produção de tubos de vidro FIOLAX® clear da SCHOTT Technologies Brazil possui alguns detectores de defeitos na superfície dos tubos de vidro. Dentre eles, alguns utilizam a técnica de reflexão da imagem da superfície do tubo de vidro através de um espelho de 1ª superfície com revestimento de alumínio [3]. O espelho de primeira superfície é aquele em que o revestimento reflexivo é aplicado diretamente sobre o vidro. Esse espelho é utilizado devido a sua característica reflexiva total dos objetos no primeiro plano a fim de não haver distorções e sombras fantasmas na imagem refletida [3]. O espelho é fixo na estrutura e faz um ângulo de aproximadamente 45° com a câmera que também é fixa na estrutura. A câmera, por sua vez, é conectada a um microcomputador que processa as imagens através de um software proprietário desenvolvido especificamente para essa finalidade. A figura 2, ilustra a montagem do aparato no equipamento detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro.

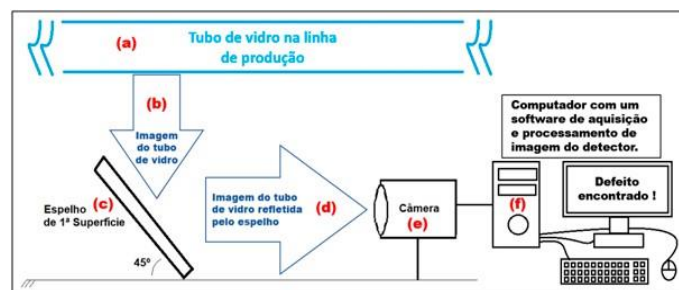


Figura 2: Diagrama ilustrado da montagem do equipamento detector de defeitos na superfície dos tubos de vidro: a) tubo de vidro na linha de produção, b) imagem do tubo de vidro, c) espelho de 1ª Superfície, d) imagem do tubo de vidro refletida pelo espelho, e) câmera e f) computador com software de aquisição e processamento de imagem do detector.

*Electronic address: lihayab@outlook.com

† Electronic address: mello@cbpf.br

‡ Electronic address: borghi@if.ufrj.br

1.3 Efeito eletrostático no acúmulo de poeira

Quando os grãos de poeira carregados eletricamente entram em contato com a superfície do espelho, há uma transferência de carga elétrica entre a poeira e a superfície do espelho, criando uma diferença de potencial elétrico. Essas diferenças de potencial elétrico estático são geradas pelas forças de Van der Waals [4], que faz com que os grãos de poeira adiram à superfície do espelho.

As forças de Van der Waals são conhecidas como forças eletrostáticas de baixa intensidade, normalmente variando entre 1 e 10 kcal/mol. Elas ocorrem entre átomos que não fazem parte de uma estrutura cristalina, seja ela iônica ou metálica. Essas forças são responsáveis pelas interações entre átomos e moléculas com orbitais saturados, onde a formação de ligações covalentes é inviável. Essas forças são classificadas como forças secundárias, podendo ser de natureza intra ou intermolecular, sendo principalmente do segundo tipo. No primeiro caso, elas desempenham um papel crucial na determinação da geometria de moléculas ligadas por ligações covalentes, enquanto no segundo caso, são responsáveis pela liquefação de gases como oxigênio, nitrogênio e argônio, bem como pela solidez dos polímeros em temperatura ambiente. Essas forças podem atuar em distâncias com pouco ou nenhum recobrimento eletrônico, porém diminuem rapidamente à medida que os átomos ou moléculas se afastam, sendo também superadas pelas forças de repulsão em caso de aproximação excessiva entre elas [5].

Além disso, o ar do ambiente de produção vidreira possui fatores, como a presença de poeira em suspensão proveniente da composição dos fornos, a radiação dos fornos e a alta temperatura no entorno das linhas de produção e fornos que pode chegar a até 1600 °C em algumas áreas. Essas características do ambiente podem levar a uma carga elétrica nos grãos de poeira em suspensão no ar, e, conforme Toth III et al. [6], influenciam suas trajetórias, tornando-os ainda mais suscetíveis à atração eletrostática pela superfície do espelho [7] [8].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Vidro recoberto por filme fino de *fluorine doped tin oxide* (FTO)

O filme fino de *fluorine doped tin oxide* (FTO) foi escolhido por sua transparência, absorvendo muito pouco dentro do espectro visível, não interferindo na detecção e na reflexão do espelho de 1ª superfície, e por sua condutibilidade elétrica. A condutibilidade elétrica do filme fino possibilita manipular a energia elétrica estática para evitar a adesão dos grãos de poeira na sua superfície [9] [10] [11].

2.2 Preparação das amostras de vidro recoberto por filme fino de FTO

O vidro com recobrimento de FTO utilizado foi doado pelo professor Carlos Ferreira do Instituto Militar de Engenharia. O FTO foi cortado em pedaços retangulares de 4 cm x 10 cm divididos posteriormente em retângulos de 4 cm x 8 cm, devido a necessidade de encaixe no suporte do experimento, utilizando um cortador de vidro manual, conforme

pode ser observado na montagem da figura 3.

Posteriormente o FTO foi limpo com álcool isopropílico e lenço para limpeza de lentes, e logo em seguida marcado com um gabarito para fins de padronização de uma área retangular analisada no microscópio de 1 cm x 2,5 cm.

