



Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas
Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica

LÚCIO ROGÉRIO JÚNIOR

**Desenvolvimento e aplicação de um equipamento gerador de jato de plasma frio à
pressão atmosférica para tratamento de materiais**

UBERABA-MG

2019

LÚCIO ROGÉRIO JÚNIOR

Desenvolvimento e aplicação de um equipamento gerador de jato de plasma frio à pressão atmosférica para tratamento de materiais

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, área de concentração “Processos Tecnológicos” da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo

UBERABA-MG

2019

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

R63d Rogério Júnior, Lúcio
Desenvolvimento e aplicação de um equipamento gerador de jato de
plasma frio à pressão atmosférica para tratamento de materiais / Lúcio Rogé-
rio Júnior. -- 2019.

111 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Uni-
versidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2019

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gelamo

1. Geradores de pulso. 2. Plasma de baixa temperatura. I. Gelamo, Rogé-
rio. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 621.313.534

LÚCIO ROGÉRIO JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO GERADOR
DE JATO DE PLASMA FRIO, À PRESSÃO ATMOSFÉRICA, PARA
TRATAMENTO DE MATERIAIS

Trabalho de conclusão apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em
Inovação Tecnológica da Universidade Federal
do Triângulo Mineiro, como requisito para
obtenção do título de mestre.

Uberaba, 29 de janeiro de 2019

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo
Orientador – UFTM

Prof. Dr. David Calhau Jorge
Membro Titular – UFTM

Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira
Membro titular – UNIUBE

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo, que se mostrou sempre solícito durante as fases de desenvolvimento deste trabalho, pelas suas correções, sugestões e incentivos.

Aos professores que ministraram as disciplinas que cursei, pelo conhecimento, orientação e experiências compartilhadas.

Ao Prof. Dr. Anderson Barbosa Lima e ao Prof. Mário Sergio da Luz pelas valiosas considerações realizadas durante a apresentação de qualificação.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro – UFTM, e todos os profissionais que compõem o Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica - PMPIT, pelo suporte e oportunidade de cursar o mestrado.

Ao amigo Rafael Buso, por dedicar seu escasso tempo com valiosas orientações no projeto mecânico, e em ceder sua empresa para a fabricação e montagem deste equipamento.

Ao professor Dr. Munemasa Machida, pela atenção e cordialidade em compartilhar informações que foram muito importantes no estágio inicial deste trabalho.

À professora Dra. Emiliane Araújo, pelas importantes orientações de utilização do goniômetro do laboratório de Físico-Química da UFTM e pela grande ajuda na interpretação e análise das medidas de ângulo de contato.

Aos amigos Camila e Gabriel, pelo auxílio nas análises de diversas medidas realizadas e pelas orientações de utilização de equipamentos do laboratório.

Ao amigo Gabriel Augusto por compartilhar materiais valiosos que me auxiliaram na elaboração de parte deste trabalho.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) que forneceram recursos financeiros para aquisição de equipamentos que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Lúcio e Livia, que sempre me ofereceram todo suporte necessário para que eu pudesse alcançar meus objetivos e chegar mais longe.

À minha esposa Danielle, pela paciência, compreensão e ajuda durante todas as etapas deste projeto, em especial às suas inúmeras leituras e sugestões para escrita deste trabalho.

“Desconfie do destino e acredite em você.

Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando...

Porque, embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive já morreu.”

Luiz Fernando Veríssimo.

RESUMO

Inúmeros estudos têm sido realizados com a intenção de produzir mudanças em superfícies de diversos materiais, provocando alterações físico-químicas, através do plasma, e conseqüentemente melhorando o desempenho destes. Os processos de produção de plasma a baixas pressões são os mais utilizados, porém apresentam algumas desvantagens significativas, como o alto custo de alguns equipamentos de vácuo e limitações na utilização em certos materiais. Novas técnicas capazes de produzir um jato de plasma frio a pressão atmosférica (APPJ) foram desenvolvidas, possibilitando gerar modificações superficiais em pontos específicos, além de permitir a utilização em materiais sensíveis a temperatura. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a construção de um equipamento de baixo custo, capaz de produzir um jato de plasma frio à pressão atmosférica, sendo composto por um módulo eletrônico microcontrolado, responsável por gerar um sinal de alta tensão, possibilitando ao usuário ajustar parâmetros e monitorar grandezas através de uma interface gráfica. Outras partes como um suporte de fixação, um injetor de plasma, um regulador de fluxo e um dispositivo porta amostras, compõem o conjunto de componentes principais da máquina. Através deste equipamento foi possível gerar jatos de plasma utilizando gases argônio e hélio, alterando sua intensidade e extensão através da variação de parâmetros disponíveis ao usuário, como tensão, frequência e largura de pulso do sinal aplicado a bobina de ignição, vazão de gás e a distância entre o injetor e a base de amostras. Na segunda etapa deste trabalho, amostras de PVC e cobre foram submetidas ao plasma atmosférico em temperaturas próximas a ambiente, sendo caracterizadas através da microscopia de força atômica (AFM), espectrometria infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) e medição de ângulo de contato. Foi possível concluir que o APPJ foi capaz de produzir modificações superficiais nos materiais, tais como o aumento da rugosidade média de 3,5nm para 17,5nm no cobre, e no PVC de 5,3nm para 48,8nm, bem como modificações em ligações químicas e também nas propriedades que mensuram adesão de água, alterando o cobre de hidrofílico para hidrofóbico e deixando o PVC menos hidrofóbico.

Palavras-chave: Gerador de plasma, Jato de plasma, APPJ, Plasma DBD, Plasma atmosférico, Modificações de materiais com plasma.

ABSTRACT

Many studies have been carried out with the intention of producing changes in surfaces of several materials, causing physicochemical changes through the plasma, and consequently improving their performance. The processes of low-pressure plasma production are the most used, but they have some significant drawbacks such as the high cost of some equipment and limitations in the use of certain materials. New techniques capable of producing a cold plasma at atmospheric pressure (APPJ) were developed, allowing to generate superficial modifications at specific points, besides allowing the use in materials sensitive to high temperature. This work presents the development and construction of a low-cost equipment capable of producing a cold plasma jet at atmospheric pressure, being composed by a microcontrolled electronic module, responsible for generating a high voltage signal, allowing the user to adjust parameters and monitor quantities through a graphical interface. Other parts such as a support arm, a plasma injector, a regulator and flow meter, and a sample port device, composing the main components of the machine. Through this equipment it was possible to generate plasma jets using argon and helium, changing its intensity and length by varying the parameters available to the user such as voltage, frequency and pulse width of the signal applied to the ignition coil, gas flow, electrode position and the distance between the injector and the sample base. In the second stage of this work, samples of PVC and copper were submitted to atmospheric plasma at temperatures close to the room, being characterized by atomic force microscopy (AFM), infrared spectrometry (FTIR) and contact angle measurement. It was possible to conclude that APPJ was able to produce superficial modifications in the materials, such as the increase of copper average roughness from 3.5nm to 17.5nm, and PVC from 5.3nm to 48.8nm, as well as chemical bonds modifications and also in the properties that measure water adhesion, changing the hydrophilic copper sample to hydrophobic and leaving the PVC less hydrophobic.

Key words: Plasma generator, Plasma jet, APPJ, DBD plasma, Atmospheric plasma, Materials modifications with plasma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de configurações dos jatos de plasma DBD.....	23
Figura 2 - Diagrama simplificado de funcionamento de um AFM.....	27
Figura 3 - Diagrama de um espectroscópio infravermelho.....	28
Figura 4 - Modos de vibração de moléculas poliatômicas.....	29
Figura 5 - Molhabilidade e ângulo de contato.....	31
Figura 6 - Molhabilidade e ângulo de contato.....	32
Figura 7 - Kit Minipuls 4 da GBS Elektronik.....	33
Figura 8 - Diagrama de blocos do circuito elétrico do equipamento.....	35
Figura 9 - Fusível e disjuntor instalados no gerador de plasma.....	36
Figura 10 - Fonte Chaveada estabilizada 24V – 10A.....	38
Figura 11 - Coleta do sinal do sensor ACS712 e adequação do sinal para a AI.....	40
Figura 12 - Circuito de acoplamento óptico com IL300 da placa de potência.....	42
Figura 13 - Circuito buffer da placa de controle.....	43
Figura 14 - Conexões do display alfanumérico.....	45
Figura 15 - Conexões dos botões de ajuste.....	45
Figura 16 - Circuito de retificação e regulação de tensão da placa de controle.....	47
Figura 17 - Chip PIC16F877A – Encapsulamento DIP40.....	48
Figura 18 - Microcontrolador PIC16F877A.....	49
Figura 19 - Reset físico através do Pino MCLR do PIC.....	50
Figura 20 - Sensor de temperatura LM35.....	52
Figura 21 - Saídas digitais – Acionamento de relê eletromecânico e buzzer.....	53
Figura 22 - Circuito com optoacoplador 6N137.....	55
Figura 23 - Bobina de ignição Bosch KW12V.....	56
Figura 24 - Circuito de disparo da bobina de ignição.....	57
Figura 25 - Divisor de tensão para medição do sinal de alta tensão.....	58
Figura 26 - Sinal de saída da bobina de ignição medido por um circuito de atenuação.....	59
Figura 27 - Layout 3D da PCI – Placa de potência – Versão final.....	61
Figura 28 - Placa de controle – Versão Final.....	62
Figura 29 - Desenhe 3D do gabinete e componentes – Vista isométrica.....	64
Figura 30 - Desenhe 3D do gabinete e componentes – Vista traseira lateral.....	64
Figura 31 - Conjunto regulador de fluxo com manômetro.....	65
Figura 32- Bico injetor de plasma – conjunto montado.....	66

Figura 33 - Bico injetor de plasma – conjunto desmontado.....	66
Figura 34 - Bico injetor de plasma modificado – Versão final.....	67
Figura 35 - Suporte – vista lateral (a) e Suporte – vista frontal (b).....	68
Figura 36 - Fluxograma básico de operação do microcontrolador.....	70
Figura 37 - Amostras tratadas no equipamento APPJ, sendo (a) PVC e (b) cobre.....	72
Figura 38 - Goniômetro do laboratório de Físico-Química da UFTM.....	74
Figura 39 - Equipamento gerador APPJ, versão final. Vista frontal (a); Vista traseira (b).....	76
Figura 40 - Jato de Plasma à pressão atmosférica com gás hélio.....	78
Figura 41 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia de força atômica em amostras de cobre sem tratamento.....	80
Figura 42 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia de força atômica em amostras de cobre tratada com plasma atmosférico durante 10 minutos.....	80
Figura 43 - Espectroscopia infravermelha (FTIR) de amostras de PVC na faixa de 2000 a 500 cm^{-1} (vibração molecular: ν estiramento, δ dobramento e ρ balanço).....	81
Figura 44 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia e força atômica em amostras de PVC submetida ao plasma atmosférico por 3 minutos.....	82
Figura 45 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia e força atômica em amostras de PVC submetida ao plasma atmosférico por 10 minutos.....	82
Figura 46 - Espectroscopia infravermelha (FTIR) de amostras de PVC na faixa de 2000 a 500 cm^{-1} (vibração molecular: ν estiramento, δ dobramento e ρ balanço).....	83
Figura 47 - Espectroscopia infravermelha (FTIR) amostras PVC - Faixa de 4000 a 2000 cm^{-1}	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regiões do Espectro Infravermelho.....	30
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no tratamento das amostras de PVC e cobre.....	72
Tabela 3 - Alteração das bandas do espectro do PVC tratado em relação ao PVC puro.....	85
Tabela 4 - Valores dos componentes apolares (ΔG_{sas}^{LW}) e polares (ΔG_{sas}^{AB}) da energia livre total de interação das superfícies estudadas.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	Microscópio de força atômica (do inglês, Atomic Force Microscope)
AI	Entrada analógica (do inglês, Analog Input)
AISI	Instituto americano de ferro e aço (do inglês, American Iron and Steel Institute)
ADC	Conversor analógico digital (do inglês, Analog to Digital Converter)
APPJ	Jato de plasma à pressão atmosférica (do inglês, Atmospheric Pressure Plasma Jet)
AT	Alta tensão (Valor de tensão superior a 1000V)
ATR	Reflexão total atenuada (do inglês, Attenuated Total Reflectance)
BJT	Transistor bipolar de junção (do inglês, Bipolar Junction Transistor)
BOR	Reset por queda de tensão (do inglês, Brown-out Reset)
CA	Corrente Alternada (Corrente elétrica alternada ao longo do tempo)
CC	Corrente Contínua (Corrente elétrica contínua ao longo do tempo)
CCP	Captura Compara PWM (do inglês, Capture Compare PWM)
CI	Circuito integrado (Componente eletrônico)
CMOS	Tecnologia de construção de circuitos integrados (do inglês, Complementary metal-oxide-semiconductor)
CPU	Unidade de processamento central (do inglês, Central Processing Unit)
DBD	Descarga de barreira dielétrica (do inglês, Dielectric Barrier Discharge)
EEPROM	Memória somente de leitura programável e apagável eletricamente (do inglês, Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory)
Fcem	Força contra-eletromotriz
FTIR	Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier (do inglês, Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
ICSP	Programação serial no circuito (do inglês, In Circuit Serial Programming)
IIP	Implantação de Íons por Imersão em Plasma
I2C	Inter-Integrated Circuit (Protocolo serial de comunicação)

IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado (do inglês, Integrated Development Environment)
LCD	Display de cristal líquido (do inglês, Liquid Crystal Display)
LFFPP	Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma
LTE	Equilíbrio termodinâmico local (do inglês, Local Thermodynamic Equilibrium)
MBd	Mega Baud (Velocidade de transmissão de dados)
MCLR	Master Clear (Pino de Reset)
Mosfet	Transistor de efeito de campo metal oxido-semicondutor (do inglês, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
NA	Normalmente Aberto (Condição de estado de um contato elétrico)
NF	Normalmente Fechado (Condição de estado de um contato elétrico)
N – LTE	Não equilíbrio termodinâmico local (do inglês, Non – Local Thermodynamic Equilibrium)
PCI	Placa de Circuito Impresso
POR	Reset ao energizar o circuito integrado (do inglês, Power On Reset)
PTH	Pino através de furo (do inglês, Pin Through Hole)
PVC	Policloreto de vinila (do inglês, Polyvinyl Chloride)
PWM	Modulação de largura de pulso (do inglês, Pulse Width Modulation)
RAM	Memória de acesso aleatório (do inglês, Random Access Memory)
RMS	Raiz da média dos quadrados (do inglês, Root Mean Square)
SMPS	Fonte de alimentação do tipo chaveado (do inglês, Switched Mode Power Supplies)
SPI	Protocolo serial de interface periférica (do inglês, Serial Peripheral Interface)
SOIC	Circuito integrado de contorno pequeno (do inglês, Small Outline Integrated Circuit, sendo um tipo de encapsulamento SMD)
UART	Transmissor e receptor assíncrono universal (do inglês, Universal Asynchronous Receiver Transmitter)
VCA	Tensão em Corrente Alternada

VCC	Tensão em Corrente Contínua
VCVS	Fonte de tensão controlada por tensão (do inglês, Voltage Controlled Voltage Supply)
WDT	Temporizador cão de guarda (do inglês, Watch Dog Timer)
Zin	Impedância de entrada
γ_{SG}	Tensão superficial interfacial entre o sólido e o gasoso
γ_{SL}	Tensão superficial interfacial entre o sólido e o líquido
γ_{LG}	Tensão superficial interfacial entre o líquido e o gasoso
ΔG_{sas}^{TOT}	Energia livre de interação hidrofóbica
ΔG_{sas}^{LW}	Energia de interação de Lifshitz-van der Waals
ΔG_{sas}^{AB}	Energia de interação ácida e base de Lewis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 PLASMA.....	20
3.2 PLASMA ATMOSFÉRICO	21
3.3 DISCARGA DE BARREIRA DIELÉTRICA (DBD)	22
3.3.1 Configurações dos jatos de plasma DBD	22
3.3.2 Fontes de alimentação do jato de plasma DBD	24
3.3.3 Parâmetros de influência do APPJ	24
3.4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	25
3.4.1 Microscopia de força atômica	25
3.4.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier	27
3.4.3 Medida do ângulo de contato	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 PROJETO ELETROELETRÔNICO	34
4.1.1 Elementos de proteção do equipamento	35
4.1.2 Fonte de Alimentação Chaveada do circuito de potência	37
4.1.3 Medição de corrente por efeito hall	39
4.1.4 Circuito de amostragem de tensão	42
4.1.5 Interface gráfica e entrada de dados	44
4.1.7 Microcontrolador	48
4.1.8 Reset físico do microcontrolador	50
4.1.9 Monitoramento de temperatura	51
4.1.10 Saídas digitais	52
4.1.11 Acoplador óptico do sinal PWM	54
4.1.12 Bobina de ignição automotiva	55
4.1.13 Drive de chaveamento da bobina	56
4.1.14 Medição do sinal excitação do eletrodo do bico injetor de plasma	58
4.1.15 Placa de circuito impresso	61
4.2 PROJETO MECÂNICO	63
4.2.1 Gabinete	63
4.2.2 Regulador e indicador de vazão	65

4.2.3 Bico injetor de plasma.....	65
4.2.4 Suporte de Fixação e porta amostras	68
4.3 PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR	69
4.4 TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	71
4.4.1 Microscopia de força atômica	73
4.4.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR).....	73
4.4.3 Medição do ângulo de contato.....	73
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1 EQUIPAMENTO GERADOR DE JATO DE PLASMA FRIO ATMOSFÉRICO	76
5.1.1 Operação do equipamento.....	76
5.1.2 Alarmes e segurança do equipamento.....	78
5.1.3 Detalhes de Gerador APPJ.....	78
5.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS	79
5.2.1 Microscopia de força atômica	79
5.2.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier.....	83
5.2.3 Medição do ângulo de contato.....	85
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	88
7 REFERÊNCIAS	89
APÊNDICES.....	94
APÊNDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO – POTÊNCIA	94
APÊNDICE B – ESQUEMAS ELETRÔNICO – CONTROLE.....	95
APÊNDICE C – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – POTÊNCIA.....	96
APÊNDICE D – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – CONTROLE.....	97
APÊNDICE E – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – POTÊNCIA	98
APÊNDICE F – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – CONTROLE.....	100
APÊNDICE G – TESTES, CONFIGURAÇÕES E AJUSTES DAS PCIs.....	102
APÊNDICE H – MEDIÇÃO DO SINAL DE ALTA TENSÃO DA BOBINA	103
APÊNDICE I – GABINETE FABRICADO DE AÇO-CARBONO	104
APÊNDICE J – ADESIVOS FRONTAL E TRASEIRO INSERIDOS NO GABINETE.....	105
APÊNDICE K – DESENHO 3D MÓDULO DE CONTROLE DO GERADOR DE PLASMA ...	106
APÊNDICE L – SUPORTE DO BICO INJETOR E PORTA AMOSTRAS	107
APÊNDICE M – EQUIPAMENTO FINAL – CONJUNTO COMPLETO	108
APÊNDICE N – TRATAMENTO DE MATERIAIS – PLASMA C/ HÉLIO E ARGÔNIO	111

1 INTRODUÇÃO

A maior parte da matéria presente no universo está na forma de plasma. Na física, o plasma é conhecido como o quarto estado da matéria, sendo um gás com partículas carregadas negativamente e positivamente, contendo elétrons, íons e átomos neutros, mantendo sua carga elétrica total igual a zero (FRANK-KAMENETSKII, 1972).

Dentre os muitos exemplos da formação de plasma pode-se citar: descarga de raios, aurora boreal, formação de arcos elétricos ao fechar contatos de chaves elétricas, materiais que se aquecem em altíssimas temperaturas e produzem luz, entre muitos outros (FRANK-KAMENETSKII, 1972).

De acordo com Bellan (2006), o plasma é conhecido pelo ser humano desde tempos muito antigos, porém começou a ser investigado entre as décadas de 1920 e 1930, por alguns pesquisadores isolados, cada um deles motivados por problemas específicos, iniciaram o estudo do que conhecemos hoje como plasma físico.

Nas últimas décadas, diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de alterar superfícies de materiais, produzindo mudanças físico-químicas, através de descargas de plasma em baixas pressões, utilizando câmaras com sistema de vácuo, injeção de gases e eletrodos de excitação (ALVES JR. et al., 2005).

Uma técnica que utiliza a produção de plasma em baixas pressões é a Implantação de Íons por Imersão em Plasma (IIIP), que consiste em aplicar o plasma em torno do alvo (material) utilizando altos valores de potenciais elétricos, melhorando o desempenho de componentes pela alteração da resistência a corrosão, dureza e tempo de fadiga (HENRIQUE; UEDA, 2004).

Para gerar o plasma em baixas pressões é necessário um sistema de vácuo complexo e de alto custo em muitos casos. Contudo, o interesse de trabalhar com plasmas produzidos a pressão atmosférica e em temperaturas próximas da temperatura ambiente vem aumentando, devido às suas propriedades favoráveis e ao baixo custo. Assim, o jato de plasma à pressão atmosférica (APPJ), do inglês, Atmospheric-Pressure Plasma Jet, tem sido utilizado como uma ferramenta para produção deste tipo de descarga (LI et al., 2013).

Para se obter uma operação estável do APPJ, são utilizados gases como hélio e argônio, que produzem jatos homogêneos e evitam arcos, através de descargas relativamente próximas da temperatura ambiente à pressão atmosférica (HERMANN et al., 1999). Dentre as várias técnicas utilizadas para produzir o plasma com geradores APPJ, destaca-se a configuração de descarga de barreira dielétrica (DBD) do inglês, dielectric barrier discharge, por produzir o plasma próximo da temperatura ambiente e com descargas uniformes (PARK et al., 2012).

Equipamentos geradores de plasma à pressão atmosférica, que produzem jatos próximos à temperatura ambiente, têm sido alvo de estudo e pesquisa por suas características de segurança e baixo custo. O dispositivo pode ser utilizado em diversas aplicações, como na área biológica, por meio de aplicações em pele humana e órgãos internos, ou na área de materiais, através de modificações físico-químicas (MACHIDA, 2014).

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um equipamento capaz de produzir um jato de plasma frio, à pressão atmosférica, de modo a possibilitar a sua utilização na modificação de superfícies e no tratamento de materiais diversos, em atividades de pesquisa e estudos científicos.