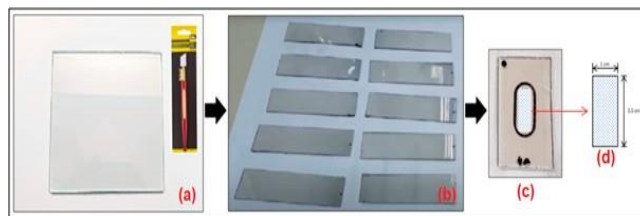


Figura 3: a) FTO de 20 cm x 20 cm + cortador de vidro manual; b) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 10 cm; c) FTO cortado em retângulos de 4 cm x 8 cm, marcado a caneta com um gabarito; d) área analisada de 1 cm x 2,5 cm.

2.3 Procedimento para determinação da quantidade de poeira aderida à superfície do vidro recoberto por filme fino de FTO

O espelho empoeirado foi analisado no microscópio do fabricante ZEISS modelo Axioplan do laboratório LabNano do CBPF.

O FTO foi analisado no microscópio óptico digital modelo EVOCAM II do fabricante *Vision Engineering* do laboratório de metrologia da *SCHOTT Technologies Brazil*. As amostras foram fotografadas pelo microscópio digital com uma resolução de 5MP utilizando uma placa de captura HDMI e as imagens analisadas no software ImageJ [28].

Através do software foi feito um recorte de área 1 cm x 2,5 cm horizontalmente no centro da amostra (item d, figura 3) e eliminado o fundo branco inicial da amostra. A contagem foi realizada automaticamente pelo ImageJ através da função *Analyze Particles: show Outlines* que realizou a contagem dos grãos de poeira e enumerou através do recorte tratado da imagem capturada pelo microscópio.

2.4 Caracterização do vidro recoberto por filme fino de FTO

A transmitância de luz do FTO foi caracterizada pelo equipamento espectrômetro *UV/Vis Spectrometer Lambda 25* do fabricante Perkin Elmer localizado no laboratório de análises químicas da fábrica *SCHOTT Technologies Brazil*. O espectrômetro foi utilizado na configuração padrão de fábrica e a amostra de FTO foi colocada em um suporte do próprio equipamento.

A espessura do vidro recoberto por filme fino de FTO foi medida com um paquímetro analógico universal do fabricante Mitutoyo de 200 mm, modelo 530-118.

A resistência elétrica do filme fino de FTO foi medida utilizando um multímetro do fabricante FLUKE modelo 106 na configuração de seleção de medição de ohmímetro, com as pontes distando aproximadamente 1 centímetro sob a superfície do FTO.

2.5 Monitoramento das condições ambientais do experimento

Para coletar os dados de temperatura e umidade nas amostras iniciais de exposição do FTO foi utilizado um Termo-Higrômetro modelo TH-02 do fabricante INCOTERM.

Posteriormente, foi construído um módulo registrador de dados desenvolvido para gravar os dados de temperatura e umidade em um cartão microSD a cada 1 segundo utilizando o sensor DHT11 [12].

Para registrar os dados de temperatura e umidade relativa do ar ao longo dos experimentos foi desenvolvido um circuito eletrônico registrador utilizando o software KiCad [29] e posteriormente foram montados os componentes e módulos eletrônicos na placa de circuito eletrônico montado em case para trilho DIN com os seguintes itens, conforme figura 4:

- Plataforma de prototipagem Arduino Nano [13];
- Módulo de cartão de memória microSD, modelo CEG011000 [15];
- Módulo *Real Time Clock* (RTC), modelo HW-689, *chipset* PCF8563T [16];
- Sensor de umidade e temperatura, modelo DHT11[12];
- Módulo regulador de tensão modelo LM2596, conversor DC-DC *Step Down* [17];
- Borne duplo modelo KRE 2 vias, de entrada de 24 Vcc (positivo e negativo) [18];
- Placa de fenolite PCB ilhada 10 cm x 10 cm [19];
- Suporte para placa de circuito para trilho DIN, fabricante PHOENIX CONTACT, modelo UM100 10 cm x 10 cm [20].

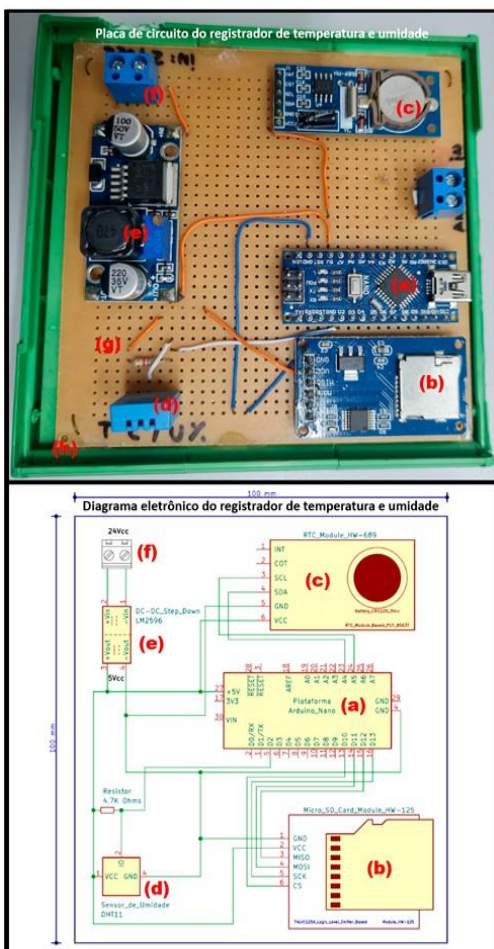


Figura 4: Foto da placa de circuito eletrônico montado em case

para trilho DIN ao lado do diagrama eletrônico do registrador de temperatura e umidade.

A aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa do ar são armazenados no cartão microSD do dispositivo em um arquivo de texto (.txt). O código fonte para aquisição de dados da plataforma Arduino Nano [13] foi escrito e compilado no Arduino IDE 2.0 [14] sendo publicado sob a licença de *software* livre conforme figura 5.

```
// Código fonte do circuito eletrônico de
// aquisição de dados de temperatura e
// umidade através do sensor DHT11

#include <PCF8563.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "DHT.h"

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
#define CS 10

PCF8563 pcf;
File myFile;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

Serial.print(nowTime.month);
Serial.print("/");
Serial.print(nowTime.year);
Serial.print("-");
Serial.print(nowTime.hour);
Serial.print(":");
Serial.print(nowTime.minute);
Serial.print(":");
Serial.print(nowTime.second);
Serial.print("-");
float h = dht.readHumidity();
float t = dht.readTemperature();

if (isnan(h) || isnan(t)) {
  Serial.println(F("Failed to read from DHT
  sensor"));
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pcf.init();
  pcf.startClock();
  dht.begin();
  Serial.print("InitializingSD card...");

  Serial.print(h);
  Serial.print(F("%"));
  Serial.print("-");
  Serial.print(t);
  Serial.print(F("°C"));
  Serial.print("-");

  myFile = SD.open("log.txt", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
    myFile.print(nowTime.day);
    myFile.print("/");
    myFile.print(nowTime.month);
    myFile.print("/");
    myFile.print(nowTime.year);
    myFile.print("-");
    myFile.print(nowTime.hour);
    myFile.print(":");
    myFile.print(nowTime.minute);
    myFile.print(":");
    myFile.print(nowTime.second);
    myFile.print("-");
    myFile.print(F("%"));
    myFile.print("-");
    myFile.print(F("°C"));
    myFile.close();
  } else {
    Serial.println("error opening test.txt");
  }

  myFile = SD.open("test.txt");
  if (myFile) {
    Serial.println("test.txt.");
    while (myFile.available()) {
      Serial.write(myFile.read());
    }
    myFile.close();
  } else {
    Serial.println("Open file failed.");
    if (!SD.begin(CS)) {
      Serial.println("initialization failed!");
    }
  }

  void loop() {
    Time nowTime = pcf.getTime();
    Serial.print(nowTime.day);
    Serial.print("/");
  }
}

if (!SD.begin(CS)) {
  Serial.println("initialization failed!");
  while (1);
}

Serial.println("initialization done.");
myFile = SD.open("test.txt",
FILE_WRITE);

if (myFile) {
  Serial.println("Writing to test.txt.");
  myFile.println("testing 1, 2, 3.");
  myFile.close();
  Serial.println("done.");
}

else {
  Serial.println("error opening test.txt");
}

myFile = SD.open("test.txt");

if (myFile) {
  Serial.println("test.txt.");
  while (myFile.available()) {
    Serial.write(myFile.read());
  }
  myFile.close();
} else {
  Serial.println("error opening test.txt");
}

void loop() {
  Time nowTime = pcf.getTime();
  Serial.print(nowTime.day);
  Serial.print("/");
}
```

Figura 5: Código fonte do registrador de dados de temperatura e umidade relativa do ar desenvolvido.

O registrador foi montado ao lado da bancada do experimento em trilho padrão DIN e energizado através de uma fonte de 24 Vcc.

2.6 Compressor com filtro desenvolvido para o experimento

Para realizar o experimento foi realizada a tentativa de utilizar o ar comprimido industrial disponível nas linhas de produção, porém, a presença de condensado e outras impurezas impossibilitava a continuidade dos experimentos. Mesmo após a adição de filtros e purgas não foi possível utilizar o ar comprimido industrial nos experimentos.

Portanto, houve necessidade de se construir um dispositivo compressor de ar com filtro em que fosse possível utilizar um ar livre de óleo, água e impurezas. O dispositivo construído possui um compressor de ar portátil enclausurado em um pote hermético que possui em sua entrada de ar um elemento filtrante de partículas sólidas de até 0,01 micrôme-

tros, aerossóis de água e óleo e alta capacidade de retenção de impurezas [21]. Para controlar o compressor foi utilizado um circuito de controle de tensão elétrica com mostrador de LED e um manômetro de Bourdon na saída de ar. Segue a lista com os componentes e suas respectivas montagens, conforme figura 6:

- um pote hermético do tipo *easy lock* 2400 ml [22];
- um compressor de ar portátil do fabricante Tramontina de 300 psi, tensão de entrada 12Vcc, corrente de operação de 4,5 A e potência de 50 W [23];
- circuito regulador de tensão com 24 Vcc de entrada e 0 a 12 Vcc de saída ajustável [24]; d) conectores de ar comprimido de engate rápido de 6 mm (compressor/saída);
- aproximadamente 15 cm de mangueira de ar comprimido de 6 mm;
- conector rosqueado modelo *Jack P4* fêmea de entrada de tensão [25];
- chave de liga e desliga (*switch* comum) de 5 A;
- fios flexíveis de 2,5 mm de diâmetro para realizar as ligações elétricas;
- filtro de ar do fabricante *Donaldson Filtration Solutions* modelo *Depth Filter UltraPleat SMF* [21].