O projeto e a construção do equipamento gerador APPJ foram motivados devido à sua grande utilidade em atividades de pesquisa, e por não haver um equipamento comercial com todos os recursos necessários para aplicações específicas com plasma frio. Outro fator instigante foi o difícil acesso e o alto custo de aquisição das tecnologias encontradas, mesmo considerando adquirir apenas parte dos recursos necessários para a construção de um gerador de plasma APPJ.

A dissertação está disposta da seguinte maneira: no capítulo 2 são apresentados os objetivos do trabalho, onde são descritos os resultados pretendidos com o projeto, norteando todas as etapas no desenvolvimento do gerador de plasma APPJ.

O capítulo 3, Revisão de Literatura, apresenta o conceito de plasma e descreve as características do plasma à pressão atmosférica. São apresentadas também algumas configurações do dispositivo gerador de plasma DBD, as fontes de alimentação utilizadas, bem como os parâmetros que influenciam na sua produção.

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho são descritos no capítulo 4, sendo detalhado todo o projeto eletroeletrônico, as configurações dos circuitos de controle e potência, apresentando os componentes e suas funcionalidades. Neste tópico também é apresentado o projeto mecânico do equipamento, incluindo o gabinete e o bico injetor de plasma.

Ainda no capítulo 4, são expostas as particularidades do projeto de firmware do microcontrolador, bem como o fluxograma com o algoritmo utilizado. Na parte final deste capítulo, são apresentadas os parâmetros e recursos usados no tratamento das amostras e as técnicas utilizadas para caracterizá-las.

Os resultados são relatados no capítulo 5, mostrando a viabilidade de se utilizar um equipamento gerador de plasma APPJ de baixo custo. Neste tópico também são apresentados os resultados das caracterizações das amostras tratadas, exibindo as alterações detectadas através dos três métodos utilizados.

Por fim, no capítulo 6, explana-se sobre a conclusão do desenvolvimento deste trabalho, relatando as perspectivas dos resultados obtidos bem como as possibilidades de utilização do equipamento desenvolvido.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e construir um equipamento capaz de produzir um jato de plasma frio à pressão atmosférica (APPJ), usando o princípio de barreira dielétrica (técnica DBD), a fim de testá-lo e investigar efeitos de alterações em diferentes materiais (cobre, polímero, celulose, entre outros).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter-se o comportamento do plasma produzido, aplicando sinais de tensão e frequência variados, com objetivo de definir quais as faixas de valores dos sinais são mais adequadas para geração do plasma;
- Possibilitar ao usuário realizar ajustes dos parâmetros do equipamento, através de botões e uma interface gráfica, interagindo com a máquina e monitorando variáveis;
- Oferecer o máximo de segurança ao usuário na utilização do equipamento através de elementos de proteção e alarmes de mau funcionamento de componentes;
- Caracterizar amostras submetidas a tratamentos com plasma atmosférico através de pelo menos 3 técnicas, mostrando mudanças produzidas pelo equipamento gerador APPJ;
- Disponibilizar o equipamento ao LFFPP da UFTM, para ser utilizado em atividades de pesquisa por alunos e professores.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 PLASMA

A palavra plasma é de origem grega, significando algo com forma moldável. Foi aplicado por Tonks e Langmuir em 1929, que descreveram a região interna de um gás ionizado brilhante gerado por descarga elétrica em um tubo. O plasma é descrito como uma grande variedade de substâncias macroscopicamente neutras, formada por muitas interações de moléculas, átomos ionizados e elétrons (BITTENCOURT, 2004).

Na física, o plasma é denominado o quarto estado da matéria, sendo formado quando um gás é superaquecido ocasionando a ionização dos átomos. Três parâmetros fundamentais caracterizam um plasma: a densidade de partículas medida em partículas por m^3 , a temperatura de cada espécie medida em eV e o campo magnético de estado estacionário medido em Tesla (BELLAN, 2006).

As temperaturas e as pressões encontradas na Terra são insuficientes para permitir a formação de plasma, exceto sob condições atípicas, como no caso de relâmpagos e a Aurora Boreal, por exemplo. No entanto, a grande maioria da matéria do universo está em estado plasmático (D'AGOSTINO et al., 2005).

Em condições controladas, o plasma pode ser criado em laboratórios ou ambientes industriais, através da aplicação de alta tensão, direta ou alternada, a um gás. Essa geração do plasma pode ocorrer de duas principais formas, com o gás em condições de pressão reduzida, como no caso dos sistemas à vácuo, ou à pressão atmosférica (FAVIA; D'AGOSTINO, 1998).

O plasma produzido sobre pressões reduzidas tem um destaque considerável devido à sua versatilidade e por possibilitar bons resultados no tratamento e modificações de materiais (ALVES JR. et al., 2005). Podemos destacar a técnica chamada de pulverização catódica (sputtering, em inglês) que consiste na deposição de filmes com espessura de poucos nanômetros, podendo ser aplicado em diversos tipos de substratos com o objetivo de promover mudanças superficiais (MACHUNO et.al., 2016).

Apesar do plasma gerado em baixas pressões ser o mais utilizado para fins acadêmicos e industriais, ele apresenta desvantagens significativas, como a necessidade de equipamentos de alto custo, destacando-se um sistema de vácuo complexo, composto por pelo menos uma bomba, uma câmara de vácuo e uma fonte de alta tensão. Outras limitações são encontradas neste tipo de plasma, podendo ser citada a limitação de uso no tratamento de alguns tipos de

materiais, por exemplo os biomateriais e a dificuldade de tratamentos em regiões pontuais (LI et. al., 2013).

3.2 PLASMA ATMOSFÉRICO

O plasma atmosférico é produzido em laboratório há mais de 50 anos e ao longo deste tempo os mecanismos de geração e desenvolvimento têm sido utilizados em diversas áreas de aplicação. Nos últimos anos, o plasma atmosférico tem recebido grande atenção devido às combinações de simplicidade, baixo custo e grande possibilidade de aplicações em tratamento de materiais (PENKOV et. al., 2015).

Atualmente um elevado número de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias aplicadas ao plasma atmosférico vem sendo realizados. As chamadas descargas de incandescência à pressão atmosférica vem ganhando espaço e se tornando mais competitivas nos processos de deposição, tratamento e corrosão, principalmente por razões econômicas (D'AGOSTINO et al., 2005).

Plasmas à pressão atmosférica são utilizados em uma grande variedade de aplicações, principalmente em modificações de materiais. As fontes tradicionais de plasmas atmosféricos são os arcos por transferência, tochas de plasma, descargas de coroa e descargas de barreira dielétrica (SCHUTZE et al., 1998).

De acordo com Winter, Brandenburg e Weltmann (2015), o plasma pode ser classificado em dois tipos, o plasma em equilíbrio termodinâmico (LTE) e o plasma em não equilíbrio termodinâmico (N – LTE). O plasma LTE, também chamado de plasma térmico, possui a temperatura dos elétrons igual a temperatura das partículas pesadas, com alta densidade de elétrons da ordem de 10^{21} m^{-3} .

No plasma em equilíbrio termodinâmico ocorre um grande número de colisões elásticas entre elétrons e partículas neutras, provocando altas temperaturas, excedendo 3300 K. Devido à alta temperatura do gás este tipo de plasma é utilizado na indústria metalúrgica (SCHUTZE et al., 1998).

De forma contrária, os jatos de plasma N – LTE, também chamados de jatos de plasma frio, possuem temperatura das partículas pesadas na faixa de 300 a 1000 K e com densidade de elétrons tipicamente abaixo de 10^{19} m^{-3} . Neste tipo de plasma os elétrons de maior energia produzem colisões elásticas, porém, a maioria produz colisões inelásticas. Desta forma podem ser consideradas estáticas as partículas pesadas, comparadas aos elétrons, pois a temperatura de

translação permanece próxima à ambiente (WINTER, BRANDENBURG, WELTMANN, 2015).

Plasmas produzidos em não equilíbrio operam com baixas temperaturas do gás, como é o caso das descargas por coroa e plasma por microdescargas em DBD, sendo adequados para aplicações em materiais termosensíveis, esterilização de superfícies e controle de poluente do ar. Recentemente, aplicações biomédicas tem utilizado o plasma do tipo N – LTE em aplicações de inativação microbiana, esterilização de equipamentos médicos, coagulação do sangue e aplicações odontológicas (ROCHA, 2009).

3.3 DISCARGA DE BARREIRA DIELETRICA (DBD)

Uma descarga de barreira dielétrica (DBD) é provocada quando uma alta tensão é aplicada entre dois eletrodos metálicos, com a existência de um material dielétrico entre eles. Uma grande quantidade de cargas elétricas se acumula na superfície do dielétrico, rompendo a rigidez dielétrica do dielétrico e do gás, provocando micro descargas (LAROUSSE; AKAN, 2007).

Um jato de plasma à pressão atmosférica emprega um eletrodo acoplado capacitivamente e produz uma descarga estável à pressão atmosférica, que é gerada através de um sinal de frequência aplicado ao eletrodo (PARK et al., 2000). O plasma por DBD é gerado através da sucessão de micro arcos, com duração de 10 a 100 nanosegundos, distribuídos aleatoriamente no espaço e no tempo (SCHUTZE et al., 1998).

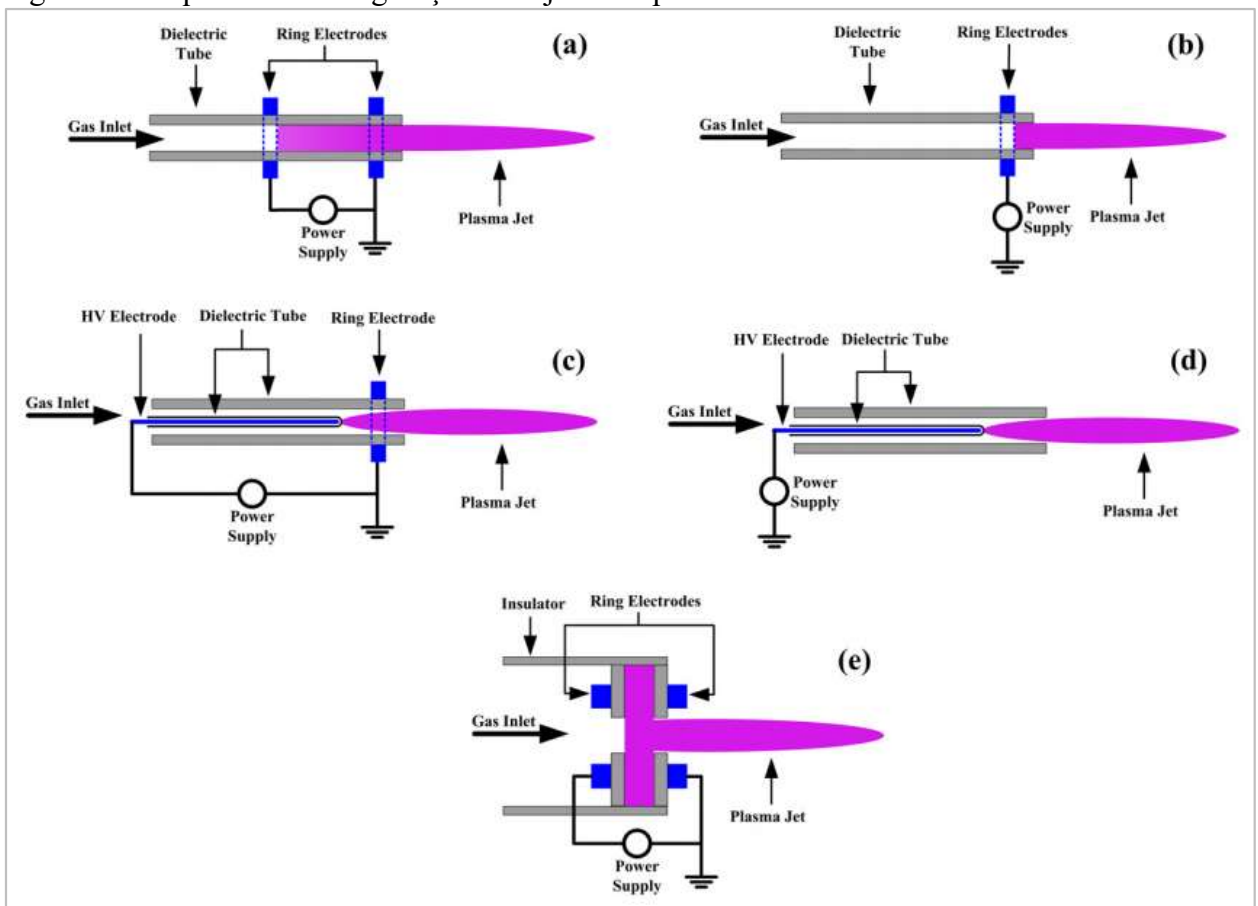
3.3.1 Configurações dos jatos de plasma DBD

Para os jatos de plasma DBD existem muitas configurações diferentes. Podem ser visualizados, através da Figura 1, alguns esquemas de configurações. Cada configuração possui suas particularidades gerando diferenças no plasma produzido.

Na Figura 1 (a) é apresentada uma configuração relatada pela primeira vez por TESCHKE et al. (2005), que consiste em um tubo dielétrico e dois eletrodos de metal em forma de anel sobre a parte externa do tubo. O fluxo de gás (Ar, He) flui através do dielétrico tendo uma fonte de alimentação de alta tensão (AT) aplicada aos eletrodos. A temperatura do gás é próxima a ambiente e o consumo de potência é de alguns Watts. Com um fluxo de gás na saída inferior a 20m/s o jato de plasma se mostrou homogêneo (LU, LAROUSSE E PUECH, 2012).

Um eletrodo de anel é retirado na configuração mostrada na Figura 1 (b), fazendo com que a descarga dentro do tubo dielétrico seja enfraquecida. Na Figura 1 (c) um eletrodo de anel é substituído por um eletrodo no formato de uma haste, que é inserido dentro de um tubo dielétrico interno, tendo uma de suas extremidades fechada para acomodação da haste. A fonte de alimentação agora é aplicada no eletrodo de haste em relação ao eletrodo de anel, aumentando a interação do campo elétrico ao longo do eletrodo (LU, LAROUCSI E PUECH, 2012). De acordo com os estudos de Walsh e Kong's (2008) um campo elétrico de maior intensidade ao longo do eletrodo é favorável a produzir jatos de plasma mais longos e mais ativos quimicamente.

Figura 1 – Esquema de configurações dos jatos de plasma DBD.



Fonte: Lu, Laroussi e Puech, 2012.

Na Figura 1 (d) relatada por Lu et al. (2008), não há a presença de eletrodos de anel, sendo utilizado apenas um eletrodo em forma de haste, enfraquecendo a descarga dentro do tubo. As descargas de maior intensidade dentro do tubo dielétrico foram as das Figuras 1 (a) e (c), onde foram estabelecidas condições favoráveis à geração de espécies reativas (LU, LAROUCSI E PUECH, 2012).

A configuração mostrada na Figura 1 (e) desenvolvida por Laroussi e Lu (2005), é diferente das outras quatro configurações anteriores. Dois eletrodos do tipo anel foram fixados no centro de dois discos dielétricos. Os furos no centro dos discos possuem um diâmetro de 3mm, com uma distância entre os dois discos de aproximadamente 5mm. Todas as configurações mostradas na Figura 1 podem ser alimentadas com fontes de corrente alternada (CA) ou fonte de corrente contínua (CC) pulsada (LU, LAROUSSE E PUECH, 2012).

Os jatos de plasma DBD oferecem várias vantagens, se comparados a outras fontes tradicionais de plasmas atmosféricos. A baixa potência transferida para o plasma e a temperatura do jato próxima à temperatura ambiente, são fatores positivos que condicionam este tipo de plasma a ser mais adequado para determinadas aplicações. Outro grande benefício está na inexistência de arco devido a utilização de um dielétrico (LAROUSSE; LU, 2005).

3.3.2 Fontes de alimentação do jato de plasma DBD

A técnica DBD opera com aplicação de sinais elétricos alternados com formas de onda senoidal e quadrada, onde estes sinais são aplicados entre eletrodos separados por um dielétrico. Em trabalhos recentes têm sido utilizados sinais de tensão pulsados unipolares, para excitação de DBD, atuando com diferentes frequências e valores de amplitude (LIU; NEIGER, 2001).

A configuração DBD possibilita operar também com sinais em frequências na faixa de micro-ondas, porém, a faixa de frequência mais utilizada em aplicações com geradores APPJ está entre 500Hz e 500KHz. Para vencer a barreira dielétrica entre os eletrodos e produzir a descarga de plasma à pressão atmosférica são aplicados, tipicamente, sinais com amplitude de tensão em torno de 10KV (KOGELSCHATZ; ELIASSON; EGLI, 1997).

De acordo com Eliasson e Kogelschatz (1991), o plasma produzido por DBD utiliza eletrodos excitados com pulso de tensão na faixa de 5 a 40KV, com frequências entre 50Hz a 80KHz, aplicados em um ou dois eletrodos, com pelo menos um deles revestido de material dielétrico.

3.3.3 Parâmetros de influência do APPJ

Diversos parâmetros podem influenciar o jato de plasma. A formação do jato, bem como seu comprimento e intensidade, depende de fatores diversos, os quais podem ser citados: (JARRIGE; LAROUSSE; KARAKAS, 2010)

- Material do substrato submetido ao plasma;
- Material e a distância entre os eletrodos;
- Gás nobre utilizado e a vazão de gás aplicada ao dispositivo injetor de plasma;
- Configuração do dispositivo gerador do jato de plasma, de acordo com os fatores construtivos e componentes utilizados.
- Fonte de alimentação de excitação do eletrodo de AT, podendo ser CA ou CC e ter sua intensidade e a frequência variável.

As variações e influências geradas na produção dos jatos de plasma podem ser percebidas através de diversos métodos de caracterização, como por exemplo a utilização de figuras de Lissajous, determinando a energia consumida para cada condição (WANG; ZHANG; WANG, 2012) ou através da medição do comprimento do jato produzido (JARRIGE; LAROSSI; KARAKAS, 2010).

Tendo em vista as considerações acima, o estudo aqui apresentado versará sobre o desenvolvimento de uma fonte de APPJ usando a configuração com apenas um eletrodo em forma de haste, mostrada na Figura 1 (d), sendo excitada por uma fonte de tensão CA senoidal, produzida por um sinal unipolar de onda quadrada aplicado em uma bobina de ignição automotiva convencional.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

Nesta seção serão apresentados os métodos de caracterização utilizados neste trabalho para caracterizar as amostras não tratadas e tratadas com o plasma atmosférico. Foram utilizadas as técnicas de microscopia de força atômica (Atomic Force Microscopy – AFM), para análise de superfícies das amostras, a espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy – FTIR), e a medida de ângulos de contato utilizada para mensurar a adesão dos líquidos na superfície das amostras.

3.4.1 Microscopia de força atômica

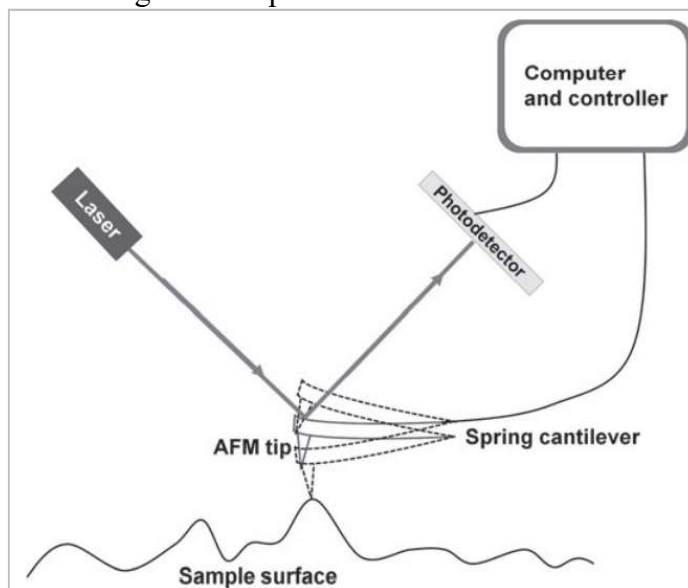
A microscopia de força atômica (AFM) é uma técnica de análise de morfologias de superfícies, muito utilizada em sólidos pouco lisos e pouco porosos. Diferente da microscopia óptica, este método não produz uma imagem pela reflexão da luz, sendo realizado por meio de

varredura superficial de uma amostra através de uma sonda, com objetivo de captar sua imagem topográfica a níveis moleculares (MEYER, 1992), desta forma permitindo a obtenção de imagens da morfologia dos materiais desde alguns nanômetros até poucos micrometros de área de varredura.

A sonda utilizada na varredura é uma ponta extremamente pequena, da ordem de poucos microns, normalmente de silício ou nitreto de silício, tendo o raio de curvatura da ponta a ordem de nanômetros. A ponta é fixada em uma haste flexível (cantilever) se movimentando de acordo com a força de interação atômica entre a ponta e os átomos da amostra. Um feixe de laser é aplicado na ponta do cantilever, sendo então defletido em direção a um fotodetector, gerando um sinal elétrico de acordo com a deflexão entre a ponteira e a amostra (Figura 2). O feixe defletido no eixo Z gera um sinal de acordo com a rugosidade da amostra, produzindo um sinal que é enviado a um sistema computadorizado, possibilitando através dos valores medidos a construção de uma imagem topográfica do relevo da amostra (BINNIG; QUATE; GERBER, 1986; ZANG et al., 2011).

As medidas podem ser realizadas em três modos: contato, contato intermitente e dinâmico. No modo contato a ponteira é posicionada a alguns nanômetros de distância da amostra e desliza sobre a superfície da amostra, produzindo uma imagem de acordo com a alteração do ângulo de reflexão do laser, em consequência da deflexão do cantilever, que é produzida de acordo com a varredura da força entre a ponteira e a amostra. No modo contato intermitente a ponteira desce na amostra, realizando a medida de sua altura e depois sobe novamente, se movendo na direção de varredura e utilizando a mesma técnica da alteração do ângulo de reflexão do laser para produzir a imagem. O movimento de descer e subir evita que ocorra o arraste da ponteira o que poderia causar danos à amostra, sendo o modo mais adequado para amostras imersas em líquidos e biológicas. O modo dinâmico (não contato) opera sem tocar na amostra, utilizando um cristal ressonante no cantilever. Ao iniciar a medida, a frequência da ponteira é referenciada e a interação entre a amostra e a ponteira produz uma força de atração que altera a frequência de vibração, possibilitando ao equipamento registrar estas variações e consequentemente produz uma imagem de acordo com a superfície da amostra e as forças de interação (ZANETTE, 2010).

Figura 2 – Diagrama simplificado de funcionamento de um AFM



Fonte: Zang et al., 2011.

3.4.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier

Instrumentos que medem a absorção ou a transmitância da matéria são chamados de espectrômetros. A espectroscopia infravermelha por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica que permite estudar a interação de luz infravermelha com a matéria, sendo utilizada para medir a intensidade da radiação infravermelha em função da frequência ou comprimento de ondas absorvidas ou transmitidas após passar por um material (NASESKA, 2016).

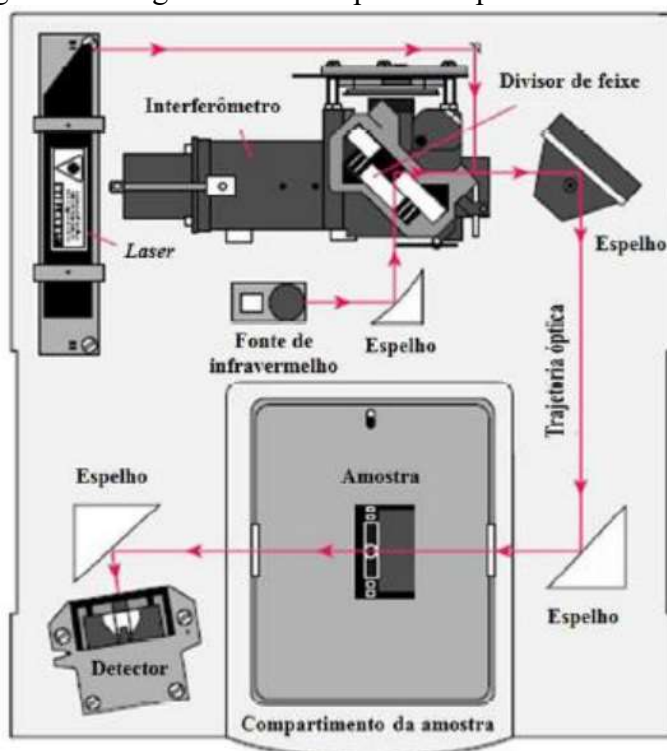
O FTIR é um tipo específico de espectrômetro capaz de medir e analisar o espectro vibracional de amostras diversas possibilitando inferir quais moléculas estão presentes na amostra e em alguns casos permite também estimar qual é a sua concentração. A espectroscopia de infravermelha por transformada de Fourier é uma técnica de análise química que pode ser utilizada em diversos tipos de amostras incluindo sólidos, líquidos, gases, semi-sólidos, polímeros, materiais orgânicos e não orgânicos, materiais biológicos e substâncias puras (SMITH, 2011), na forma de filme fino, pó, películas e até mesmo gases.

Neste tipo de técnica a radiação contendo os comprimentos de onda de interesse é separada em dois feixes, um deles permanecendo fixo e o outro se movendo com o espelho móvel. Através da variação das distâncias percorridas pelos dois feixes é possível medir uma sequência de interferências construtivas e destrutivas, e como resultado obter variações na intensidade da radiação coletada pelo detector (interferograma). A transformada de Fourier é responsável por converter as leituras do detector no domínio do tempo para o domínio da frequência. A amostra recebe a radiação e por meio de posições sucessivas do espelho móvel é

possível varrer o espectro completo de infravermelho. Altas resoluções são alcançadas devido a toda faixa de radiação passar simultaneamente pela amostra em um pequeno intervalo de tempo, obtendo-se ótimos espectros combinando várias varreduras para diminuir o ruído (SILVERSTEIN; BASSLER; MORRILL, 1994).

Na Figura 3, é apresentado o diagrama de um espectrômetro FTIR convencional. A radiação é refletida no interferômetro, sendo modulada pelo espelho móvel (lado esquerdo) e refletida pelos dois espelhos localizados do lado direito, passando através da amostra que está na parte inferior do compartilhamento da amostra. Depois de penetrar pela amostra, a radiação alcança o transdutor e um sistema eletrônico registra o sinal, armazenando as leituras e enviando para um computador (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009).

Figura 3 – Diagrama de um espectroscópio infravermelho.



Fonte: Holler, Skoog e Crouch., 2009.

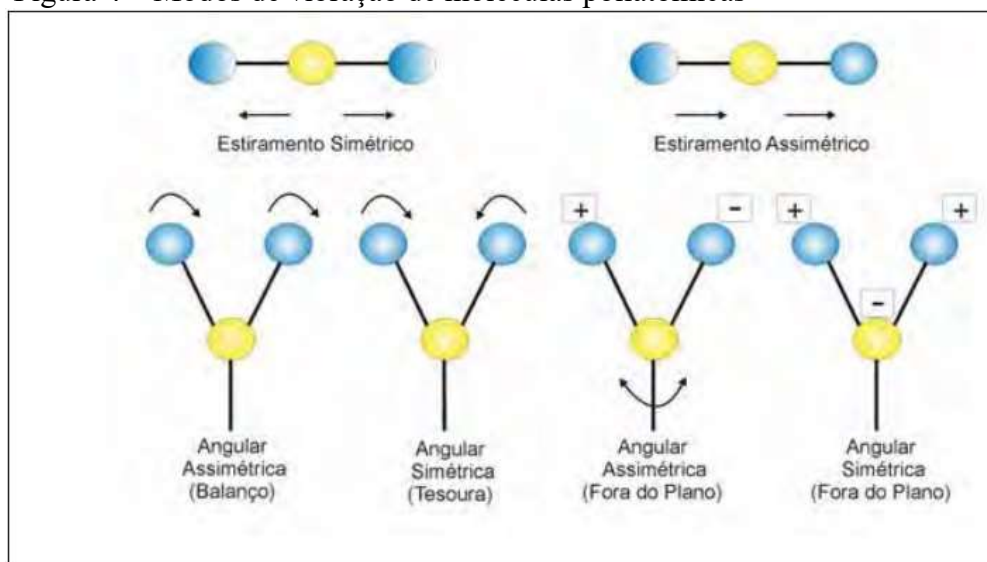
A espectroscopia infravermelha baseia-se na avaliação da absorção da radiação em diferentes frequências, identificando grupos funcionais em amostras orgânicas e não orgânicas, com referência nos valores de absorção de cada elemento. De acordo com o processo de absorção ou transmissor da radiação infravermelha realizada pela matéria é possível medir a quantidade de radiação que uma amostra absorve (ou transmite) para cada comprimento de

onda, extraindo o padrão espectral, sendo utilizado para identificar uma amostra medida. (NASESKA, 2016).

Para que a radiação infravermelha seja identificada por esta técnica, deve haver variação do momento de dipolo da molécula como resultado de seu movimento rotacional ou vibracional. Caso a molécula tenha as condições necessárias para absorver a radiação, ou seja, momento de dipolo elétrico diferente de zero, um pico de absorção em função do número de onda será detectado.

A absorção da radiação implica necessariamente em algum tipo de vibração da molécula sendo as vibrações simétricas e assimétricas. As vibrações moleculares também podem ser de estiramento (deformação axial) ou de deformação angular de acordo com a representação da Figura 4, apresentada abaixo (SALA, 2008).

Figura 4 – Modos de vibração de moléculas poliatômicas



Fonte: Sala, 2008.

A região espectral do infravermelho compreende o intervalo do número de onda de aproximadamente 12.800 a 10 cm^{-1} ou comprimento de onda de $0,78$ a $1\mu\text{m}$. A espectroscopia infravermelha é utilizada para análises quantitativas e qualitativas, e seu espectro pode ser dividido em três faixas: próximo, médio e distante, conforme mostrado na Tabela 1 (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009).

Tabela 1 – Regiões do Espectro Infravermelho

Região	Intervalo de comprimento de onda (μm)	Intervalo de número de onda (cm^{-1})	Intervalo de frequência (Hz)
Próximo	0,78 a 2,5	12.800 a 4.000	$3,8 \times 10^{14}$ a $1,2 \times 10^{14}$
Médio	2,5 a 50	4.000 a 200	$1,2 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{14}$
Distante	50 a 1.000	200 a 10	$6,0 \times 10^{12}$ a $3,0 \times 10^{11}$

Fonte: Adaptado de Holler, Skoog e Crouch., 2009.

Para realização de análises de composição química de materiais poliméricos a espectroscopia infravermelha é uma das técnicas mais empregadas devido aos diferentes grupos funcionais que constituem as moléculas absorverem a radiação na região do infravermelho em comprimentos de onda específicos (HOLLER; SKOOG; CROUCH, 2009).

3.4.3 Medida do ângulo de contato

De acordo com Nascimento (2015) a molhabilidade é a capacidade que um líquido possui de se aderir, sob a forma de uma gota, em uma superfície sólida, em um meio inerte, gás ou líquido. Quanto maior for a aderência, maior será a área de contato da gota com a superfície sólida. Deste modo, melhor será a molhabilidade do líquido na superfície. As características superficiais de um sólido podem ser descritas através de sua hidrofobicidade, em que a molhabilidade de uma superfície se torna uma propriedade muito importante.

A forma para se mensurar e determinar a molhabilidade de superfícies é utilizando o método de medida do ângulo de contato. Quando um líquido é aplicado sobre a superfície de um sólido, ele se mantém como uma gota estabelecendo um ângulo de contato entre a fase líquida e sólida (COUTINHO, 2007).

Existem na literatura diversas técnicas experimentais para determinar a medida do ângulo de contato entre um líquido e uma superfície sólida, no entanto em todas elas o ângulo é definido através da avaliação do contato entre as fases. Se a interação entre as fases for intensa, a molhabilidade será alta, e o ângulo de contato será baixo. Se a interação entre as fases for baixa, a molhabilidade será baixa, sendo assim o ângulo de contato será alto (SANTOS, 2003).

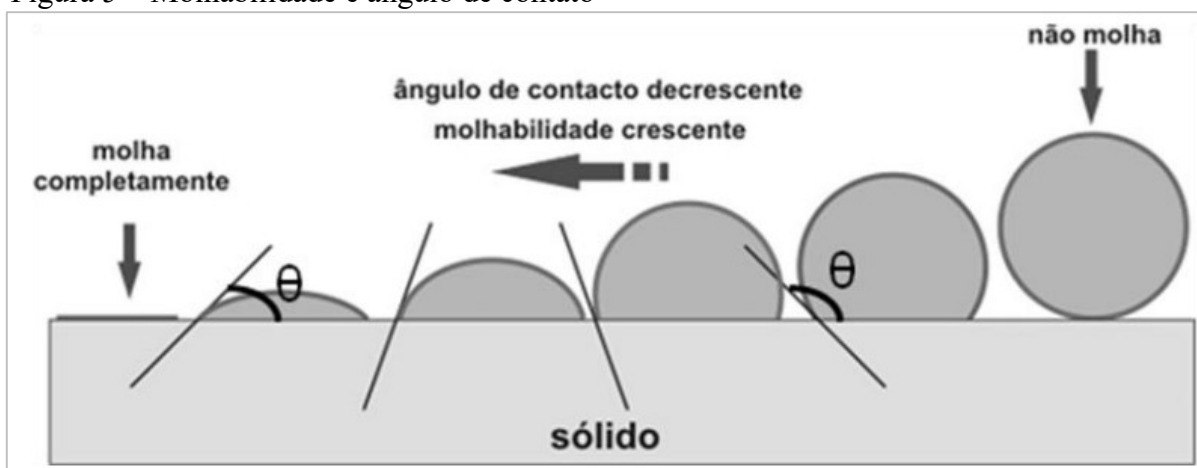
Quando existe uma interface entre um líquido e um sólido, o ângulo de contato entre a superfície do líquido e o contorno da superfície de contato é descrito como θ (letra minúscula teta). No estudo da físico-química de líquidos se destaca a medição do ângulo de contato de

molhabilidade que consiste no espalhamento de uma gota líquida sobre uma superfície sólida (SHAW, 1975).

De acordo com Luz, Ribeiro e Pandolfelli (2008), podemos citar uma técnica utilizada para caracterizar a molhabilidade de uma superfície, chamada de gota séssil (sessile drop – SD), sendo o método mais utilizado. Esta técnica consiste em realizar o gotejamento do líquido de menor ponto de fusão sobre um substrato sólido na temperatura desejada, objetivando determinar as tensões interfaciais entre diferentes materiais. As energias superficiais e interfaciais iram determinar a deformação de uma gotícula líquida quando aderida a uma superfície.

As superfícies podem apresentar tensões superficiais diferentes, pois características físicas como rugosidade e a topologia da superfície irão influenciar, podendo ser classificadas como hidrofílica, hidrofóbica, super-hidrofílica e super-hidrofóbica (YAO; HE, 2014). Na Figura 5, podemos visualizar umas representações de gotas depositadas sobre uma superfície sólida, mostrando a diminuição do ângulo de contato (θ) de acordo com aumento da molhabilidade.

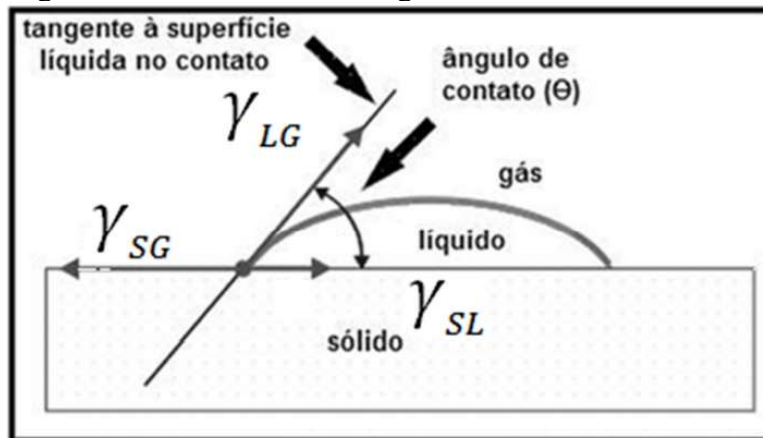
Figura 5 – Molhabilidade e ângulo de contato



Fonte: Silva, 2016.

De acordo com Coutinho (2007), a deposição de uma gota líquida em uma superfície sólida estabelecerá um ângulo de contato que dependerá das forças adesivas (espalhamento da gota) e forças coesivas (contração da gota), em que o ângulo de contato será definido pelo equilíbrio das tensões existentes nos três pontos de contatos entre as fases. Na Figura 6 é apresentado o esquema contendo as forças nos três pontos de contato entre as fases sólida, líquida e gasosa.

Figura 6 – Molhabilidade e ângulo de contato



Fonte: Nascimento, 2015.

A molhabilidade de uma superfície plana é definida pelo valor do ângulo de contato (θ), podendo ser calculado pela equação de Young (3.1), em que o ângulo de contato é o ângulo entre a tangente da superfície da gota na fronteira líquido-gás e a superfície do material sólido (YAO; HE, 2014).

$$\cos \theta = \frac{(\gamma_{SG} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LG}} \quad (3.1)$$

onde:

- γ_{SG} – tensão superficial interfacial entre o sólido e o gasoso;
- γ_{SL} – tensão superficial interfacial entre o sólido e o líquido;
- γ_{LG} – tensão superficial interfacial entre o líquido e o gasoso.

Uma superfície é caracterizada como hidrofóbica se o ângulo de contato for maior do que 90° e hidrofílica se menor que 90° . Se maior que 150° é classificada como super-hidrofóbica e se abaixo de 5° é considerada super-hidrofílica (YAO; HE, 2014).

No próximo capítulo serão apresentados em detalhes os projetos de hardware, software e mecânico do gerador APPJ, apresentando todos os materiais e recursos utilizados na construção do equipamento. Também serão mostrados os parâmetros de tratamento e caracterização de amostras de cobre e PVC utilizadas neste trabalho.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme comentado anteriormente, o desenvolvimento deste projeto foi motivado tendo em vista que não há, disponível no mercado, um equipamento completo, capaz de produzir um jato de plasma, contendo todas as funcionalidades necessárias que são requeridas para as atividades de pesquisa.

Alguns recursos tecnológicos capazes de produzir alguns efeitos desejados para produção do plasma são encontrados comercialmente, como é o caso do Kit de geração eficiente de alta tensão em alta frequência fabricado pela GBS Elektronik GmbH, modelo Minipuls 4 (Figura 7).

Figura 7 - Kit Minipuls 4 da GBS Elektronik



Fonte: GBS ELEKTRONIK, 2013.

As duas placas eletrônicas mostradas na Figura 7 produzem tensões senoidais em uma faixa de frequência de 5 a 20KHz e amplitudes com valores próximos dos 20KV, correspondendo a aproximadamente 14KV RMS (GBS ELEKTRONIK, 2013).

Com este gerador de pulso especial é possível produzir uma descarga de barreira dielétrica, contudo, deve-se considerar algumas limitações do produto, como o custo de aquisição relativamente alto e o kit ser composto apenas pelas placas eletrônicas.

Um equipamento destinado a atividades em laboratório e a pesquisas científicas deve possuir um conjunto de recursos mínimos para estar em condição de ser utilizado. Algumas características básicas, que são desejadas para um equipamento gerador de plasma APPJ, destinado ao uso em laboratório, são:

- Não oferecer risco de choque elétrico ao usuário, isolando elementos e enclausurando todos componentes eletroeletrônicos em gabinetes adequados;
- Disponibilizar uma interface amigável ao usuário, para que seja possível realizar ajustes de parâmetros e registros durante procedimentos experimentais;
- Oferecer recursos de proteção a componentes do equipamento e alarmes visuais ou sonoros, sinalizando possíveis avarias e mau-funcionamento da máquina;
- Além das partes elétricas, eletrônicas e mecânicas, deve fazer parte de um equipamento o circuito pneumático composto por um medidor e regulador de vazão, conexões e mangueiras flexíveis;
- O tubo injetor de plasma deve fazer parte do equipamento, sendo fixado em uma estrutura ligada ou não ao gabinete, posicionado acima de um porta amostras com altura regulável e utilizando um cabo elétrico com isolamento adequada ao sinal de alta tensão que é aplicado ao eletrodo.

Considerando todas as características listadas acima, foi desenvolvido um equipamento baseado em uma fonte de alimentação de alta tensão pulsada, capaz de gerar um sinal elétrico adequado para ser aplicado em um tubo injetor (caneta de plasma) e produzir o plasma em pressão atmosférica, por descarga de barreira dielétrica.

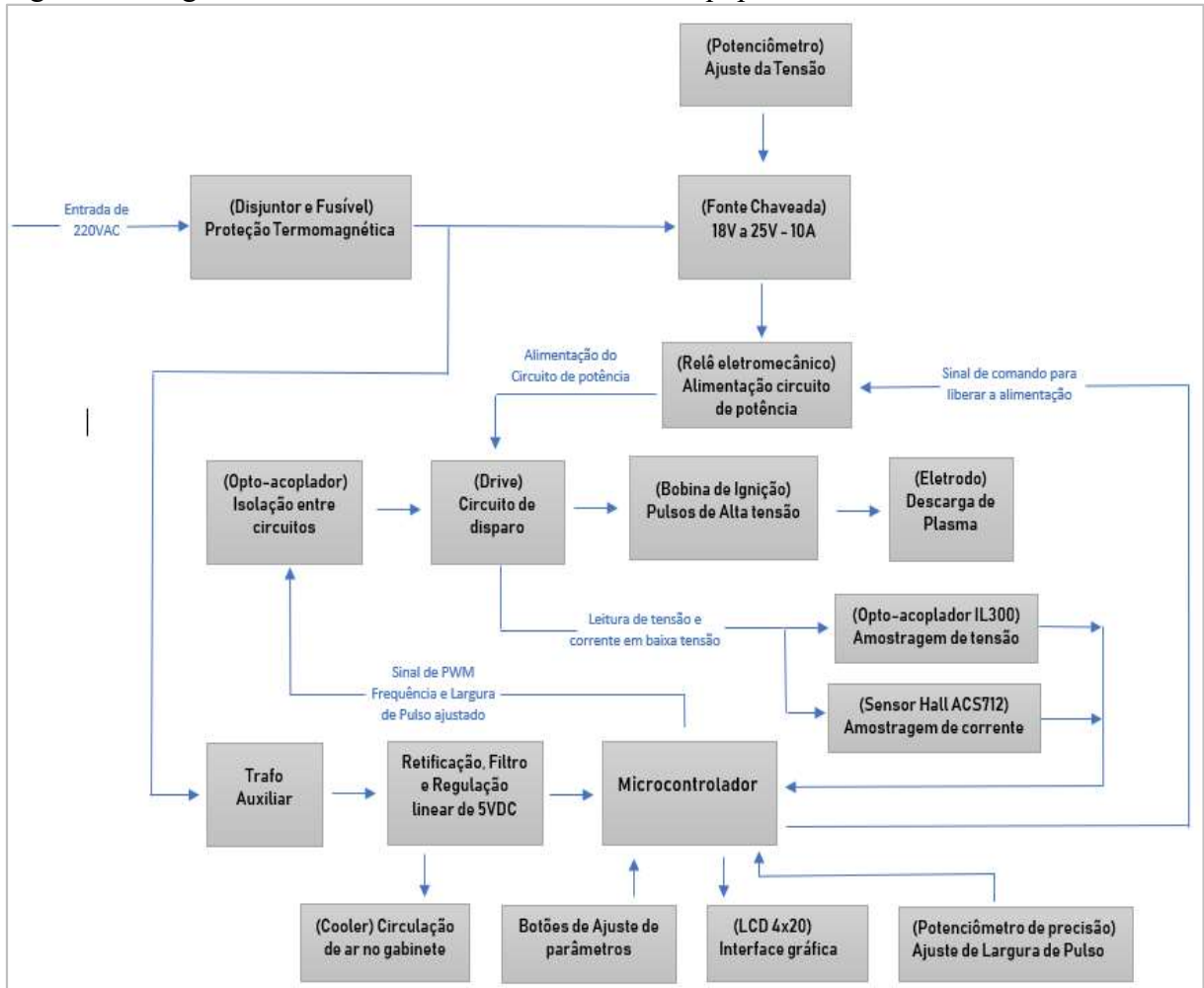
Inicialmente foram desenvolvidos quatro protótipos eletrônicos com objetivo de se obter todas as características e funcionalidades especificadas para o equipamento. Após esta etapa de prototipagem o equipamento final foi construído e será detalhado a seguir, sendo dividido em 3 partes: projeto elétrico e eletrônico, projeto mecânico e firmware do microcontrolador.