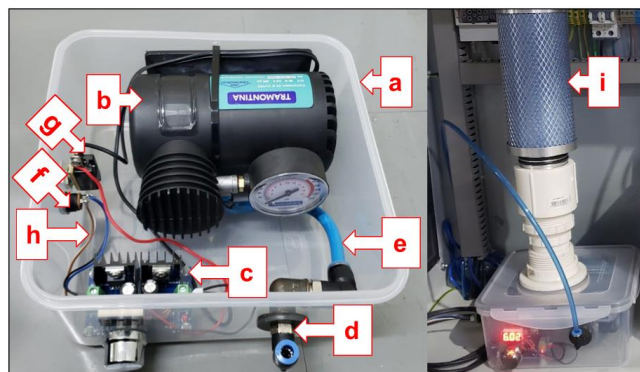


Figura 6: Colagem de fotos do sistema de compressor de ar com filtro desenvolvido.

O sistema de compressor de ar foi conectado a uma pistola de ar ionizada através de uma mangueira de ar de aproximadamente 1,5 m de comprimento com 6 mm de diâmetro. O seu funcionamento foi ajustado para trabalhar com vazão constante de aproximadamente 10 l/h e pressão constante de aproximadamente 200 mbar.

2.7 Montagem do experimento

Foram realizados experimentos de exposição de amostras de FTO retangulares de 4 cm x 8 cm sofrendo ação superficial de jato de ar ionizado e não-ionizado a uma distância de aproximadamente 10 cm. Durante os experimentos as amostras foram expostas individualmente.

No experimento, a amostra de FTO e a pistola de ar modelo SHOCKLESS do fabricante Static Control ficam presas a uma estrutura plástica com ângulo de 45° em relação à base, a fim de simular a posição original do espelho no equipamento detector industrial. Para ionizar o ar foi utilizada uma fonte geradora de tensão eletrostática de 20 kV modelo SHOCKLESS do mesmo fabricante da pistola de ar.

Durante o experimento, o filme fino de FTO esteve com a superfície exposta ao jato de ar ionizado e não-ionizado. Durante o experimento de jato de ar ionizado, foi conectado um osciloscópio modelo TBS 1022 do fabricante Tektronix de 25 MHz com registrador de dados integrado, através de uma garra tipo jacaré com a ponteira positiva no FTO e a negativa aterrada, verificando que há carregamento elétrico da superfície.

Um registrador de dados de temperatura e umidade foi colocado para monitorar o ambiente. A montagem do experimento pode ser observada na ilustração da figura 7.

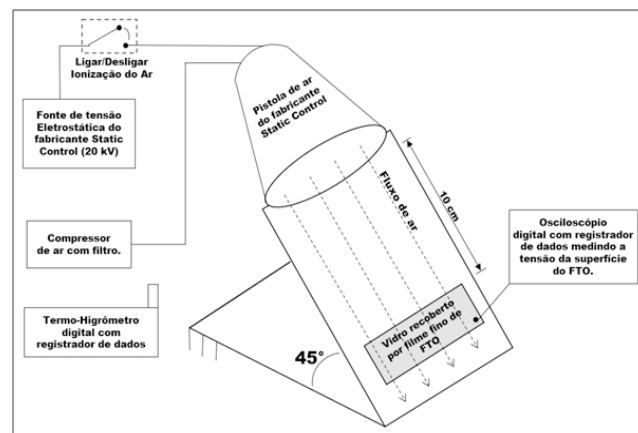


Figura 7: Ilustração da montagem do experimento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise do espelho

A obtenção das imagens da superfície do tubo de vidro pelo detector ocorre através da reflexão do plano imagem em um espelho de primeira superfície de alumínio. Um espelho empoeirado foi retirado do equipamento para inspeção visual e comparado com um espelho limpo conforme pode ser observado na figura 8, itens a e b, respectivamente.

O espelho empoeirado foi analisado no microscópio óptico com magnificação de 10X. As análises iniciais mostram a existência de grãos de poeira com formas variadas e com larguras e comprimentos variados, uma delas chegando a ter $9,91 \mu\text{m} \times 31,04 \mu\text{m}$, conforme pode ser observado na figura 8, item c. O espelho novo não apresenta grão de poeira na superfície.

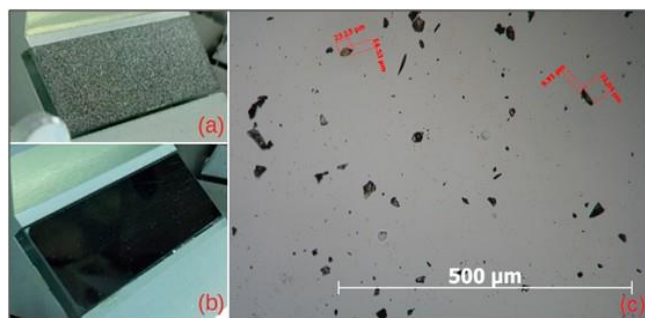


Figura 8: Comparativo entre: a) espelho empoeirado; e, b) espelho novo; c) imagem de microscopia óptica com magnificação de 10X mostrando os grãos de poeira.

3.2 Caracterização do FTO

A espessura do vidro recoberto por filme de FTO possui 1 mm de espessura e teve a transmitância caracterizada a fim de garantir que a maior parte do espectro visível do comprimento de onda seja transmitido, prevenindo que artefatos possam ser identificados como defeitos nos tubos de vidro pelo detector.

O resultado da análise do FTO no UV/VIS (figura 9) demonstrou que a transmitância ficou acima dos 80%, o que é suficiente para não interferir nas imagens capturadas e processadas pelo detector.