4.1 PROJETO ELETROELETRÔNICO

O projeto eletroeletrônico foi composto por chaves, display, botões, potenciômetros, elementos de proteção e manobra, placas eletrônicas, conexões, transformador, bobina de ignição, entre outros componentes. Na figura 8 é apresentado o diagrama de blocos, representando todo circuito elétrico do equipamento.

O circuito elétrico pode ser resumido em quatro principais partes, sendo a primeira composta por elementos de proteção e acionamento, através de um fusível de vidro, um disjuntor termomagnético de entrada e um relê eletromecânico de alimentação do circuito de potência.

Figura 8 - Diagrama de blocos do circuito elétrico do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Uma fonte de alimentação do tipo chaveada (SMPS), uma bobina de ignição e um eletrodo de alta tensão (AT), compõem a segunda parte, sendo estes elementos responsáveis pela alimentação e produção do sinal de alta tensão.

A terceira parte é constituída por duas placas eletrônicas, representando os blocos de disparo, fonte de alimentação auxiliar, sistema de controle (microcontrolador), leitura de sinais e isolamento entre circuitos.

A última parte é formada por acessórios do equipamento como display LCD, botões, potenciômetros, elementos de sinalização e cooler. Nos tópicos a seguir, serão apresentadas todas as partes do circuito eletroeletrônico em detalhes.

4.1.1 Elementos de proteção do equipamento

A utilização de dispositivos de proteção no projeto se torna necessária, pois além de proteger peças e componentes de máquina, estes elementos têm como função garantir a segurança do usuário e das instalações em que o equipamento for instalado.

De acordo com Franchi (2008), equipamentos que estão conectados a uma rede elétrica estão sujeitos a algum tipo de avaria ou falha elétrica, como sobretensão, queda de tensão, e desequilíbrio ou falta de fase.

Falhas oriundas da utilização e do funcionamento inadequado do equipamento podem ocorrer, em decorrência de componentes danificados ou sujeitos a operar sobre condições severas. Curto-circuito em componentes e sobrecarga são exemplos de falhas que podem existir durante a vida útil do equipamento.

No projeto do gerador de plasma foi utilizado um fusível de vidro de ação rápida, com o objetivo de proteger as placas eletrônicas de curto-circuito. Os fusíveis de ação rápida são indicados para a proteção de semicondutores como diodos, transistores e tiristores, normalmente utilizados para proteção de circuitos eletrônicos em geral (FRANCHI, 2008).

Outro elemento de proteção utilizado no projeto foi um disjuntor termomagnético. Utilizado como elemento de proteção e manobra em circuitos elétricos, este dispositivo é capaz de conduzir e interromper corrente em condições normais do circuito e também conduzir, por tempo específico, correntes anormais, como acontece em condições de sobrecarga e curto-circuito (NEGRISOLI, 1987).

Além de ser um elemento redundante de proteção, atuando em uma condição de curto circuito ou sobrecarga, o disjuntor possui uma função muito importante, possibilitando o seccionamento do sinal de alimentação de entrada, ou seja, funcionando como uma chave de proteção e bloqueio geral da máquina. Na Figura 9 são mostrados os elementos de proteção instalados na parte traseira do equipamento.

Figura 9 - Fusível e disjuntor instalados no gerador de plasma



Fonte: do Autor, 2019.

4.1.2 Fonte de Alimentação Chaveada do circuito de potência

O circuito de potência responsável por realizar o chaveamento da bobina de ignição demanda um consumo de potência relativamente alto. Esta potência consumida dependerá diretamente de dois fatores que são variáveis: o valor da tensão (amplitude) de alimentação e o valor da largura de pulso (duty cycle).

A escolha do tipo de fonte para alimentação do circuito de potência levou em consideração alguns fatores de caráter técnico e financeiro. Segundo Malvino e Bates (2011), uma fonte do tipo linear é composta por 4 principais estágios:

- Transformação: onde a tensão da rede é elevada ou reduzida por um transformador;
- Retificação: transforma o sinal alternado em um sinal pulsante, aplicando na carga apenas os semiciclos positivos ou negativos do sinal senoidal de entrada;
- Filtro: processo de deixar o sinal depois de retificado o mais próximo de um sinal contínuo, com o objetivo de reduzir o ripple (ondulação do sinal), normalmente utilizando capacitores eletrolíticos;
- Regulação: mantém o valor de tensão na saída da fonte fixo, mesmo se houver variação da tensão de entrada do regulador ou variação no consumo de potência da carga. Este circuito é composto normalmente por transistores operando na região linear e diodos Zener.

A principal vantagem das fontes lineares está no fato de que seu princípio de funcionamento e sua construção são de baixa complexidade, possibilitando ao projetista maior facilidade nos processos de desenvolvimento e fabricação. Outro fator positivo é a baixa emissão de ruídos, pois este tipo de fonte não opera no chaveamento em altas frequências, sendo uma alternativa para aplicações com circuitos sensíveis a ruídos (BRAGA, 2005).

As fontes lineares possuem desvantagens significativas, o que justifica a redução acentuada de sua utilização nas últimas décadas, uma vez que, grande parte dos projetos de equipamentos eletrônicos atuais já não utilizam este tipo de tecnologia.

Fatores como o rendimento, tamanho, peso e custo diferenciam as fontes do tipo chaveadas das fontes convencionais lineares. O custo das perdas de energia, devido ao baixo rendimento e à dificuldade de remover o aquecimento excessivo devido à dissipação de energia, fazem das fontes lineares inadequadas para uma infinidade de projetos (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995).

- Possibilidade de ajuste da tensão de saída de 16 a 27VCC;
- Capacidade de corrente máxima de saída de 10A e
- Proteção de saída: curto-circuito e sobrecarga.

Um potenciômetro linear de 1Kohms foi inserido na fonte, substituindo o trimpot de ajuste de tensão de saída, com objetivo de disponibilizar ao usuário do equipamento a possibilidade de ajustar a tensão aplicada na bobina, em uma faixa de 18 a 25VCC.

O potenciômetro foi instalado no painel frontal possibilitando o ajuste de parâmetros e operação da máquina, como a intensidade do plasma, a corrente da bobina, o ponto de ignição do jato de plasma, entre outros.

Alguns fatores podem ser grandes obstáculos quando se opta por trabalhar com fontes do tipo SMPS. Além da complexidade de uma fonte chaveada, uma maior quantidade de componentes é necessária, exigindo maior conhecimento e experiência do projetista. Devido à alta frequência do oscilador de uma fonte chaveada, uma grande quantidade de radiação eletromagnética é emitida, causando interferências em outros circuitos eletrônicos. Para eliminar ou minimizar este problema, filtros de frequência devidamente calculados e blindagem em cabos e encapsulamentos devem ser utilizados (MALVINO; BATES, 2011).

Os fatores negativos da utilização de uma fonte do tipo chaveada não foram barreiras no projeto, visto que todo circuito microcontrolado responsável pelas interfaces e controle, possui isolamento elétrica através de um circuito optoacoplador, não estabelecendo nenhuma conexão elétrica com o circuito de potência, apenas conexão por luz.

4.1.3 Medição de corrente por efeito hall

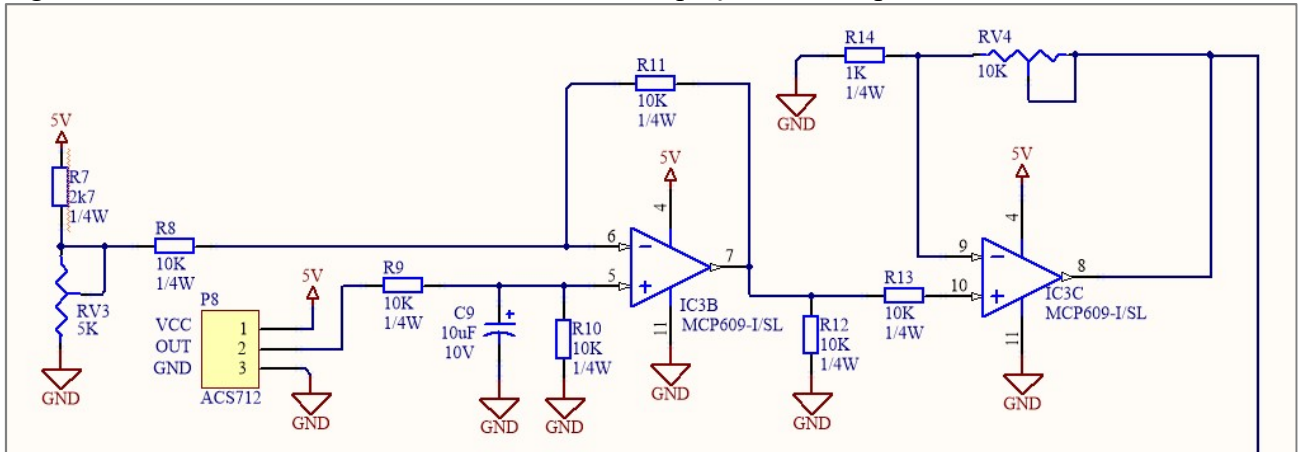
A amostragem de corrente foi realizada utilizando o circuito integrado (CI) ACS712, que possui um sensor de corrente linear baseado no efeito hall. Este circuito integrado é capaz de medir com precisão correntes alternadas e contínuas, produzindo um valor de tensão de saída proporcional ao valor de corrente medido, com histerese magnética próxima de zero. Podendo medir valores de até trinta amperes positivos e negativos, este sensor é encapsulado em um circuito integrado do tipo SOIC, montagem superficial, possibilitando uma isolamento entre o sinal de corrente medido e a saída de tensão (ALLEGRO, 2017).

Das três opções disponíveis, o sensor ACS712-20A-T foi escolhido para ser utilizado no projeto, medindo uma faixa de valores de corrente de -20 a 20 amperes de corrente. Na

Figura 11, pode ser observado que o sinal do sensor de corrente é aplicado em dois blocos com amplificador operacional, antes de ser enviado para a entrada analógica do microcontrolador.

A adequação da saída do sensor é necessária para que o sinal esteja dentro da faixa de leitura da entrada analógica (AI) e para que se utilize a máxima da faixa de leitura da porta analógica.

Figura 11 - Coleta do sinal do sensor ACS712 e adequação do sinal para a AI.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O primeiro bloco é composto pelo amplificador operacional IC3B e seus componentes periféricos, configurado como um subtrator de tensão ou amplificador diferencial, de apenas um estágio, proporcionando a subtração entre os dois sinais de entrada. Utilizando o teorema da superposição podemos encontrar a relação da saída pelos sinais de entrada, descrito pela equação 4.1 mostrada abaixo: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

$$V_o = \left(\frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \times \frac{R_8 + R_{11}}{R_8} \times V_{sensor} \right) - \left(\frac{R_{11}}{R_8} \times V_{ref} \right) \quad (4.1)$$

onde:

- V_o – tensão de saída do subtrator, em Volts;
- V_{sensor} – sinal de tensão de saída do sensor Hall, em Volts;
- V_{ref} – valor de tensão ajustado na entrada inversora do Subtrator, em Volts.

Considerando que neste circuito foram utilizados resistores de precisão com 1% de tolerância e que todos os resistores do circuito subtrator são de mesmo valor, a equação 4.1 pode ser reescrita através da equação 4.2:

$$V_o = V_{sensor} - V_{ref} \quad (4.2)$$

Esta subtração é necessária pois o sensor ACS712 realiza uma leitura simétrica de corrente, porém, no projeto, a faixa de interesse medida contempla apenas correntes positivas. Como o sensor fornece uma saída de aproximadamente 2,5V quando não há circulação de corrente, sendo o centro da faixa de leitura, torna-se necessário deslocar o valor do zero de corrente medida para aproximadamente 0V.

A referência de tensão aplicada à entrada inversora do operacional é ajustada através de um divisor de tensão composto pelo resistor R7 e pelo trimpot RV3. O valor de referência é ajustado em aproximadamente 2,5V, tendo como referência o mínimo valor de offset de saída do amplificador operacional.

O último bloco é composto por um amplificador não inversor IC3C, mostrado também na Figura 11. Este estágio é responsável por realizar um ganho no sinal de aproximadamente 2,5 vezes, visto que o alcance do sinal de saída é de aproximadamente 2V, para uma medição de 20A.

O amplificador operacional, na configuração não inversor, é considerado um multiplicador de ganho constante, também descrito como uma fonte de tensão controlada por tensão (VCVS) não invertendo o sinal de entrada, sendo mais amplamente utilizado por apresentar melhor estabilidade em frequência. Através da equação 4.3 pode ser determinado o ganho do circuito: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

$$V_{saída} = \left(1 + \frac{RV4}{R14}\right) \times V_{ent} \quad (4.3)$$

onde:

- $V_{saída}$ = tensão de saída do amplificador não inversor, em Volts;
- V_{ent} = tensão aplicada na entrada do amplificador não inversor, em Volts.

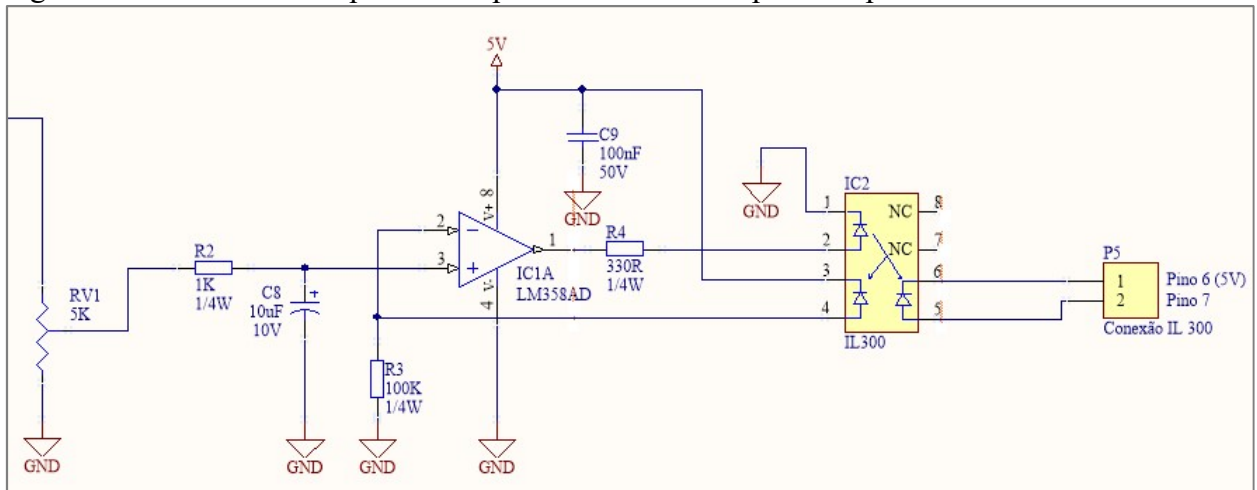
O sinal de saída é aplicado em uma entrada analógica do microcontrolador, capaz de realizar a leitura de um sinal de 0 a 5VCC, através de um ADC (Analog to digital converter), um conversor analógico digital com uma resolução de 10 bits. Este valor é convertido para uma escala de engenharia, através de um programa que é executado no microcontrolador e enviado para um display, onde poderá ser visualizado pelo usuário.

4.1.4 Circuito de amostragem de tensão

O circuito de amostragem de tensão é responsável por coletar amostras do valor tensão de alimentação do circuito de potência, e gerar um valor de tensão proporcional, que esteja dentro da faixa de leitura da entrada analógica do microcontrolador. Na Figura 12 pode ser visualizado o circuito responsável por realizar esta função, fazendo parte da placa de potência.

O resistor ajustável RV1 está conectado à tensão de alimentação do circuito de potência. Através do trimpot é possível ajustar o valor da tensão na entrada do bloco com amplificador operacional.

Figura 12 - Circuito de acoplamento óptico com IL300 da placa de potência



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Após coletar a amostra de tensão para um valor adequado através do trimpot, é necessário optoacoplar o sinal que será enviado para o microcontrolador, transmitindo o valor de tensão amostrado através de um acoplador óptico, sem nenhuma conexão elétrica entre os circuitos de potência e controle.

O circuito integrado optoacoplador escolhido foi o IL300, mostrado na Figura 12 (IC2). Consiste em um LED infravermelho que irradia um sinal de luz em um arranjo bifurcado composto por dois fotodiodos, produzindo um feedback isolado do sinal. O que torna a utilização deste chip muito interessante é o acoplamento de sinais analógico, visto que a grande maioria dos acopladores trabalham apenas com sinais digitais (VISHAY, 2014).

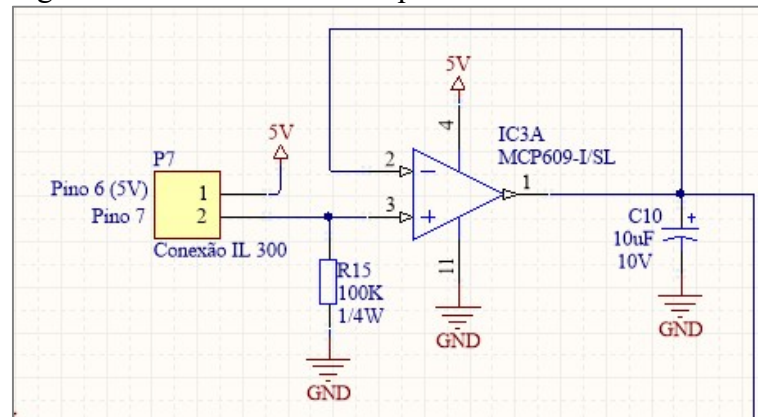
A grande vantagem de um acoplador óptico é o isolamento elétrico entre os circuitos. O ponto comum de um circuito é diferente do ponto comum do outro, podendo aterrar um dos circuitos e deixar o outro em flutuação. Acopladores ópticos substituem os relés eletromecânicos em diversas aplicações onde é necessário a isolação elétrica entre circuitos,

oferecendo maior velocidade de operação, tamanho reduzido, maior vida útil e compatibilidade com circuitos microprocessados digitais (MALVINO; BATES, 2011).

Os fotodiodos do circuito integrado IL300, denominados pelos números 2 e 3 na Figura 12, operam como uma fonte de corrente proporcional à incidência do fluxo óptico alimentado pelo LED, mostrado como diodo 1. O amplificador de entrada IC1A está na configuração não inversora, e possui uma realimentação negativa, o que define uma relação aproximada dos valores entre a tensão da entrada não inversora com a tensão da entrada inversora (VISHAY, 2014).

Desprezando as diferenças de resposta dos fotodiodos 2 e 3, e considerando que o resistor R3 (Figura 12) e R15 (Figura 13) são iguais, a tensão aplicada na entrada não inversora do IC1A, circuito de entrada, será a mesma tensão gerada na entrada não inversora do IC3A, circuito de saída.

Figura 13 - Circuito buffer da placa de controle



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O estágio de saída, agora presente na placa de controle, é composto por um amplificador seguidor de tensão ou buffer (Figura 13). Considerado um caso especial do amplificador não inversor, o buffer é utilizado em aplicações de ganho de potência e isolamento de impedância. Essa configuração é denominada seguidora de tensão porque a tensão de entrada possui o mesmo valor da tensão de saída. (BOGART JR, 2001)

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (4.4)$$

onde:

- A_v = ganho de tensão do amplificador não inversor
- R_f = resistor de realimentação do amplificador não inversor

- R_I = resistor de entrada do amplificador não inversor

Como R_f é igual a zero e R_I igual a infinito, quando utilizada a configuração buffer, com a saída ligada a entrada inversora, o ganho em malha fechada será unitário:

$$A_v = 1 + \frac{0}{\infty} \qquad A_v = 1 \qquad (4.5)$$

Foi necessário a utilização de um buffer no projeto, devido à impedância de entrada (Z_i) da AI do microcontrolador influenciar no valor de tensão gerado no resistor R15. Desta forma, como a impedância de entrada de um circuito buffer é muito alta, irá drenar o mínimo de corrente, garantindo assim um casamento de impedância para o circuito de saída (PERTENCE JR, 2003).

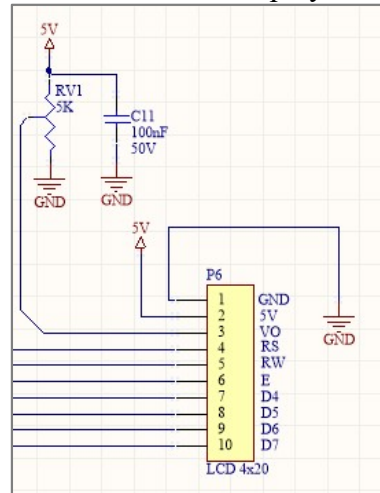
Os capacitores C8 (Figura 12) e C10 (Figura 13), ambos capacitores eletrolíticos de alumínio de 10 μ F são responsáveis por eliminar possíveis oscilações nos valores de tensão de entrada e saída do circuito. Os conectores P5 (Figura 12) e P7 (Figura 13) são conectados através de cabos interligando o circuito opto-acoplado da placa de potência ao circuito de buffer montado na parte de controle.

4.1.5 Interface gráfica e entrada de dados

A interatividade do equipamento com o usuário é realizada através de uma interface gráfica, potenciômetros e botões de ajuste de parâmetros. A interface gráfica é realizada através de um display de cristal líquido (LCD) do tipo alfanumérico 20x4L, sendo uma matriz para escrita de caracteres de 4 linhas por 20 colunas.

O LCD é ligado diretamente na placa de controle através do conector P6, mostrado na Figura 14. Um cabo flat de 10 vias foi utilizado para conexão. A porta B do microcontrolador PIC16F877A é destinada para comunicação com o display, utilizando três pinos de controle (Enable, RS e RW) e quatro pinos para dados, transmitindo um nibble de cada vez. O ajuste de contraste pode ser feito através do resistor RV1 que é ligado ao pino 3 do display.

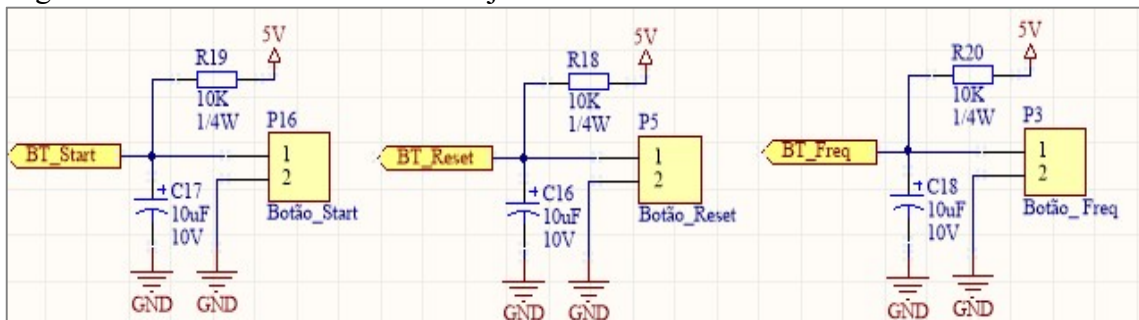
Figura 14 - Conexões do display alfanumérico



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Três botões sem retenção são utilizados para ajustar os parâmetros do equipamento. Os botões ‘Start’, ‘Freq’ e ‘Reset’ são ligados respectivamente nos conectores P16, P3 e P5 da placa de controle, conforme é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Conexões dos botões de ajuste



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

De acordo com a Figura 15, os resistores R18, R19 e R20 tem como função manter o nível lógico alto na porta do microcontrolador, quando os botões estiverem em repouso (resistores pull-up), evitando uma condição de flutuação das portas.

Os capacitores C16, C17 e C18 ligados às entradas digitais dos botões tem a função de eliminar possíveis oscilações provocadas pelo acionamento dos botões (efeito bounce). Este recurso provoca um amortecimento no sinal, gerando um pequeno atraso na transição de 5V para 0V, atenuando ruídos e oscilações indesejadas.

Cada um dos três botões possui dupla função, uma principal e outra secundária. Segue abaixo um resumo dos botões existentes no frontal e suas funções:

- Botão ‘Start’: ao ser pressionado energiza o circuito de potência do equipamento, deixando o equipamento em condição de operação. Ao ser pressionado novamente desliga a alimentação do circuito de potência do equipamento. Este botão também é utilizado como ‘confirma’ para os valores ajustados em modo setup;
- Botão ‘Freq’: seleciona o valor de frequência do sinal aplicado na bobina de ignição. A frequência de operação pode ser ajustada para os seguintes valores: 1,5KHz, 2KHz, 2,5KHz, 3KHz, 4KHz, 5KHz, 6KHz, 8KHz e 10KHz. Este botão também é utilizado como ‘incremento’ dos parâmetros de setup do usuário.
- Botão ‘Reset’: utilizado para reconhecer falhas geradas por temperatura ou sobrecorrente. Este botão também é utilizado como ‘decremento’ dos parâmetros de setup do usuário.

Durante inúmeros testes de produção do plasma utilizando os protótipos eletrônicos, foi verificado a faixa de frequência mais adequada para produzir a ignição do plasma. Desta forma, valores entre 1,5KHz a 10KHz foram considerados como valores de ajustes disponíveis para o usuário do equipamento.

A frequência do sinal aplicado na bobina de ignição, bem como a largura de pulso, pode ser visualizada no display e ajustada pelo usuário. A largura de pulso pode variar de 0 a 100% e seu ajuste é realizado através de um potenciômetro linear de precisão.

Outro parâmetro disponível para visualização no LCD é o valor da tensão de alimentação do circuito de potência, podendo ser ajustada através de um potenciômetro existente no frontal do equipamento, possibilitando o ajuste na faixa de 18 a 25VCC.

O valor da corrente média consumida pela bobina de ignição pode ser visualizado no display, sendo apenas um parâmetro de visualização, contudo com uma importância relevante para o usuário, principalmente por ser uma grandeza dependente da tensão aplicada na bobina.

Valores de temperatura de componentes internos do equipamento também são visualizados no LCD, garantindo mais segurança e vida útil do equipamento. A temperatura da bobina de ignição e do dissipador de calor do transistor Mosfet são mostradas no display, possibilitando ao usuário monitor os valores durante uma condição de operação normal.

Através do setup de usuário é possível programar os alarmes de alta temperatura para evitar a queima ou mau funcionamento da máquina. Ao atingir o valor de limite de temperatura, o circuito de potência é desligado imediatamente, gerando um alarme visual e sonoro.

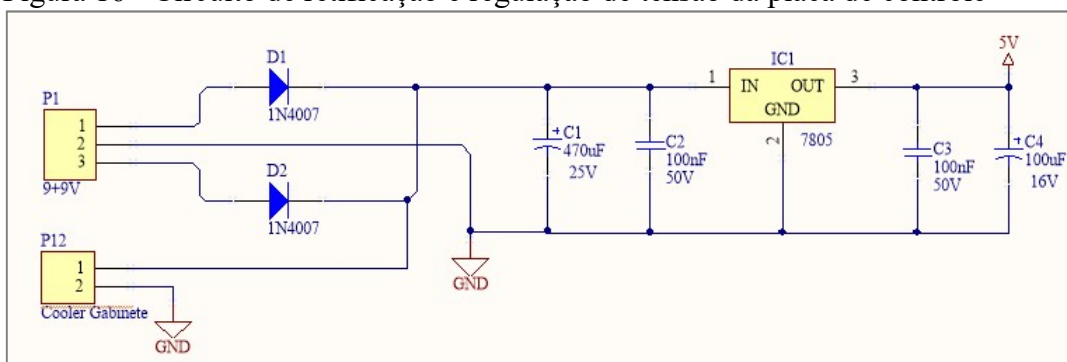
4.1.6 Fonte de alimentação do circuito de controle

Nesta etapa do projeto optou-se por utilizar uma fonte linear devido a sua simplicidade e sua baixa emissão de ruídos eletromagnéticos, considerando a presença de um circuito digital instalado dentro de um mesmo gabinete e que apresenta alta sensibilidade a ruídos e interferências eletromagnéticos.

A fonte de alimentação da placa de controle é composta por um transformador abaixador de tensão de 220VCA para 18VCA, tendo o enrolamento secundário com derivação central fornecendo 9+9VCA a entrada (conector P1), mostrada na Figura 16.

O sinal do enrolamento secundário do transformador é retificado através de um retificador de onda completa em Tap central com filtro capacitivo. No estágio de saída da fonte, um regulador de tensão é responsável por regular a tensão de saída em 5VCC, pois todos os componentes da placa de controle são alimentados com 5V em corrente contínua.

Figura 16 - Circuito de retificação e regulação de tensão da placa de controle



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O dimensionamento dos componentes do circuito da fonte considerou uma corrente máxima de saída de aproximadamente 400mA. Segue abaixo um resumo das principais especificações elétricas dos componentes:

- diodos retificadores: 1N4007 com PIV = 1000V e corrente média de saída de 1A;
- Regulador de tensão: LM7805 regulador positivo de 5V e corrente máxima de 1A;
- Capacitor de Filtro C1: Eletrolítico de alumínio de 470µF e isolamento de 25V/85°C;
- Capacitor de Filtro C4: Eletrolítico de alumínio de 100µF e isolamento de 25V/85°C;
- Capacitores supressores C2 e C3: Cerâmico do tipo disco de 100nF e 50V;
- Transformador: Entrada de 220VCA e saída de 9 + 9VCA - 500mA.

Os capacitores C2 e C3 tem a função de supressão de transientes e são conectados na entrada e saída do regulador de tensão, sendo uma recomendação especificada na folha de dados (data sheet) do componente.

Na figura 16, é notada a existência de um conector P12, de onde é derivado uma alimentação de aproximadamente 12VCC para um cooler, responsável pela exaustão do ar quente de dentro do gabinete.

4.1.7 Microcontrolador

O elemento principal da placa de controle é o microcontrolador, responsável por receber os sinais de tensão e corrente medidos no circuito de potência. Além de realizar a leitura dos botões disponíveis para o usuário, o microcontrolador atualiza, em um display de cristal líquido, os valores das grandezas medidas e os valores ajustados de frequência e largura de pulso.

Um sinal de onda quadrada é gerado através do microcontrolador, sendo possível ajustar a frequência e a largura de pulso. Este sinal é responsável por realizar o chaveamento da bobina de ignição no circuito de potência.

Para realizar estas tarefas foi escolhido o microcontrolador PIC16F877A fabricado pela MICROCHIP (www.microchip.com), considerando como principais requisitos na escolha para o projeto o baixo custo de aquisição, facilidade de acesso, capacidade de memória de programa e de dados, e quantidade de entradas de saídas (I/Os). Na figura 17 é mostrado o microcontrolador com encapsulamento DIP40 utilizado no projeto de hardware.

Figura 17 - Chip PIC16F877A – Encapsulamento DIP40



Fonte: Do autor, 2019.

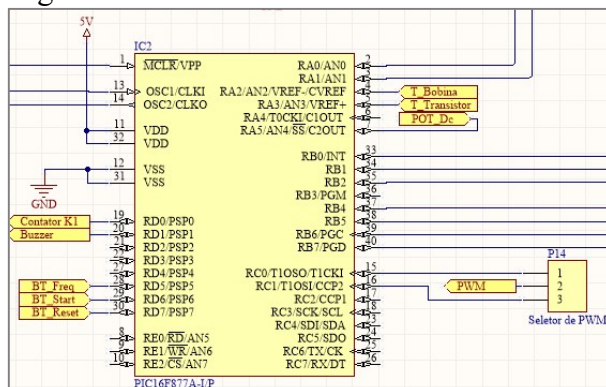
Considerando os inúmeros recursos disponíveis neste microcontrolador, suas características principais são listadas abaixo: (MICROCHIP, 2013)

- Arquitetura da CPU do tipo RISC (Reduced Instruction Set Computer);
- Processador interno com barramento de dados de 8bits;
- Memória de dados do tipo RAM (Random Access Memory) de 368 bytes;
- Memória de dados do tipo EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Ready-Only) de 256 bytes, para armazenar dados de forma permanente;
- 40 pinos de conexão, sendo 33 pinos que podem ser utilizados como portas de I/Os;
- Frequência de operação de até 20MHz utilizando cristal oscilador externo;
- Possui 8 conversores ADC de 10bits de resolução;
- 2 comparadores de tensão internos e 2 módulos CCP (Capture Compare PWM);
- Possui 3 timers, sendo dois deles de 8 bits e um de 16 bits;
- Um canal de comunicação serial tipo I2C (Inter-Integrated Circuit);
- Um canal de comunicação serial tipo SPI (Serial Peripheral Interface);
- Um canal de comunicação serial UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter);

O programa embarcado na interface (firmware) pode ser carregado diretamente na placa de controle através de uma conexão denominada de ICSP, do inglês In Circuit Serial Programming (Programação serial no circuito), uma técnica de programação da memória que consiste em um protocolo síncrono de duas linhas permitindo a gravação do chip dentro do próprio circuito de aplicação, facilitando o processo de gravação e atualização de software (PEREIRA, 2002).

A alimentação do microcontrolador é fornecida pela fonte de alimentação do circuito de controle, sendo uma tensão regulada de 5VCC. A Figura 18 mostra o microcontrolador no circuito de interface e controle, com as devidas conexões.

Figura 18 - Microcontrolador PIC16F877A



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O conector P14 mostrado na Figura 18 possibilita a seleção da saída PWM (CCP1 ou CCP2) do microcontrolador, tendo como objetivo utilizar uma saída principal para disparo da bobina e outra apenas para testes. Esta seleção é feita utilizando um mini jumper localizado na placa eletrônica de controle.

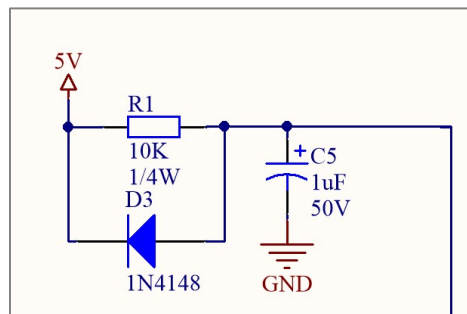
4.1.8 Reset físico do microcontrolador

O recurso responsável por reiniciar o programa de um microcontrolador é o reset. Os microcontroladores PIC possuem várias formas de reset, podendo ser um reset automático ou manual, interno ou externo. Podem ser listadas as formas de reset presentes no PIC16F877A: (PEREIRA, 2002)

- POR - Power on Reset: ocorre quando o chip é energizado;
- MCLR – Master Clear: ocorre quando o pino MCLR estiver com nível lógico zero;
- WDT – Watchdog Timer: ocorre quando houver estouro de contagem do cão de guarda;
- BOR – Brown-out Reset: ocorre quando a tensão de alimentação cai abaixo de um limite;

Dentre as formas de reset da CPU de um microcontrolador, a única forma de reset externo é através do pino Master Clear, disponível na grande maioria dos microcontroladores da Microchip. O circuito mostrado na Figura 19 foi utilizado para realizar o reset externo do microcontrolador.

Figura 19 - Reset físico através do Pino MCLR do PIC



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O resistor R1 e o capacitor C5 são responsáveis pelo tempo em que o microcontrolador irá ficar em modo reset, após a energização do circuito. No instante inicial o capacitor se comporta como um curto circuito, desta forma o potencial zero volt aparecerá no pino MCLR,

mantendo o microcontrolador resetado. Até que o valor da tensão atinja o valor igual ou superior ao valor lido como nível lógico 1, o PIC se manterá resetado.

O diodo D3 ficará polarizado diretamente apenas quando houver uma queda de tensão na alimentação maior que 0,7V, descarregando instantaneamente o capacitor C5 e consequentemente resetando o microcontrolador. Este recurso é uma recomendação da folha de dados (datasheet) do fabricante e garantirá, no caso de queda de tensão maior do que aproximadamente 0,7V, que o microcontrolador irá ser resetado.

4.1.9 Monitoramento de temperatura

O equipamento gerador de plasma possui dois pontos onde os valores de temperatura são monitorados por sensores. Foram escolhidos os dois elementos que mais dissipam energia elétrica em forma de calor (efeito joule): a bobina de ignição e o transistor Mosfet.

A bobina de ignição, além de ser um componente especial por operar produzindo pulsos de alta tensão, é um dos elementos principais do equipamento, sendo o componente elétrico de maior valor de aquisição, de acordo com a tabela de custo do projeto.

O transistor Mosfet, mesmo trabalhando como uma chave eletrônica, dissipa uma grande quantidade de energia em forma de calor. A perda de potência atribuída a chave é o produto da corrente pela tensão em seus terminais. Pode-se considerar a potência total dissipada pelo transistor como a soma da potência dissipada na condução e no chaveamento (AHMED, 2000).

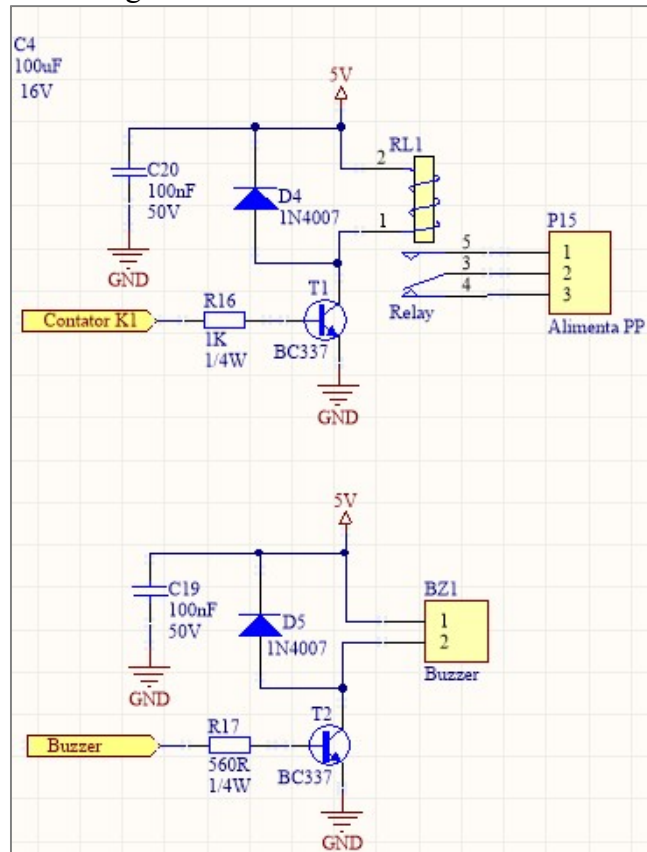
O monitoramento de temperatura dos dois elementos foi realizado utilizando o sensor de temperatura LM35. Um sensor de precisão de baixíssimo custo, integrado em um encapsulamento TO-92 de três terminais. Este componente é extremamente utilizado em diversos projetos de medição de temperatura, devido a seu fácil acesso comercial e sua ampla faixa de medição de temperatura (Figura 20).

O LM35 trabalha em uma faixa de temperatura de -55°C até 150°C, com precisão média de +/- 0,2°C quando submetido à temperatura de 25°C. Possui um baixo consumo de potência, drenando uma corrente de aproximadamente 60µA. O sinal de saída possui uma escala linear com variação de 10 mV/°C, na faixa de -55mV até 1,5V (TEXAS INSTRUMENTS, 2017).

O monitoramento de temperatura de componentes com funções especiais, além de garantir uma condição de funcionamento mais segura, possibilita estabelecer faixas de operação desejáveis, configurando valores para a ativação de alarmes e falhas caso a temperatura atinja valores críticos.

Outra grande vantagem é permitir a isolação entre circuitos elétricos, estabelecendo apenas uma ligação magnética. Foi especificado no projeto um relê eletromecânico capaz de chavear cargas em corrente contínua de até 15A com tensão de até 30VCC.

Figura 21 - Saídas digitais - Acionamento de relê eletromecânico e buzzer



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Os dois transistores BJT ligados as saídas digitais operam em modo de chaveamento. O transistor bipolar operando como uma chave eletrônica exige que o ponto de operação se alterne do corte para a saturação ao longo da reta de carga. Duas condições são existentes durante o chaveamento: (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013)

- Corte: quando a corrente de base é igual a zero ($I_b = 0$), conseqüentemente a corrente de coletor também será zero ($I_c = 0$), o transistor se comporta como uma chave aberta, tendo a tensão da fonte toda entre o coletor-emissor (V_{ce});
- Saturação: quando a corrente de base atinge um valor maior que a corrente de coletor pelo ganho ($I_{c\ sat} / \beta_{cc}$), nesta condição o transistor está completamente em condução,

se comportando como uma chave fechada, tendo aproximadamente a tensão coletor-emissor igual a zero ($V_{ceq} = 0V$) e a corrente de coletor a máxima ($I_c \text{ sat}$).

A função dos transistores T1 e T2 é disparar os elementos de saída, onde T1 aciona a bobina do relê (RL1) e T2 aciona o sinalizador sonoro (BZ1). A corrente de consumo da bobina é de aproximadamente 90mA, e a saída digital do microcontrolador tem capacidade de fornecer no máximo 20mA, desta forma foi utilizado o transistor T1 com ganho de corrente de aproximadamente 4,5 considerado um beta de valor baixo.

Os diodos D4 e D5 são elementos de proteção em paralelo com as bobinas (relê e buzzer), chamados de diodo roda livre, do inglês, freewheeling, sendo responsáveis por criar um caminho para a corrente elétrica armazenada no indutor (bobina) durante o desligamento do transistor. A não utilização do diodo pode danificar o transistor, pois a tensão inversa (V_{cem}) pode chegar a um valor muitas vezes maior do que a tensão da fonte de alimentação (AHMED, 2000).

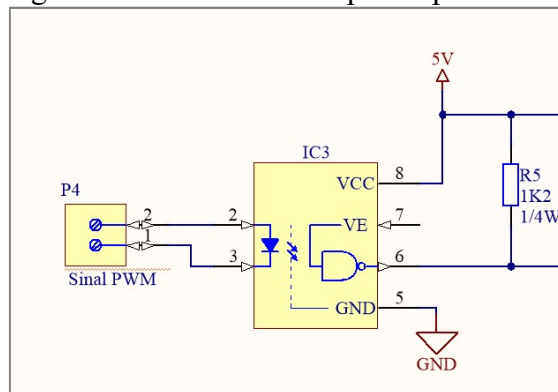
4.1.11 Acoplador óptico do sinal PWM

O sinal de PWM gerado pela placa de controle é aplicado em um circuito de disparo (drive) responsável pelo acionamento da bobina de ignição. Como o sinal PWM é gerado e controlado através do microcontrolador que está localizado na placa de controle, foi necessário utilizar um optoacoplador, presente na placa de potência, com a função de estabelecer uma conexão óptica entre as duas placas, garantindo isolamento elétrica entre os dois circuitos.

Na Figura 22 está representado circuito optoacoplador de entrada. O sinal da placa de controle é aplicado através do conector P4. O resistor R5 utilizado na saída do optoacoplador possui a função de resistor pull-up, devido a saída coletor aberto do CI.

Um fotodiodo é um dispositivo semicondutor que possui sua operação limitada na polarização reversa, produzindo uma corrente reversa quase que linear em relação às ondas eletromagnéticas incidentes. O aumento da intensidade luminosa provoca o aumento da corrente reversa, produzindo um efeito de redução da resistência reversa do diodo, sendo utilizado em diversas aplicações de chaveamento e isolamento elétrica de circuitos eletrônicos (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

Figura 22 - Circuito com optoacoplador 6N137



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

O CI 6N137 é composto por um optoacoplador de um único canal que utiliza um Led de alta eficiência e um fotodiodo trabalhando como um detector óptico integrado. A saída é composta por um transistor NMOS na configuração coletor aberto. A maior vantagem de se utilizar este optoacoplador está na velocidade de operação, podendo operar com velocidades de comunicação de até 10MBd de velocidade (VISHAY, 2016).

4.1.12 Bobina de ignição automotiva

Um dos componentes principais utilizado na construção do equipamento APPJ é a bobina de ignição automotiva, responsável por receber um sinal de pulso da saída PWM e produzir um pulso de alta tensão, que é aplicado no eletrodo de alta tensão (AT), localizado no bico injetor de plasma.

A bobina de ignição escolhida para o projeto foi a KW12V (Figura 23), fabricada pela Bosch, utilizada em veículos onde as exigências do motor são maiores, como rotação, compressão e quantidade de cilindros, produzindo maior tensão e maior quantidade de centelha, comparada a outros modelos de bobinas da Bosch (BOSCH, 2016)

De acordo com Ahmed (2000), uma carga indutiva, quando chaveada, produz uma fcm (força contra-eletromotriz), um efeito que se opõe à interrupção de corrente do circuito, gerando um pulso de tensão reversa no momento do desligamento da chave. Como este nível de tensão reversa alcança uma amplitude muitas vezes maior do que a tensão aplicada na bobina, um pulso de AT no secundário é induzido neste momento, sendo capaz de ionizar o gás e produzir o plasma.