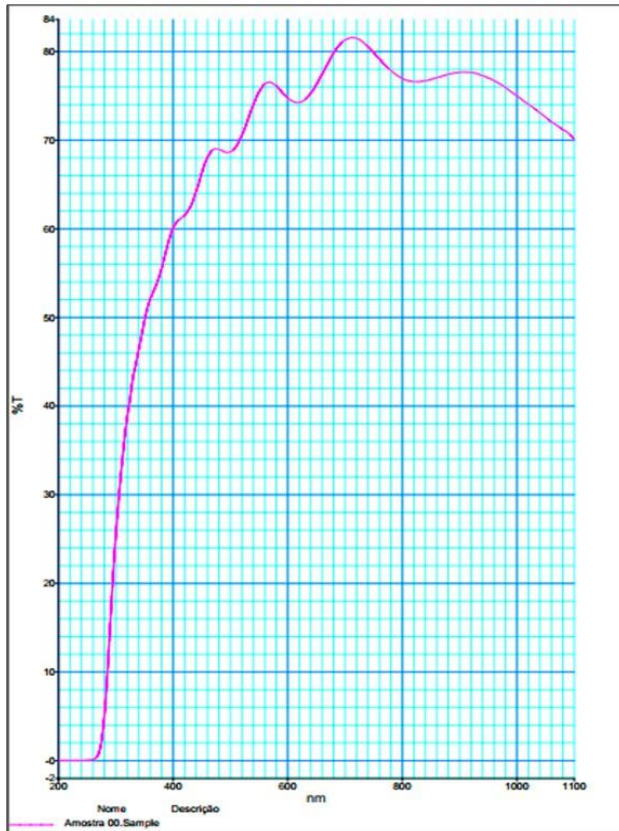


Figura 9: Resultado da transmitância do FTO no UV/VIS.

A resistência elétrica foi medida para demonstrar a faixa de valor ôhmico característico do filme fino de FTO e o resultado foi de $(11,46 \pm 0,02) \Omega$.

A tabela 1 demonstra que pela faixa de resistividade e pela transmitância característica trata-se de um FTO de padrão comercial tipo NSG TEC 10, código S302 de 1 mm de espessura [26].

Substrate	TEC 8		TEC 10		TEC 15		
	S301	S200151	S302	S200251	S303	S304	S200451
Product Code	S301	S200151	S302	S200251	S303	S304	S200451
Size	20mm x 15mm	25mm x 25mm	20mm x 15mm	25mm x 25mm	20mm x 15mm	20mm x 15mm	25mm x 25mm
Glass Thickness	2.2 mm		1 mm	1.1 mm	3.2 mm	2.2 mm	2.1 mm
Glass Type			Soda Lime Glass				
FTO Type	NSG Tec 8A		NSG Tec 10		NSG Tec 15		
FTO Thickness	600 nm		750 nm		400 - 450 nm		
FTO Quoted Sheet Resistance	6 - 9 Ω /square		11 - 13 Ω /square		12 - 14 Ω /square		
FTO Measured Sheet Resistance*	6.70 \pm 0.27 Ω /square		9.39 \pm 0.38 Ω /square		12.46 \pm 0.50 Ω /square		
FTO Roughness	34.8 nm		45 nm		12.5 nm		
FTO Work Function			4.4 eV - 4.7 eV				
FTO Transmission	76.4%		83.4%		83.5%		
Packaging	Adhesive-free surface protection tape and cardboard box						

*Sheet resistances measured using the Ossila Four-Point Probe System.

Tabela 1 - Tipos comerciais de FTO [26].

3.3 Determinação da taxa de deposição dos grãos de poeira em condições de produção vidreira

Para definir quanta poeira será acumulada ao longo do tempo na superfície do FTO exposto às condições ambientais da produção industrial vidreira foi necessário montar um experimento com a exposição de amostras de FTO por períodos determinados, estes que foram arbitrados em 12 horas, 24 horas, 36 horas, 48 horas e 72 horas.

Portanto, foram cortadas formas retangulares de vidro recoberto por FTO com medidas de 4 cm x 8 cm sob uma folha branca de papel A4 e expostos em um local com condições semelhantes às dos equipamentos detectores da linha de produção (figura 10).



Figura 10: Imagem das amostras de FTO sendo exposta no ambiente de produção vidreira, termo-higrômetro [27] ao lado.

A contagem das amostras foi feita utilizando o software ImageJ com um filtro para eliminar o fundo branco natural da folha de papel A4 de cor branca abaixo da amostra e a contagem dos grãos de poeira foi automaticamente realizada pelo software.

A área analisada das amostras compreende um retângulo de 2,5 cm x 1 cm. O gráfico da figura 11 ilustra o aumento de concentração de grãos de poeira na superfície das amostras de FTO ao longo do tempo na mesma área analisada. O experimento foi realizado uma única vez a fim de obter parâmetros iniciais. O gráfico demonstra uma tendência de aumento crescente na concentração de grãos de poeira.

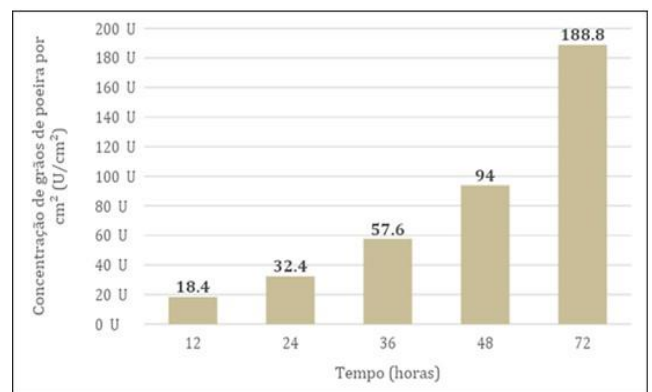


Figura 11: Gráfico da concentração de poeira pelo tempo de amostragem.