Figura 23 - Bobina de ignição Bosch KW12V



Fonte: Do Autor, 2019.

A bobina de ignição é do tipo asfáltica e possui dois enrolamentos, o primário de baixa tensão, com uma resistência de 1,2 a 1,6 ohms, e o secundário de alta tensão com resistência de 5200 a 8800 ohms. Estes valores de resistência podem ser medidos utilizando um ohmímetro com temperaturas entre 20 e 30°C (BOSCH, 2016).

4.1.13 Drive de chaveamento da bobina

O circuito responsável por chavear a bobina de ignição é mostrado na Figura 24, sendo composto por elementos de chaveamento e proteção. Os transistores bipolares T1 e T2 realizam o chaveamento do transistor Mosfet (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) nomeado como T3. Este componente é o elemento principal do circuito de disparo, sendo o elemento semiconductor de potência, chaveando o sinal da fonte chaveada (18 a 25VDC) através de modulação de largura de pulso (PWM).

Segundo Rashid (1999), o transistor Mosfet é um dispositivo controlado por tensão, com alta impedância de entrada, velocidade de chaveamento muito alta, baixas perdas de potência durante o chaveamento e com tempos de chaveamento na ordem de nanosegundos. Este componente é adequado para operar em altas frequências e disparar cargas de potência com pequenos sinais aplicados no terminal de controle chamado de gatilho.

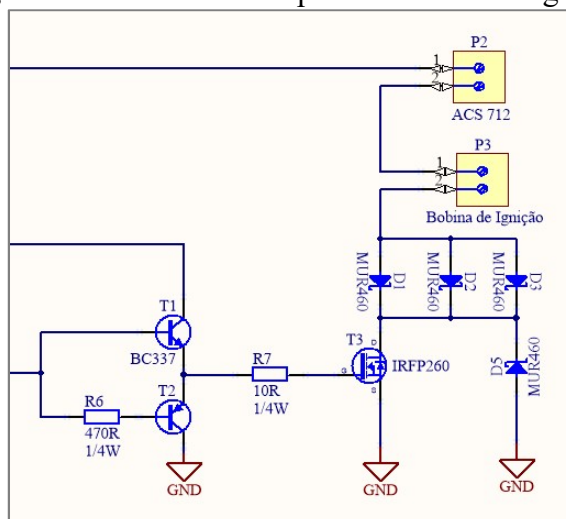
Quando a saída do optoacoplador (Figura 22) aplica um sinal de nível lógico alto (5VCC) na entrada do circuito de disparo, o transistor T1 irá saturar e T2 estará em corte, desta forma será aplicado um potencial positivo no gate (porta de disparo) do Mosfet, fazendo o

componente entrar em condução, conseqüentemente fechando o circuito para energizar a bobina ignição.

Se o sinal na entrada está em nível lógico baixo (0V), o transistor T2 estará saturado e T1 em corte, tendo como potencial no terminal gate (porta) do Mosfet zero volts, como resultado deixando o Mosfet como uma chave aberta, desenergizando a bobina.

Os diodos utilizados no circuito, especificados como MUR460, são retificadores ultrarrápidos desenvolvidos para o uso em sistemas de chaveamento como: fontes de alimentação, inversores e diodos roda livre. Este componente possui um tempo de recuperação reversa de aproximadamente 75ns, podendo ser utilizado em circuitos que operam na faixa de Mhz de frequência (ON SEMICONDUCTOR, 2013).

Figura 24 - Circuito de disparo da bobina de ignição



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Quando houver inversão na polarização da fonte, o transistor Mosfet não consegue bloquear a tensão, não tendo capacidade para o bloqueio de tensões inversas. Para garantir que o semicondutor suporte alto nível de tensão reversa, existe um diodo intrínseco antiparalelo ligado à sua estrutura. Este diodo é denominado diodo de corpo, sendo muito importante em aplicações de chaveamento (AHMED, 2000).

O diodo D5, possui sua função redundante ao diodo de corpo, estando conectado em paralelo com os terminais dreno-fonte do Mosfet, sendo responsável por proteger a chave semicondutora de altos níveis de tensão reversa durante o estado de não condução.

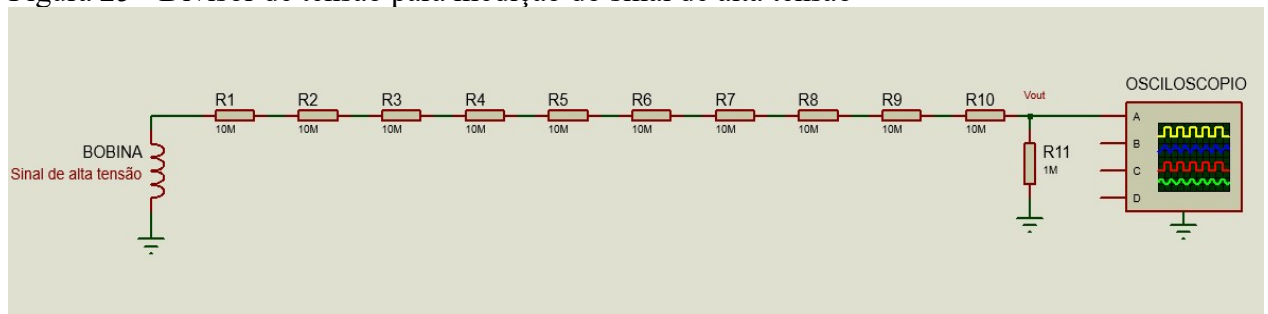
Os diodos D1, D2 e D3, foram associados em paralelo, considerando que em algumas condições a corrente da bobina de ignição pode alcançar valores de aproximadamente 10A, tendo como especificação de corrente média DC um valor máximo de 4A para cada diodo.

4.1.14 Medição do sinal excitação do eletrodo do bico injetor de plasma

Para realizar a medição das formas de onda dos sinais de frequência gerados pela saída PWM do microcontrolador, bem como o sinal de alta tensão utilizado para ionização do gás, foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo TBS1052B, com largura de banda de 50MHz e uma taxa de amostragem de 1G/s.

Devido ao alto custo de aquisição de uma sonda de alta tensão com atenuação 1000:1 para realizar a medição do sinal de alta tensão, foi construído um circuito divisor de tensão utilizando resistores de 10M ohms e um resistor de 1M ohm, conforme mostrado no diagrama apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Divisor de tensão para medição do sinal de alta tensão



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Foi construído um circuito composto por 10 resistores de 10M ohms e um resistor de 1M ohms, desta forma totalizando 101M ohms de resistência. Os valores altos de resistência garantem uma corrente muito baixa drenada do secundário da bobina de ignição.

De acordo com a equação 4.6 mostrada a seguir, conhecida como equação do divisor de tensão, através da divisão da tensão de entrada pela rede de resistores conseguimos coletar uma amostra do sinal com mesma frequência e forma de onda através do resistor R11 de 1M ohms.

$$V_{out} (VR11) = \frac{V_{bob} \times \left(\frac{R11 \times Z_{in}(osc)}{R11 + Z_{in}(osc)} \right)}{R_{eq}} \quad (4.6)$$

onde:

- V_{out} = tensão coletada pela ponta de prova do osciloscópio
- V_{bob} = tensão gerada pelo secundário da bobina de ignição
- $Z_{in}(osc)$ = impedância de entrada da ponta de prova do osciloscópio
- $R11$ = resistor de 1M ohms do divisor de tensão

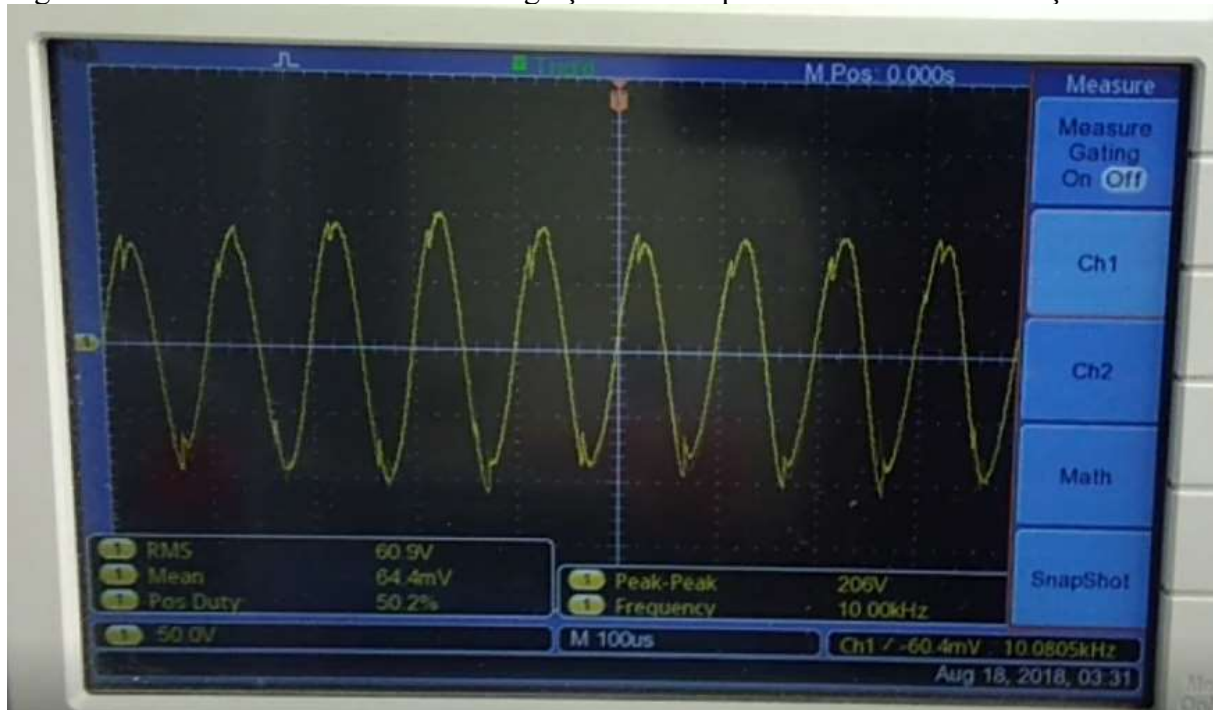
- R_{eq} = resistência equivalente série do circuito $[R1+...+R10 + (R11 // Z_{in})]$

Na equação 4.6 é considerada a influência da impedância de entrada do osciloscópio, definida pela ponta de prova do osciloscópio. Considerando que o osciloscópio utilizado para medição possui uma tensão máxima de entrada de 300V RMS, se a bobina de ignição gerar um sinal de 30KV RMS (valor de amplitude alta) o resultado será um sinal de aproximadamente 270V RMS na saída do divisor.

Cada resistor utilizado no circuito foi especificado com potência de 1W. A montagem dos resistores foi feita em placa de fibra de vidro, instalada em um caixa de alumínio. Um cabo de cobre, com isolações de polietileno (interna) e PVC (externa), foi utilizado para derivação do sinal de alta tensão da bobina até a placa. As imagens desta montagem podem ser visualizadas no apêndice H, apresentado ao final deste trabalho.

O sinal medido pelo osciloscópio possibilitou extrair uma relação aproximada de transformação entre os enrolamentos primário e secundário. Na Figura 26 é mostrado o sinal de tensão coletado pelo circuito divisor de tensão.

Figura 26 - Sinal de saída da bobina de ignição medido por um circuito de atenuação



Fonte: Do Autor, 2019.

A forma de onda medida no osciloscópio foi gerada sujeita às seguintes condições:

- tensão de amplitude do sinal de onda quadrada chaveado no primário da bobina de aproximadamente 26VCC.
- Frequência do sinal PWM de onda quadrada de aproximadamente 10KHz
- Corrente média do primário da bobina de ignição de aproximadamente 3,6A (corrente consumida no plasma e drenada pela divisor de tensão)

O sinal de saída da bobina de ignição é senoidal devido à sua alta indutância e às características de amortecimento do indutor. Na imagem do osciloscópio a senoide possui uma frequência de 10KHz, sendo a mesma do sinal PWM gerado pelo microcontrolador.

A tensão de pico-a-pico atinge valores próximos de 200V e a tensão RMS medida é de aproximadamente 61V. Se for considerada a redução de aproximadamente 111 vezes do circuito de medição e uma tensão de 26V de amplitude aplicada ao primário da bobina, é possível descrever a relação aproximada entre a tensão de pico medida pelo osciloscópio e a tensão de pico senoidal aplicada ao eletrodo (tensão no secundário da bobina) através da equação 4.7, descrita como:

$$V_p (\text{eletrodo}) = V_{osc} (\text{pico}) \times \text{Divisor } V \quad (4.7)$$

$$V_p (\text{eletrodo}) = V_{osc} (\text{pico}) \times 111$$

onde:

- $V_p (\text{eletrodo})$ - tensão de pico do sinal senoidal aplicado ao eletrodo (secundário da bobina)
- $V_{osc} (\text{pico})$ - tensão senoidal de pico medida pelo osciloscópio
- $\text{Divisor } V$ - redução realizada pelo divisor de tensão

Assim, como um exemplo de medida, se uma tensão de 100V de pico é medida no divisor de tensão no osciloscópio, um potencial de aproximadamente 11,1KV de pico estará presente no secundário da bobina alimentando o eletrodo do jato de plasma.

Na forma de onda, medida e visualizada no osciloscópio, nota-se a presença de ruídos dos picos positivos e negativos da senoide, distorcendo levemente o sinal senoidal, porém não limitando as medições das grandezas de interesse. Esses ruídos foram gerados pela interferência eletromagnética produzida pela bobina após ignição do plasma.

Na tela principal do display do gerador de plasma é apresentado o valor aproximado da tensão de pico do sinal senoidal, utilizado para ionizar o gás no bico injetor de plasma. Este valor não é um valor medido, mas um valor calculado considerando a equação 4.7.

O valor da tensão de excitação do plasma torna-se mais um parâmetro para o usuário monitorar e utilizar como referência para ensaios e testes durante a utilização da máquina nos tratamentos de biomateriais.

4.1.15 Placa de circuito impresso

Durante o desenvolvimento e fabricação dos protótipos eletrônicos construídos para o projeto, foram utilizadas ferramentas de software para simulação de circuitos e desenvolvimento de esquemas eletrônicos e layouts de placas de circuito impresso (PCI).

Os projetos eletrônicos finais das placas de controle e potência foram desenvolvidos em um software profissional de projetos de hardware, oferecendo inúmeros recursos para projetos de sistemas embarcados e placas de circuitos impresso, sendo adotada por inúmeros engenheiros e empresas em aplicações de uso profissional.

Na Figura 27, mostrada a seguir, é possível visualizar a imagem 3D da placa de potência. Os encapsulamentos dos componentes mostrados na placa são muito próximos aos que foram utilizados na placa real.

Figura 27 - Layout 3D da PCI – Placa de potência – Versão final



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Todas as placas eletrônicas do projeto foram desenvolvidas e testadas no LFFPP da UFTM, com auxílio de ferramentas de bancada e instrumentos de medida. Podemos listar um resumo das etapas de elaboração e construção das PCIs:

- Desenvolvimento do layout da PCI através de software;
- Confeção da placa de circuito impresso utilizando processo com tinta fotossensível;
- Furação e acabamentos das placas confeccionadas;
- Aplicação de máscara de solda (parte inferior) e legenda de componentes (parte superior);
- Secagem final em estufa para a cura das tintas (máscara e legenda);
- Montagem de componentes eletrônicos e soldagem com solda estanho-chumbo;
- Limpeza da placa, inspeção de trilhas e componentes e aplicação de verniz;
- Energização em bancada, gravação de firmware e testes de funcionamento.

A Figura 28 mostra o hardware do microcontrolador, também discriminado como placa de controle do equipamento. Uma placa de fibra de vidro de face simples foi utilizada, com quase todos seus componentes do tipo PTH (pinos através de furos), exceto o amplificador operacional MCP609, inserido na superfície da parte inferior da PCI.

Figura 28 - Placa de controle – Versão Final



Fonte: do Autor, 2019.

As imagens de todas as placas eletrônicas, layouts, esquemas dos circuitos e componentes do projeto podem ser encontrados nos apêndices deste trabalho.

4.2 PROJETO MECÂNICO

O projeto mecânico foi desenvolvido considerando critérios de segurança, operabilidade e qualidade do equipamento. A seguir são apresentados alguns critérios que foram adotados na elaboração do projeto mecânico:

- Segurança para evitar choques elétricos, através de isolamento de todas as partes energizadas que oferecem riscos ao usuário, principalmente o sinal de excitação de alta tensão aplicado ao eletrodo do jato de plasma;
- Aterramento de toda a estrutura do gabinete e acessórios como: porta amostra, suportes e regulador de fluxo de gás;
- Utilização de um suporte fabricado em alumínio para fixação da caneta de plasma e do porta amostras, utilizando sistema de fusos para movimentar a base em alumínio onde são colocadas as amostras, oferecendo ajustes nos eixos x, y e z;
- Dimensionamento do gabinete considerando o volume adequado para acomodar todos os componentes internos do equipamento;
- Pintura de todas as partes metálicas construídas de aço carbono, eliminando a possibilidade de corrosão e melhorando a estética do equipamento e valorizando o produto.

4.2.1 Gabinete

O gabinete foi projetado e fabricado em chapa dobrada de aço AISI 1020 de 1,5mm de espessura, garantindo uma robustez mecânica para suportar toda a massa dos componentes internos de aproximadamente 10kg.

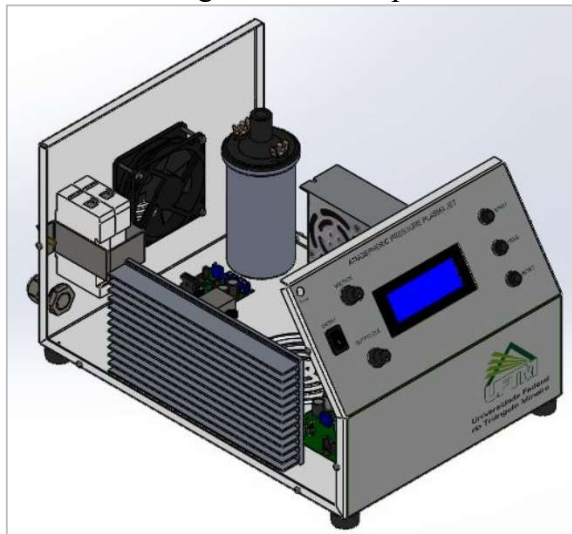
Três partes principais compõem o projeto do gabinete: a base para montagem dos componentes, uma tampa de cobertura onde é fixada uma alça de transporte, e um suporte em perfil L para fixação do regulador de fluxo.

A fabricação do gabinete foi realizada sobre medida, considerando um desenho em 3D de onde foram gerados os planos de corte e dobra de chapa metálica. Todas as partes mecânicas do gabinete foram obtidas através do processo de corte a laser, oferecendo alta qualidade dos cortes, furos, encaixes e janelas de ventilação.

Na Figura 29 é exibido o desenho 3D do gabinete, sendo apresentado sem a tampa, contendo apenas sua base com os componentes principais instalados. Todas as dimensões do desenho do gabinete foram reproduzidas com boa precisão durante o processo de fabricação.

Na tampa do gabinete foram fixadas uma alça central para transporte de todo módulo eletrônico e o suporte do regulador de fluxo, permitindo facilidade ao usuário para ajustar a vazão de gás durante a operação do equipamento.

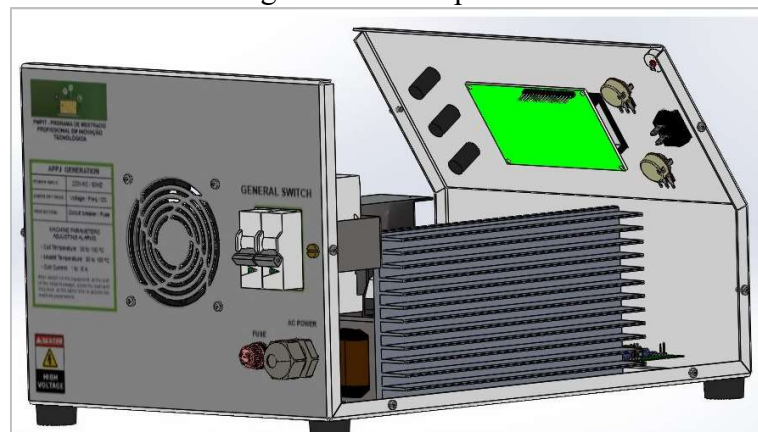
Figura 29 - Desenho 3D do gabinete e componentes – Vista isométrica



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Como pode se observar na Figura 29, os principais componentes eletroeletrônicos instalados no gabinete foram representados com dimensões muito próximas das dimensões reais. Alguns destes componentes foram desenhados como peças separadas e outros foram encontrados prontos nos sites de seus respectivos fabricantes. Na Figura 30 é possível visualizar novamente o gabinete com seus componentes principais instalados, agora visto de outro ângulo.

Figura 30 - Desenho 3D do gabinete e componentes – Vista traseira lateral



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

4.2.2 Regulador e indicador de vazão

O fluxo de gás, que pode ser de gases nobres tais como hélio ou argônio, pode ser controlado utilizando um regulador de vazão. Foi utilizado um regulador de precisão, fixado na lateral do equipamento, oferecendo facilidade e segurança na conexão de alimentação de gás.

Para a interligação do cilindro de gás ao regulador e do regulador ao reator de plasma, foram utilizadas mangueiras pneumáticas de poliuretano com diâmetro de 6mm, oferecendo boa flexibilidade, resistência mecânica e resistência a abrasão. Conexões de engate rápido também foram utilizadas na entrada do regulador e na alimentação do bico injetor de plasma, facilitando o manuseio em situações de ajuste e manutenção.

Na figura 31, é apresentado o regulador de fluxo utilizado no projeto. Instalado na lateral do equipamento, através de um suporte, o regular possibilita ao usuário de uma forma fácil variar a vazão do gás aplicado ao reator.

Figura 31 - Conjunto regulador de fluxo e indicador de vazão



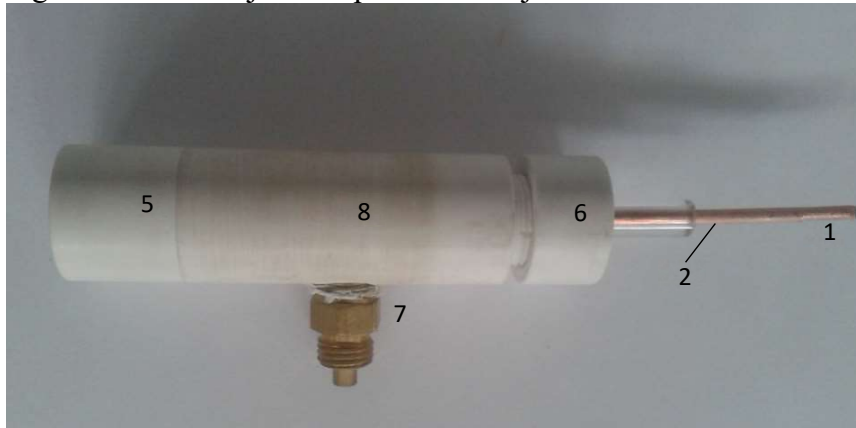
Fonte: do Autor, 2019.

4.2.3 Bico injetor de plasma

O bico injetor de plasma ou reator de plasma foi construído de material totalmente isolante e doado pelo prof. Dr. Munemaza Machida do Instituto de Física Gleb Wataghin da Unicamp. O material utilizado para fabricação da parte isolante do bico foi o PVC (policloreto de vinila). O corpo principal do reator é do tipo coaxial, composto por um tubo (8) e duas tampas rosqueadas (5,6), sendo uma superior e outra inferior, ambas de PVC.

Na Figura 32 é mostrado o reator fabricado para os testes e ensaios realizados no LFFPP da UFTM, com todas as partes montadas.

Figura 32 - Bico injetor de plasma – conjunto montado

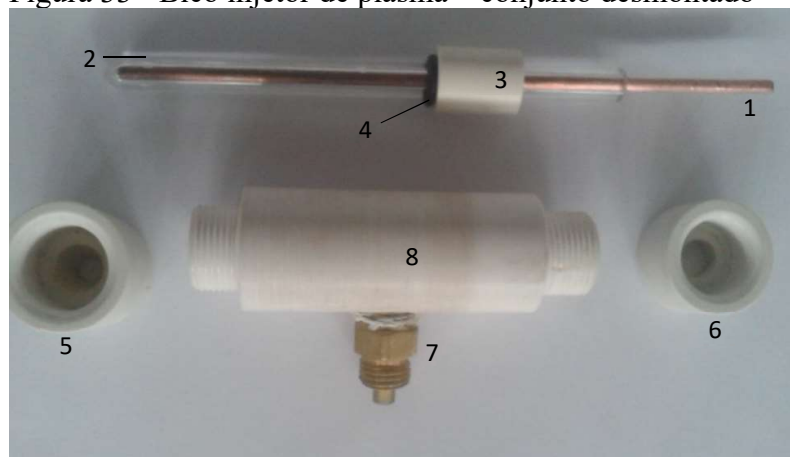


Fonte: do Autor, 2019.

Para a função de eletrodo (1) de AT foi utilizado um condutor rígido de cobre sem isolamento, com área de secção transversal de 6mm^2 . Uma conexão de latão (7) foi instalada no centro do tubo de PVC, utilizada para ligação da mangueira pneumática de 6mm utilizada para alimentação do gás.

De acordo com a Figura 33, onde se visualizam as peças separadas da caneta de plasma, o eletrodo (1) pode ser visto inserido dentro do tubo de vidro (2). Neste mesmo conjunto pode-se observar a existência de uma bucha de PVC (3) revestindo a parede externa do tubo de vidro, e um anel oring (4) utilizado para a vedação do gás.

Figura 33 - Bico injetor de plasma – conjunto desmontado



Fonte: do Autor, 2019.

Através do ajuste de posição do anel e bucha de PVC é possível definir a distância da ponta do tubo de vidro e o orifício de saída do jato de plasma, existente na tampa inferior (5) do reator, desta forma possibilitando uma variação no formato do jato que é produzido.

O eletrodo de metal é conectado diretamente na saída da bobina de ignição, porém não há contato elétrico entre o eletrodo com potencial de alta tensão e o jato de plasma, isto devido a barreira dielétrica criado pelo tubo de vidro.

Durante a fase de construção dos protótipos e ensaios de laboratório, foi utilizado o bico injetor mostrado na Figura 32, porém foi verificada a necessidade de algumas modificações que possibilitariam maior segurança e melhor instalação.

De acordo com a Figura 34, foram feitas algumas mudanças no bico injetor utilizado no equipamento final. A tampa superior de dimensões reduzidas (6), mostrada na Figura 33, foi substituída por uma tampa com 4 vezes seu comprimento original, de modo a embutir a parte exposta do eletrodo, eliminando a possibilidade de contato do usuário com partes energizadas e ainda possibilitando abrigar a conexão de solda entre o cabo de alta tensão e o eletrodo.

Figura 34 - Bico injetor de plasma modificado – Versão final



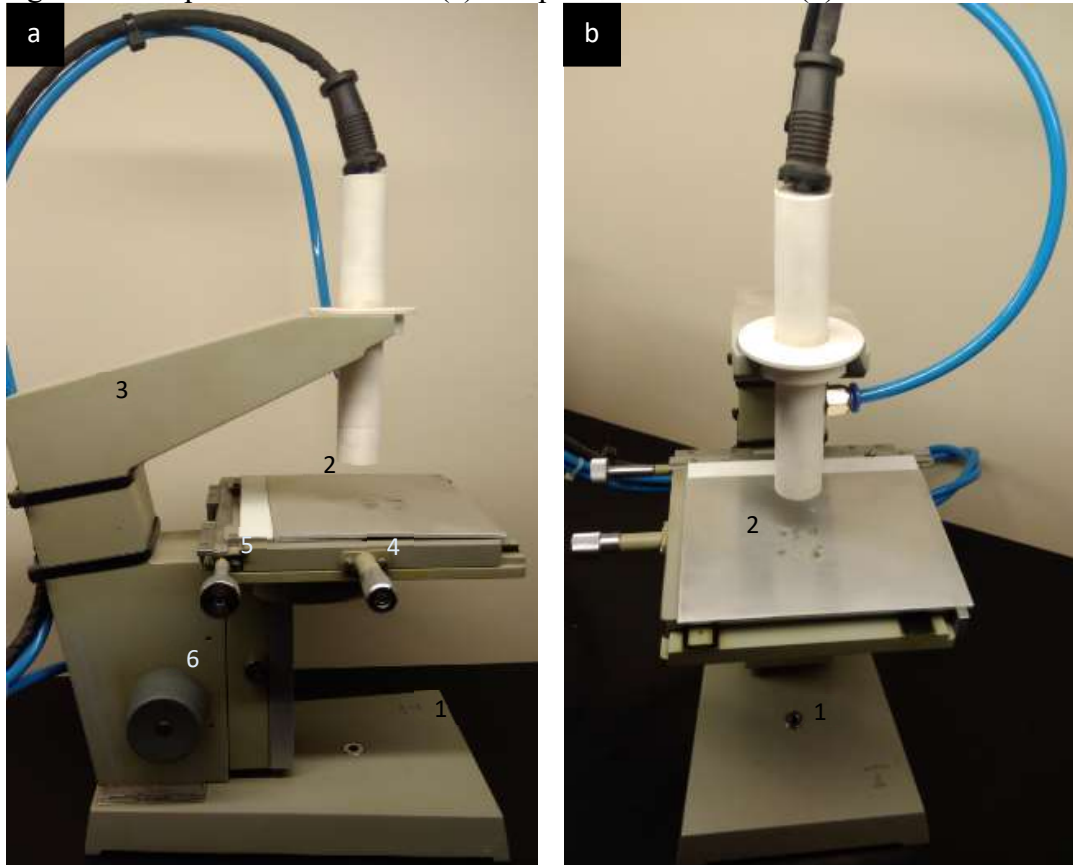
Fonte: do Autor, 2019.

Outra modificação foi a substituição da conexão de latão por uma conexão de engate rápido para conectar os gases ao jato. Esta mudança facilita a remoção ou instalação do tubo pneumático, facilitando procedimentos de desmontagem do reator. Na Figura 34, ainda é verificada a existência de uma bucha fabricada de PVC, com objetivo de realizar a fixação do conjunto ao suporte em forma de braço.

4.2.4 Suporte de Fixação e porta amostras

Um suporte de alumínio foi utilizado para fixação do bico injetor de plasma e do porta amostras. Na Figura 35 (a) está a vista lateral e (b) a vista frontal do suporte. O conjunto é constituído de uma base inferior (1) dando sustentação ao conjunto, uma base superior (2) onde foi instalada a placa de alumínio do porta amostras e um braço para fixação de objetos (3), localizado acima da base superior.

Figura 35 - Suporte – vista lateral (a) e Suporte – vista frontal (b)



Fonte: do Autor, 2019.

Com objetivo de reduzir o custo do projeto foi utilizado o suporte de um microscópio fora de utilização, eliminando a necessidade de fabricação do conjunto e oferecendo algumas vantagens como: uma ótima fixação do reator de plasma, facilidade para movimentação por ser leve, resistência a corrosão devido à pintura eletrostática de alta qualidade e ainda possibilidade de ajuste preciso de posição do porta amostras (estágio X versus Y).

Uma placa de alumínio foi instalada sobre a base superior (2), possibilitando a manipulação de amostras em uma área de aproximadamente 10cm². Através de roldanas de ajustes é possível ajustar a posição da base superior, consequentemente variando a posição da amostra sobre a placa de alumínio através do eixo x (4), eixo y (5) e eixo z (6).

4.3 PROGRAMA DO MICROCONTROLADOR

O programa (firmware) do microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C, utilizando uma IDE (Integrated Development Environment) que trabalha com microcontroladores da família PIC 12/16/18. Na Figura 36, mostrada na sequência, é apresentado o fluxograma básico de operação do microcontrolador.

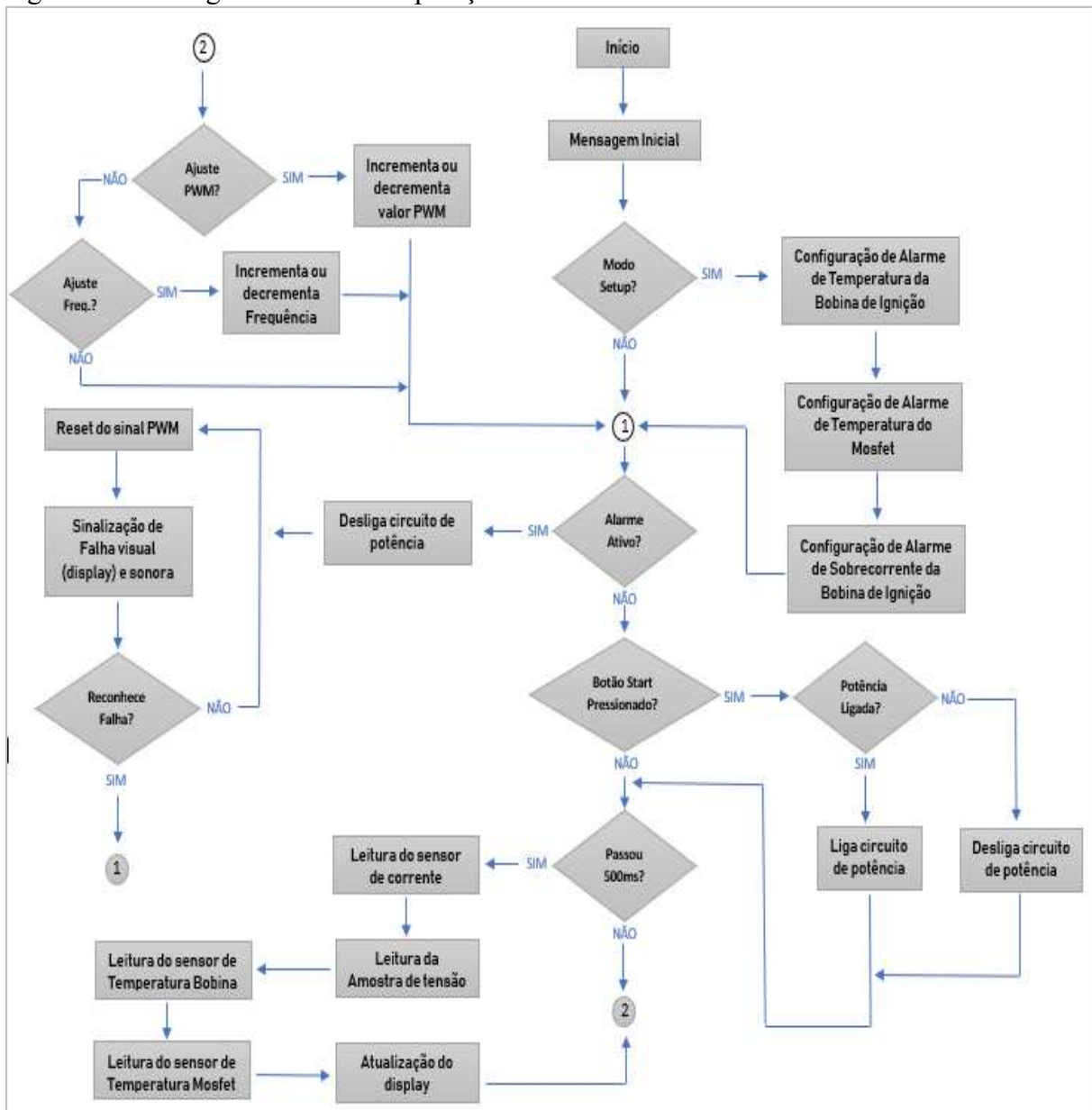
A função principal do programa consiste em produzir um sinal de saída PWM de acordo com ajustes de frequência e largura de pulso, realizados pelo usuário. A leitura do sensor de corrente dos sensores de temperatura e do valor da tensão da placa de potência são realizadas a cada 500 milissegundos.

O tempo de intervalo de leitura é definido através da interrupção do temporizador Timer0 (TMR0). Outras temporizações também são realizadas no TMR0 como o intervalo de atualização do display e atualização da saída PWM.

Após energizar o equipamento e ligar a chave on-off localizada no frontal da máquina, uma mensagem inicial é apresentada, neste momento, ao pressionar os botões 'Start', 'Freq' e 'Reset' ao mesmo tempo, um setup de parâmetros é habilitado possibilitando ao usuário configurar os valores dos alarmes de temperatura da bobina de ignição, da temperatura da chave semicondutora de potência e o valor limite de alimentação da corrente da bobina de ignição.

Os valores configurados no setup são gravados em uma área de memória EEPROM do microcontrolador, de modo que ao desligar o circuito, retirando a alimentação, os parâmetros ajustados irão se manter armazenados devido a este tipo de memória de dados não ser volátil.

Figura 36 - Fluxograma básico de operação do microcontrolador



Fonte: do Autor, 2019.

Em condições de operação normais, a frequência de trabalho poderá ser ajustada através do botão 'Freq' localizada no frontal do equipamento. O ciclo de trabalho é ajustado através de um potenciômetro de 10 voltas, com precisão menor que 1%. Este ajuste não poderá ser resetado automaticamente e será sempre definido pela posição do potenciômetro, ficando sobre responsabilidade do usuário ajustá-lo sempre antes colocar a máquina em operação.

Como já mencionado em tópicos anteriores, também é possível ajustar o nível de tensão (amplitude) que será aplicada na bobina de ignição através de um potenciômetro, sendo mais um parâmetro de ajuste para definir o ponto de operação do gerador de plasma.

Se algum dos alarmes estiverem ativos, o relê eletromecânico que alimenta o circuito de potência é desligado e a saída PWM desligada, disparando uma sinalização de falha visual e sonora, garantindo que o equipamento esteja inoperante até o problema ser normalizado e o alarme reconhecido pelo usuário.

O botão ‘Start’ é responsável por colocar a máquina em operação, alimentando o circuito de potência e consequentemente chaveando a bobina de ignição. Como é mostrado no Fluxograma, o botão ‘Start’ irá ligar e desligar a operação do equipamento a cada pulso realizado pelo usuário.

O botão ‘Reset’ é responsável por resetar uma falha gerada anteriormente que não está ativa. Caso a falha esteja ativa, o botão não irá eliminar o alarme visual e sonoro enquanto a condição de normalidade não se reestabelecer, nos casos de alarme de temperatura, o equipamento deverá se manter desligado por um tempo.

O temporizador Timer1 foi utilizado para realizar o cálculo da média do valor da corrente da bobina de ignição. Para este cálculo são realizadas 40 amostragens de leituras, cada uma realizada em intervalos de 10 milissegundo, atualizando o valor da média a cada 400 milissegundos.

Quando uma carga indutiva é chaveada, a corrente na carga tende a não variar seu valor, isto devido ao indutor que se opõem a variações de corrente. Quanto maior a indutância da carga, maior será a quantidade de energia armazenada no campo magnético da bobina, e consequentemente mais contínua (menor ripple) será a corrente do circuito (RASHID, 1999).

Mesmo sendo uma carga indutiva, a corrente na bobina de ignição não é contínua, possuindo componentes AC, devido ao chaveamento de um sinal de onda quadrada assimétrico, com isso, sendo necessário realizar um cálculo de média através de amostragens de leituras.

A frequência e a largura de pulso são obtidas através da utilização do temporizador Timer2, um timer de 8 bits utilizado para gerar o PWM por hardware nos PICs da família 16, onde são configurados parâmetros como prescaler, preset e postscaler.

O firmware do microcontrolador foi todo desenvolvido em linguagem estruturada, organizado por inúmeras funções de modo a otimizar o programa e utilizando uma biblioteca do compilador para operações de escrita e leitura no display alfanumérico.

4.4 TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

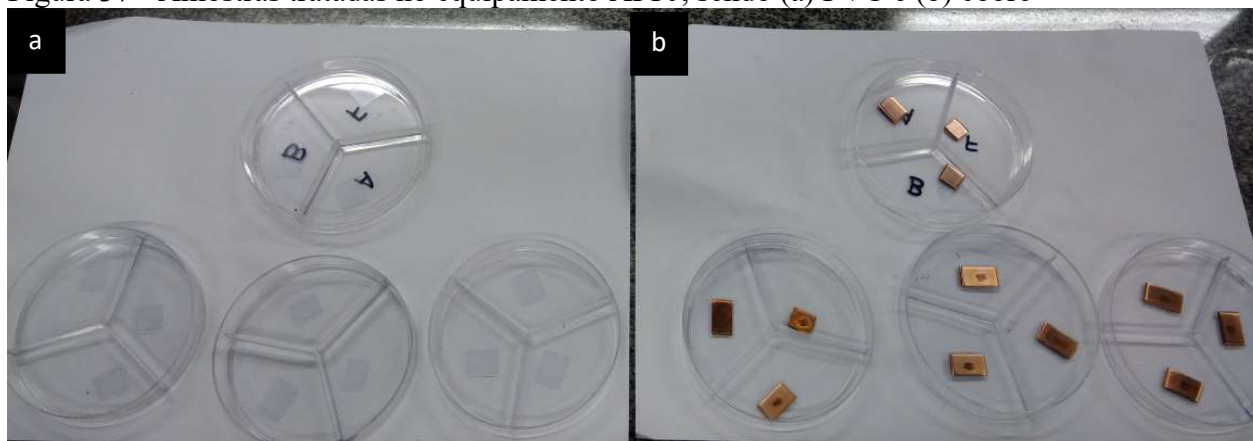
Após as diversas etapas de prototipagem, testes, ajustes e fabricação do equipamento em sua versão final, o gerador de plasma foi utilizado no tratamento de alguns materiais, com

objetivo de produzir modificações superficiais que pudessem ser avaliadas e caracterizadas mostrando assim a viabilidade de uso do equipamento desenvolvido na área de ciência dos materiais.

Foram escolhidos dois tipos de materiais para serem tratados, o PVC (Policloreto de vinila), e o cobre. As amostras de PVC utilizadas possuem dimensões quadrada de aproximadamente 15x15 mm, transparentes e com espessura de 0,3mm. Para as amostras de cobre foi utilizado uma barra chata de 10mm de largura e 2mm de espessura, sendo cortada em pequenos pedaços de aproximadamente 20mm de comprimento.

Os materiais foram submetidos ao plasma atmosférico frio, produzido pelo equipamento desenvolvido neste trabalho, com objetivo de investigar possíveis modificações superficiais. Na Figura 37 podemos visualizar as amostras tratadas de PVC e cobre.

Figura 37 - Amostras tratadas no equipamento APPJ, sendo (a) PVC e (b) cobre



Fonte: do Autor, 2019.

Para o tratamento das amostras foi utilizado o gás argônio com uma vazão de 2 l/min. Na Tabela 2 são apresentados os principais parâmetros do tratamento aplicado as amostras.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no tratamento das amostras de PVC e cobre

Parâmetros / Amostras	PVC	Cobre
Tempo de tratamento	3, 10 e 18 minutos	10 e 18 minutos
Vazão de gás	2 litros/minuto	2 litros/minuto
Distância Injetor-Amostra	10 milímetros	15 milímetros
Frequência e Duty Cycle	10KHz e 75%	10KHz e 75%
Amplitude do sinal	18KV	18KV

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

4.4.1 Microscopia de força atômica

Para analisar as superfícies das amostras e suas topografias foram efetuadas medidas de microscopia de força atômica diretamente nas amostras puras e tratadas, tanto de cobre como em PVC. Foi utilizado para esta medida o microscópio de força atômica Shimadzu SPM9700, instalado no Laboratório de Filmes Finos e Processo de Plasma do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

As medidas foram feitas utilizando o microscópio com a ponteira para o modo dinâmico e as imagens foram tratadas através do software Gwyddion que permitiu o tratamento das imagens geradas pelo AFM e a realização de cálculos estatísticos para a caracterizar as rugosidades das amostras.

4.4.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier (FTIR)

Para análise da estrutura química das amostras de PVC tratada e não tratada, foi utilizado a espectroscopia infravermelha, verificando as alterações produzidas pelo plasma atmosférico na amostra de PVC. Para esta análise utilizou-se uma amostra PVC submetida à um jato de plasma atmosférico frio por 10 minutos, utilizando o gás argônio com uma vazão de 2 l/min.