As temperaturas e umidades coletadas do termo-higrômetro [27] podem ser analisadas no gráfico da figura 12, abaixo.

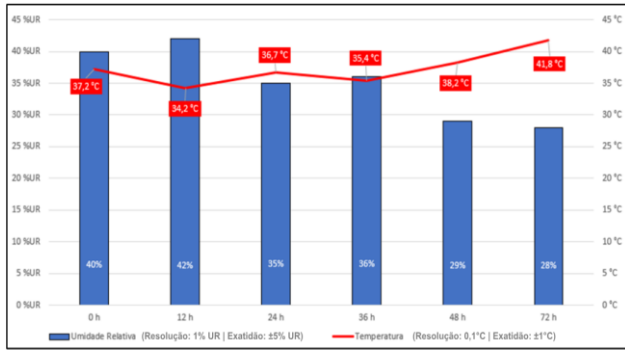


Figura 12: Gráfico de temperatura e umidade relativa durante o experimento.

Houveram pequenas variações de temperatura e umidade que não se refletem no acúmulo de grãos de poeira por área (figura 11). Os dados analisados na exposição das amostras de FTO demonstraram que o período de 72h é suficiente para o acúmulo substancial de grãos de poeira e essa faixa de tempo foi utilizada como base para os demais experimentos, definindo assim um comparativo entre os experimentos do FTO com a aplicação de jato de ar ionizado e não-ionizado.

3.4 Influência da ionização da superfície no acúmulo de poeira

Foram realizados experimentos de exposição de amostras retangulares de 4 cm x 8 cm sofrendo exposição de jato de ar ionizado a uma distância de aproximadamente 10 cm, as amostras de FTO foram posicionadas com um ângulo de 45, simulando a disposição real do espelho no equipamento detector. Na sua frente, em uma base plástica, foi presa uma pistola de ar, ora com o circuito eletrônico gerador de alta tensão ligada e ionizando o ar, ora desligada e apenas com a função de jato de ar (Figura 6).

Os dados de temperatura e umidade do ar no local foram coletados em todos os casos do experimento. Nos experimentos em que havia ionização do ar com a pistola foram coletados também os dados do sinal de tensão elétrica da superfície do FTO com um osciloscópio na função registrador de dados.

A diferença de potencial elétrico na superfície das amostras de FTO se manteve estável em todos os experimentos, com os valores aproximados (tabela da figura 13) obtidos pelo osciloscópio. A figura 13 mostra a tela do osciloscópio com o sinal característico da diferença de potencial elétrico na superfície do FTO medida através de uma garra tipo jacaré presa na sua lateral.

O sinal analisado pelo osciloscópio demonstra que houve uma mudança na energia elétrica estática da superfície do FTO em tensão alternada induzida pelo ar ionizado, e, portanto, uma alteração das forças de Van der Waals entre os grãos de poeira e a superfície do FTO.

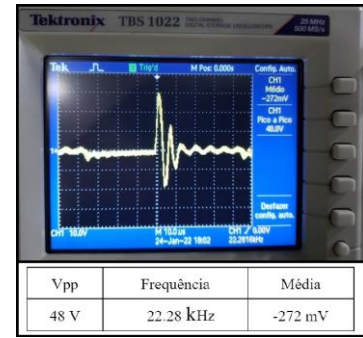


Figura 13: Colagem da janela com o sinal medido e da tabela com os valores de tensão e frequência medidos com o osciloscópio.

As imagens capturadas pelo microscópio foram analisadas pelo *software* ImageJ nas funções de filtro de fundo e contagem automática dos grãos de poeira. A composição da análise pode ser observada na figura 14, abaixo.

Exposição	Jato de ar não ionizado	Jato de ar ionizado
24 h	44,4 U/cm ²	4 U/cm ²
48 h	56,4 U/cm ²	5,6 U/cm ²
72 h	117,6 U/cm ²	10,8 U/cm ²

Figura 14: Fotos das amostras de exposição dos experimentos de jato de ar ionizado e não ionizado e as suas concentrações de poeiras analisadas pelo *software* Image J.

Os experimentos foram realizados com foco em demonstrar os resultados após 72 horas de exposição, pois era o tempo em que as concentrações de poeira nos espelhos estavam em nível crítico, gerando artefatos nas imagens capturadas pelas câmeras do equipamento. Os resultados dos experimentos de jato de ar ionizado e não ionizado e as suas concentrações de poeiras analisadas podem ser observados na figura 15, abaixo.

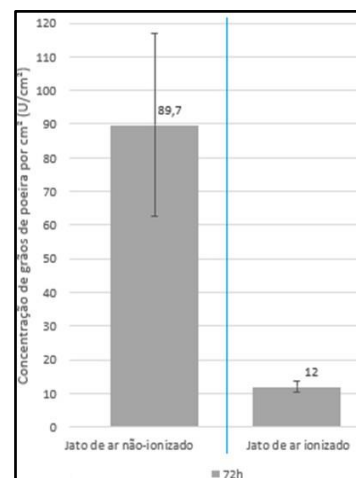


Figura 15: Gráfico das concentrações de poeira após aplicação de jato de ar ionizado e não ionizado no período de 72 horas.

A eficiência da aplicação de jato de ar ionizado (JAI) em comparação com apenas jato de ar (JA) é dada por:

$$E(JAI/JA) = 100 - (JAI \times 100 / JA) \%$$

$$E(JAI/JA) = 100 - ((12 \times 100) / 89,7) \%$$

$$E(JAI/JA) = 100 - (1200 / 89,7) \%$$

$$E(JAI/JA) = 100 - 13,37 \%$$

$$E(JAI/JA) = \mathbf{86,63 \%}$$

Comparando os dados de mitigação de acúmulo de poeira entre as amostras dos experimentos de controle (sem nenhum tratamento) e os experimentos do FTO exposto com jato de ar não-ionizado e jato de ar ionizado podemos observar que houve uma queda proporcionalmente das concentrações de grãos de poeira que foram respectivamente de 188,8 U/cm², 89,7 U/cm² e 12 U/cm² nos experimentos de 72 horas de exposição.

Calculando a eficiência entre os experimentos de jato de ar ionizado (JAI) e as amostras de controle (AC), temos o seguinte resultado:

$$E(JAI/AC) = ((AC / JAI) \times 100) \%$$

$$E(JAI/AC) = ((188,8 / 12) \times 100) \%$$

$$E(JAI/AC) = (15,7333 \times 100) \%$$

$$E(JAI/AC) = \mathbf{1573,33 \%}$$

4. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos pôde-se constatar que a instrumentação desenvolvida com uma combinação de jato de ar filtrado e ionizado e vidro recoberto por filme fino de FTO reduziu o acúmulo de poeira em até quinze vezes se comparado com amostras de controle (sem tratamento). Além disso, o experimento de jato de ionizado obteve um resultado de concentração de grãos de poeira sete vezes menor se comparado com as amostras onde houve aplicação de jato de ar não-ionizado.

Devido às características ópticas de transparência, não houve alteração na detecção do equipamento, portanto, a instrumentação desenvolvida mostrou-se segura para a aplicação em espelhos de detectores industriais montados em ambiente de produção vidreira.

A instrumentação desenvolvida tem potencial para reduzir as perdas de produção nos detectores de defeitos nos tubos de vidro por reduzir as elevadas perdas causadas por artefatos que são confundidos com defeitos, causados principalmente pela poeira acumulada.

A intervenção no detector também pode ser reduzida, seja para realização da limpeza dos espelhos ou mesmo para a substituição dos espelhos em casos extremos, onde o acúmulo de poeira acaba por causar arranhões profundos devido às inúmeras intervenções de limpeza que se somam ao longo do tempo. A limpeza pode levar em torno de quinze minutos e pode ocorrer mais de uma vez por turno de trabalho (turnos de doze horas) e a substituição do detector não pode ser realizada com o equipamento em operação na linha de produção o que leva a troca do equipamento detector e movimentação para a oficina de manutenção, levando cerca de uma hora entre a retirada de um detector e a instalação de outro, além, das configurações do novo detector, parametrizações, *checklist* de operação, processos administrativos, até a normalização do processo produtivo. Gerando um excedente de produção que pode vir a ser de até quinze horas mensais, levando em consideração apenas uma limpeza por turno em trinta dias de produção contínua.

5. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CBPF através do professor Dr. Alexandre Mello de Paula Silva por confiar no desenvolvimento do projeto e me apoiar em todas as fases e ao professor Dr. Fabrício Frizzera Borghi por todo o apoio e orientação quanto a utilização de métodos, ferramentas técnicas e pela compreensão nos momentos mais difíceis. A SCHOTT TECHNOLOGIES LTDA. através do diretor Joerg Wagner pela confiança e apoio no meu trabalho, ao gerente do departamento de automação e instrumentação industrial Jahir Resende pelo apoio, confiança e liberdade de trabalho para que eu pudesse desenvolver os experimentos e ao Dr. Eric Wanko, ex-gerente do departamento de matéria prima por me dar orientações e por dedicar parte do seu tempo nas discussões sobre o projeto e nas reuniões acadêmicas com os meus orientadores. Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo projeto FAPERJ no programa de auxílio emergencial as pós-graduações do Estado do Rio de Janeiro.

[1] SCHOTT AG. Tubos farmacêuticos de vidro tipo I.

2020. Disponível em: <<https://www.schott.com/pt-br/products/pharmaceutical-tubing-p1000372>>.

Acesso em: 13 jun. 2023.

[2] SCHOTT AG. YOUTUBE CHANNEL.

A Zero Defect Approach – The perfeXion® Quality Process.

2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=QPLxEzDmPzE&t=41s>>. Acesso em: 13 jun. 2023.

[3] FSM. *First Surface Mirror Manufacturing.*

2021. Disponível em: <<https://firstsurfacemirror.com/>>.

Acesso em: 06 set. 2022.

[4] *Cher Lin Clara Tan, Shaokai Gao, Boon Siong Wee, Akua Asa Awuku & Beng Joo Reginald Thio (2014) Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment, Aerosol Science and Technology, 48:5, 541-551, DOI: <https://doi.org/10.1080/02786826.2014.898835>.*

- [5] MELO, Hercílio Gomes de; GUEDES, Isabel Correia. Apostila: Ligações Químicas – Capítulo 5: Forças de Van der Waals. Universidade de São Paulo, 2021. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7677670/mod_resource/content/1/Apostila-VDW %20e%20ligacoes%20de%20hidrogenio.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7677670/mod_resource/content/1/Apostila-VDW%20e%20ligacoes%20de%20hidrogenio.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2022.
- [6] TOTH III, J. R.; RAJUPET, S.; SQUIRE, H.; VOLBERS, B.; ZHOU, J.; XIE, L.; SANKARAN, R. M.; LACKS, D. *J. Electrostatic forces alter particle size distributions in atmospheric dust. Atmos. Chem. Phys.*, v. 20, p. 3181-3190, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.5194/acp-20-3181-](https://doi.org/10.5194/acp-20-3181-2020) 2020. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [7] XIE, Li; LIU, Yakui; ZHOU, Cheng; WANG, Mark; LACKS, Daniel J.; ZHOU, Jùn. *A laboratory study of the electrostatic charge of individual sand particles lofted in an electric field. Aeolian Research*, v. 50, p. 100675, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875963721000124>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [8] MOHAMMED, Anwaruddin Siddiqui; YILBAS, Bekir Sami; AL-QAHTANI, Hussain; ABUBAKAR, Abba Abdulhamid; HAWWA, Muhammed; KASSAS, Mahmood. Dust mitigation from inclined hydrophobic and hydrophilic surfaces under electrostatic repulsion. *Journal of Electrostatics*, v. 109, p. 103536, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388620301194>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- [9] CHOPRA, K. L.; MAJOR, S.; PANDYA, D. K. *Transparent conductors—a status review. Thin solid films*, v. 102, n. 1, p. 1-46, 1983, DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(83\)90256-0](https://doi.org/10.1016/0040-6090(83)90256-0).
- [10] PIROVANI, Layara Lima. Preparação e caracterização de filmes de óxido de estanho dopados com flúor para aplicação como óxido condutor transparente. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes - RJ. Disponível em: <<https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Projeto-layara-para-defesaversao-final-cd.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2022.
- [11] BILGIN, VILDAN et al. Electrical, structural and surface properties of fluorine doped tin oxide films. *Applied Surface Science*, v. 256, n. 22, p. 6586-6591, 2010.
- [12] Aosong Electronic Co. DHT11 SIP *Packaged Temperature and Humidity Sensor*. Disponível em: <<http://www.aosong.com/en/products-21.html>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- [13] ARDUINO. Arduino Nano. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [14] ARDUINO. *Arduino IDE 2 Documentation*. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- [15] EKT Katrangi Bros. *Arduino Micro SD Card Reader & Writer Module*. Disponível em: <<https://www.katranji.com/tocimages/files/357843-236238.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [16] ELETROGATE. Módulo Real Time Clock RTC I2C-PCF8563. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-real-time-clock-rtc-i2c-pcf8563>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [17] BAÚ DA ELETRÔNICA. Módulo Regulador de Tensão LM2596. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/modulo-regulador-de-tensao-lm2596.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [18] ELETROGATE. Conector Borne KRE 2 Vias. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/conector-borne-kre-2-vias>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [19] ROBOCORE. PCBilhada 10 x 10 cm. Disponível em: <<https://www.robocore.net/placa-circuito/pcb-ilhada-10x10cm>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [20] MOUSER ELECTRONICS. PHOENIX CONTACT, *Terminal Block Tools & Accessories*, code 2952020/UM100/10.00/GN6021. Disponível em: <<https://mou.sr/45bQQq0>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [21] DONALDSON FILTRATION SOLUTION. *Depth Filter Ultra Pleat SMF*. Disponível em: <<https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/compressed-air-and-process/literature/emea/compressed-air-and-gas/filter-elements/industrial/smf-smfp-p-smf/f119081/eng/SMF-UltraPleat-Depth-Filter-Elements.pdf>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [22] CASA E VÍDEO. Pote Hermético 2400ml Casa do *Chef Easy Lock*. Disponível em: <<https://www.casaevideo.com.br/pote-hermetico-2400ml-casa-do-chef-easy-lock-cv181852/p>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

- [23] TRAMONTINA. Compressor de Ar Portátil Tramontina para Carros 300 psi 50 W 12 V. Disponível em: <<https://www.tramontina.com.br/compressor-de-ar-portatil-tramontina-para-carros-300-psi-50-w-12-v/42330001.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [24] ELETROGATE. Módulo Regulador de Tensão 4-40V 8A *Step Down c/ Display* - XL4016. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/modulo-regulador-de-tensao-440v-8a-step-down-c-display-xl-4016>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [25] ELETRÔNICA ÔMEGA. Conector *Jack* P4 Fêmea (J4 2,1 mm) DC-022. Disponível em: <<https://www.eletronicaomega.com/produto/conector-jack-p4-femea-j4-21mm-dc-022.html>>. Acesso em: 18 mai. 2023.
- [26] FTO *Glass Substrates. Sheet resistances measured using the* Ossila Four-Point Probe System. Disponível em: <<https://www.ossila.com/products/fto-glass-unpatterned>>. Acesso em: 03 jul. 2022.
- [27] INCOTERM. Termo-higrômetro digital modelo 7666.02.0.00. Disponível em: <<https://www.incoterm.com.br/produto/7666-02-0-00-termo-higrometro-digital-temperatura-e-umidade-internas/2284>>. Acesso em 02 jul. 2024.
- [28] Image J. *Image Processing and Analysis in Java*. Disponível em: <<https://imagej.net/ij/>>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [29] KiCad. *A Cross Platform and Open Source Electronics Design Automation Suite*. Disponível em: <<https://www.kicad.org/>>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- [30] Schott *Glaswerke*. FIOLAX®. Disponível em: <<https://trademark.trademarkia.com/fiolax-73377440.html>>. Acesso em: 30 mai. 2023.