Para desenvolver esta análise foi utilizado o espectrômetro de infravermelho da Agilent Technologies modelo Cary 600, contendo quatro acessórios para análise de sólidos, líquidos e gases. O equipamento está instalado no Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

Para o monitoramento de varredura e análise gráfica foi utilizado o software Resolution Pro, disponibilizado pelo fabricante do equipamento. A análise foi realizada em ambiente com temperatura controlada em 23°C e umidade relativa menor que 50%. O modo de medida utilizado foi o ATR (Attenuated Total Reflectance), empregando um acessório adicional do espectrômetro, o dispositivo de reflectância total atenuada.

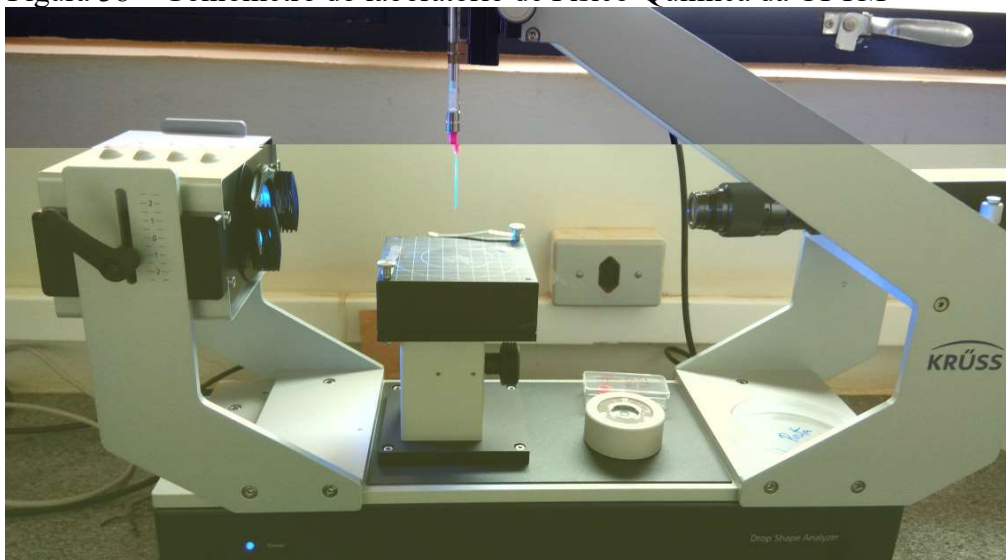
4.4.3 Medição do ângulo de contato

Os materiais tratados, cobre e PVC, foram submetidos a medidas de ângulo de contato. Foi utilizado para esta medida o goniômetro Krüzz modelo DSA25 (Figura 38), instalado no

Laboratório de Físico-química do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

Com o objetivo de determinar os componentes e parâmetros da energia livre de superfície, o ângulo de contato de pelo menos três líquidos com tensões de interação conhecidas deve ser mensurado. Desta forma, foram realizadas medidas de ângulo entre a superfície da amostra usando água deionizada, formamida e α -bromonafitaleno, utilizando-se o modo da gota sésil. O ângulo de contato entre uma gota de 2 μ l (microlitros) e a superfície de uma amostra foi medida a cada segundo por um período de 50s para todos os líquidos e amostras disponíveis. Todas as medidas foram realizadas a uma temperatura de 25°C e executadas em triplicatas, segundo metodologia adaptada de Fialho Júnior et al. (2017) e Araújo et al. (2015).

Figura 38 – Goniômetro do laboratório de Físico-Química da UFTM



Fonte: do Autor, 2019.

A energia livre de interação hidrofóbica entre as moléculas da superfície imersa em água foi calculada pelo somatório das componentes apolar e polar da energia livre de interação, de acordo com a equação 4.8 mostrada a seguir (VAN OSS, 1994).

$$\Delta G_{sas}^{TOT} = \Delta G_{sas}^{LW} + \Delta G_{sas}^{AB} \quad (4.8)$$

onde:

- ΔG_{sas}^{TOT} = energia livre de interação hidrofóbica
- ΔG_{sas}^{LW} = energia de interação de Lifshitz-van der Waals
- ΔG_{sas}^{AB} = energia de interação ácida e base de Lewis.

O valor da energia livre de interação hidrofóbica permite a avaliação termodinâmica do processo de adesão entre o líquido e a superfície, sendo termodinamicamente favorável quando $\Delta G_{sas}^{TOT} < 0$ e desfavorável quando $\Delta G_{sas}^{TOT} > 0$ (FIALHO JUNIOR, 2017). Considerando este parâmetro de análise classifica-se a adesão dos líquidos na superfície das amostras tratadas e não tratadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção serão apresentados os resultados associados ao funcionamento e à operação do equipamento gerador APPJ no tratamento de superfícies de alguns materiais, na sua versão final, mostrando os objetivos alcançados no projeto e as limitações encontradas.

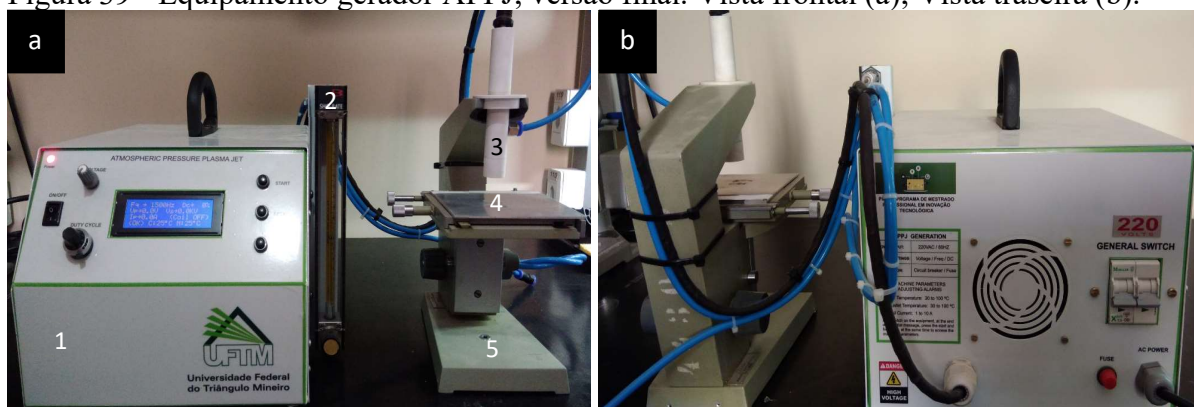
Também serão apresentados os resultados obtidos na caracterização das amostras de PVC e cobre, através das técnicas de microscopia de força atômica, espectrometria infravermelha por Transformada de Fourier e a medição de ângulo de contato. As amostras foram tratadas com plasma atmosférico utilizando o equipamento gerador de plasma desenvolvido segundo a descrição já apresentada.

5.1 EQUIPAMENTO GERADOR DE JATO DE PLASMA FRIO ATMOSFÉRICO

Após o desenvolvimento de 4 protótipos eletrônicos foi construída a versão final do equipamento, sendo composta por um módulo eletroeletrônico de controle e potência (1), um regulador de fluxo (2), bico injetor (3), porta amostras (4) e uma base-suporte de alumínio (5) para fixação do bico e acomodação do porta amostras.

Na Figura 39 são apresentadas as vistas frontal e traseira do equipamento com seus componentes. Mais imagens do equipamento final podem ser observadas no Apêndice M, apresentado no final deste trabalho.

Figura 39 - Equipamento gerador APPJ, versão final. Vista frontal (a); Vista traseira (b).



Fonte: do Autor, 2019.

5.1.1 Operação do equipamento

O equipamento ofereceu condições amigáveis de operação ao usuário, apresentando em um display LCD os parâmetros de operação e monitoramento. Os ajustes de parâmetros estão disponíveis através de botões e potenciômetros localizados no frontal do equipamento.

As medições de corrente da bobina e tensão aplicada ao circuito de chaveamento funcionaram corretamente, com indicações estáveis e precisas são apresentadas no display. As temperaturas de trabalho dos componentes críticos alcançaram valores de 40°C para o transistor Mosfet e 60°C para a bobina de ignição, considerando horas de funcionamento contínuo.

Todos os valores de frequência de operação disponíveis no equipamento produziram jatos de plasma com argônio e hélio, utilizando valores de tensão ajustados entre 18 a 25V e larguras de pulso na faixa de 40 a 95%, dependendo da frequência selecionada.

Utilizando o argônio foi possível produzir jatos de plasma de aproximadamente 40mm entre a extremidade inferior do bico injetor (saída de plasma) e a base do porta amostras, utilizando tensões de operação ajustadas em 24VCC. Além do cobre e PVC outros materiais foram submetidos ao plasma atmosférico durante testes de utilização da máquina, podendo citar: celulose, lâmina de vidro com filme de prata, alumínio e filme de ouro.

O equipamento foi submetido a condições de funcionamento variadas. Diversos testes em intervalos de operação de 30 minutos foram realizados. Operações com tempos prolongados de até 6 horas foram realizados com objetivo de verificar uma possível falha ou avaria de componentes, bem como acompanhar os valores de temperatura monitorados. Após inúmeros testes de funcionamento contínuo nenhuma anormalidade foi encontrada.

A fonte de alimentação do tipo SMPS foi utilizada em condições de alto consumo de corrente da bobina e apresentou uma baixa queda de tensão de saída (aproximadamente 10%), possibilitando realizar ajustes de tensão entre 18 e 25VCC e fornecendo valores de até 10A de corrente média para alimentação do circuito de potência.

Foi verificado que os valores ajustados de frequência e largura de pulso do sinal aplicado na bobina determinam a intensidade e o comprimento dos jatos de plasma produzidos. Constatou-se que outras grandezas também influenciam diretamente na ionização do gás e nas características do jato, sendo elas: a tensão aplicada na bobina, relacionada diretamente à energia consumida do circuito de potência, e a vazão do fluxo de gás aplicado no reator. Na Figura 40, é apresentado um jato de plasma produzido com gás hélio.

Figura 40 - Jato de Plasma à pressão atmosférica com gás hélio



Fonte: do Autor, 2019.

Conforme mencionado anteriormente, o valor da vazão de gás injetado no reator influenciou nas características do jato de plasma. Utilizando o argônio percebeu-se que valores entre 2 a 10 l/min produziram jatos mais intensos, aumentando a intensidade de acordo com o aumento da vazão. Com o gás hélio foi observado que vazões menores que 3 l/min aumentaram a intensidade do jato.

5.1.2 Alarmes e segurança do equipamento

Todos os alarmes de falha criados no equipamento foram testados e tiveram êxito no seu funcionamento. Diversos valores de limites de temperatura e corrente da bobina foram configurados no setup de máquina e as condições de falha foram criadas. As condições de sinalização e reset de falha também funcionaram de acordo com o esperado.

O fusível e o disjuntor termomagnético, localizados na parte traseira da máquina (Figura 34 (b)) foram testados em condições de anormalidades com objetivo de garantir a atuação destes elementos em condições de avaria no funcionamento.

Como o equipamento teve toda sua estrutura aterrada (módulo de controle e base-suporte), não existiram condições inseguras de operação do equipamento. Todos os componentes existentes na parte de alta tensão não apresentaram rompimento de sua rigidez dielétrica e também não propagaram arcos-elétricos em nenhuma condição de funcionamento.

5.1.3 Detalhes de Gerador APPJ

O Gerador APPJ pode ser transportado facilmente, sem a necessidade de cortar cabos de energia ou mangueiras pneumáticas já que conexões de engate rápido foram instaladas. O módulo de controle possui uma alça de transporte instalada na parte superior de sua tampa e o

suporte do bico injetor pode ser facilmente carregado devido a sua forma física e leveza. O peso total do conjunto é de aproximadamente 12kg.

O equipamento pode ser ligado em qualquer fonte de alimentação 220VCA, com frequência de 50 ou 60Hz. Testes foram realizados alimentando o equipamento com 127VCA, simulando uma condição de alimentação incorreta, o que ocasionou a energização do circuito de potência, porém o circuito de controle se manteve desligado, não danificando nenhum componente.

Interferências eletromagnéticas geradas pela bobina de ignição ocorreram durante a formação do plasma, produzindo ruídos induzidos na placa de controle e conseqüentemente travando o equipamento em diversas condições. Mesmo considerando que os circuitos de controle e potência são totalmente isolados, foi necessário instalar uma gaiola de Faraday ao redor da bobina, com objetivo de minimizar as interferências eletromagnéticas.

O custo total do equipamento pode ser considerado um fator positivo se considerarmos a importância e utilidade desta ferramenta em atividades de investigação e pesquisa. Considerando o custo de peças, componentes e alguns serviços utilizados em todos os processos de fabricação do Gerador APPJ, temos um custo total de aproximadamente 800 reais.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS

As amostras puras e as tratadas no gerador de plasma atmosférico, foram caracterizadas utilizando três técnicas, a microscopia de força atômica, a espectrometria infravermelha e a medição de ângulo de contato. O objetivo das análises realizadas foi investigar as modificações superficiais provocadas pelo jato de plasma atmosférico.

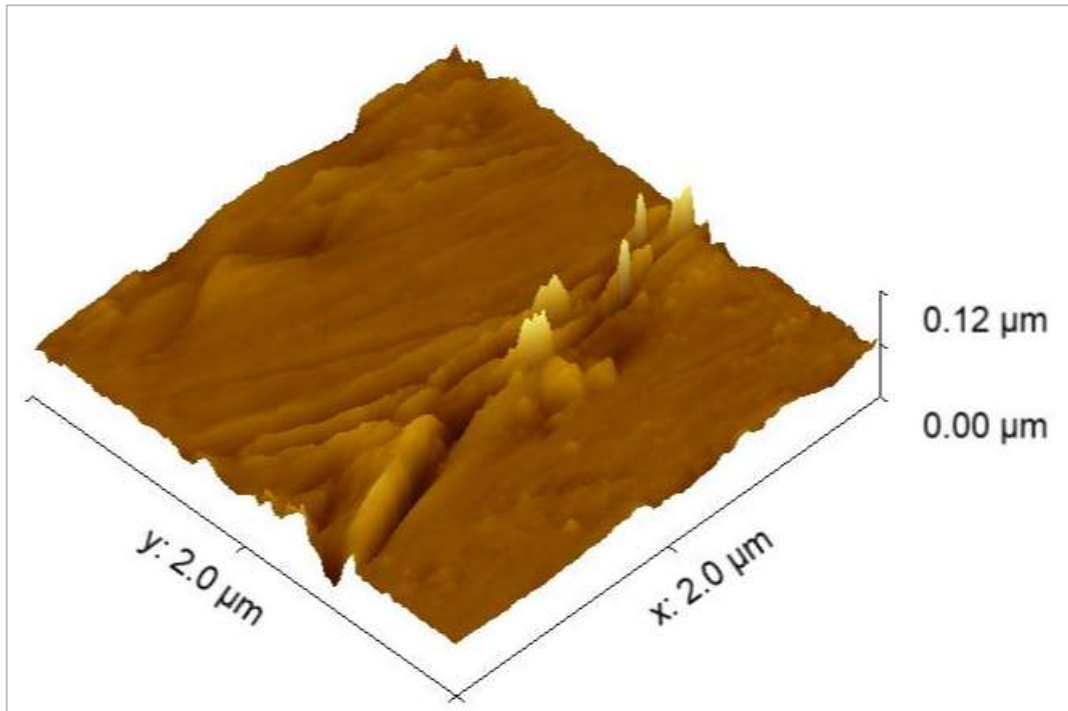
5.2.1 Microscopia de força atômica

Para esta análise foram utilizadas amostras de PVC e cobre, tratadas no plasma atmosférico com argônio e amostras sem tratamento para serem comparadas. O objetivo desta análise foi avaliar a topografia da superfície das amostras, comparando as diferenças entre as amostras de um material sem tratamento e um material tratado.

A partir dos resultados de AFM foi possível calcular a rugosidade média da superfície de cada área medida nas amostras, sendo utilizado o software Gwyddion para realizar esta tarefa. Na Figura 41 podemos verificar o relevo da superfície de uma amostra de cobre sem tratamento e na Figura 42 é exibido o relevo de uma amostra submetida ao plasma atmosférico

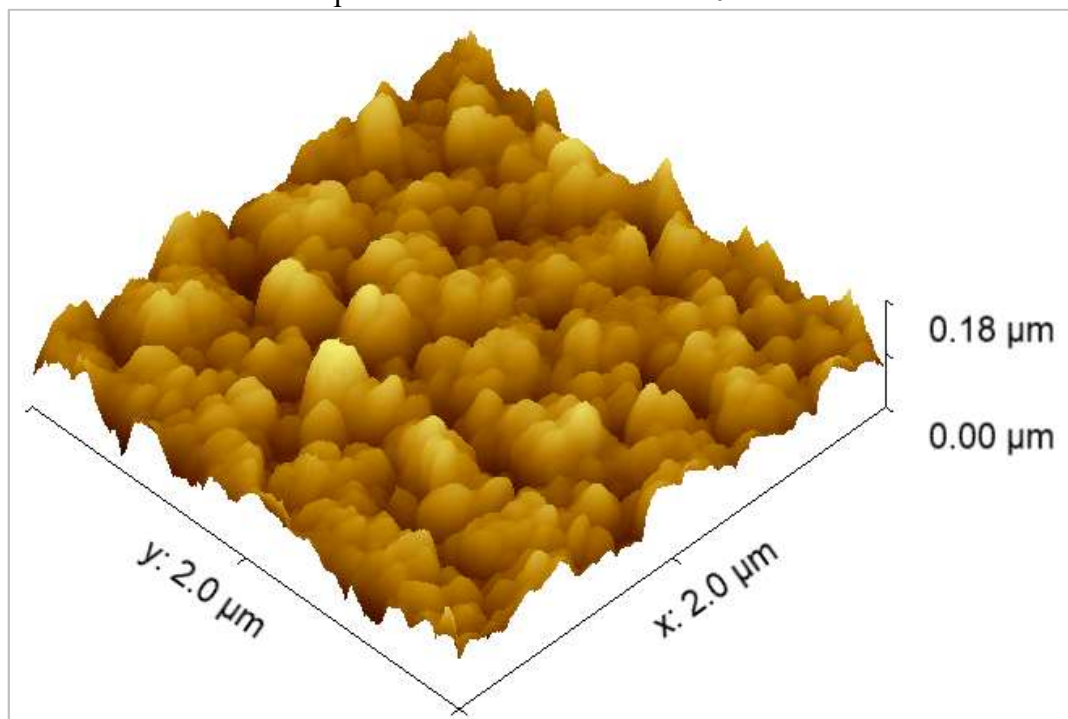
por um tempo de 10 minutos. Ambas as imagens são apresentadas escala de varredura de $2,0\ \mu\text{m} \times 2,0\ \mu\text{m}$.

Figura 41 – Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia de força atômica em amostras de cobre sem tratamento



Fonte: do Autor, 2019.

Figura 42 – Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia de força atômica em amostras de cobre tratada com plasma atmosférico durante 10 minutos



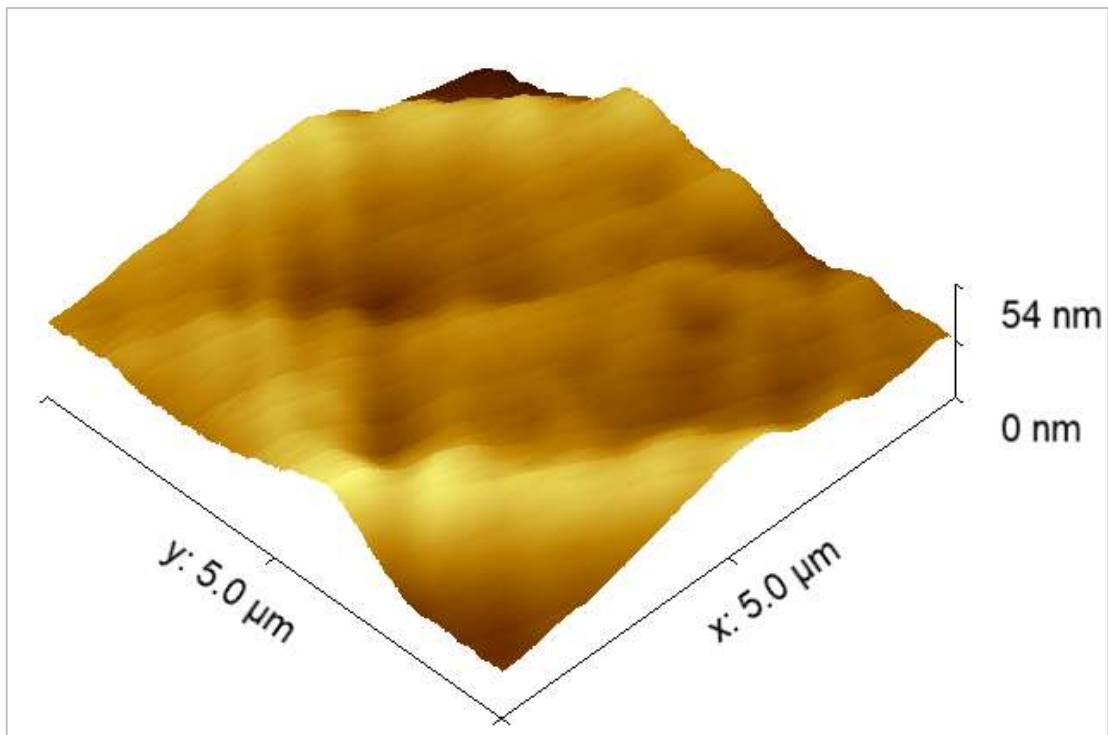
Fonte: do Autor, 2019.

A superfície da amostra de cobre sem tratamento (Figura 41) apresenta uma rugosidade média de 3,8 nm, enquanto na amostra tratada (Figura 42) a rugosidade média aumenta para 17,5 nm. Pode-se observar um aumento de mais de 4,5 vezes na rugosidade superficial do material tratado, mostrando a influência do jato de plasma atmosférico na modificação superficial do material.

A influência do tempo de tratamento foi observada nas amostras de PVC, em que duas amostras foram submetidas ao tratamento com tempos diferentes. Nas amostras de PVC foram avaliadas as rugosidades de três amostras, a primeira amostra sem tratamento, uma segunda submetida ao plasma atmosférico durante 3 minutos e uma terceira tratada durante 10 minutos.

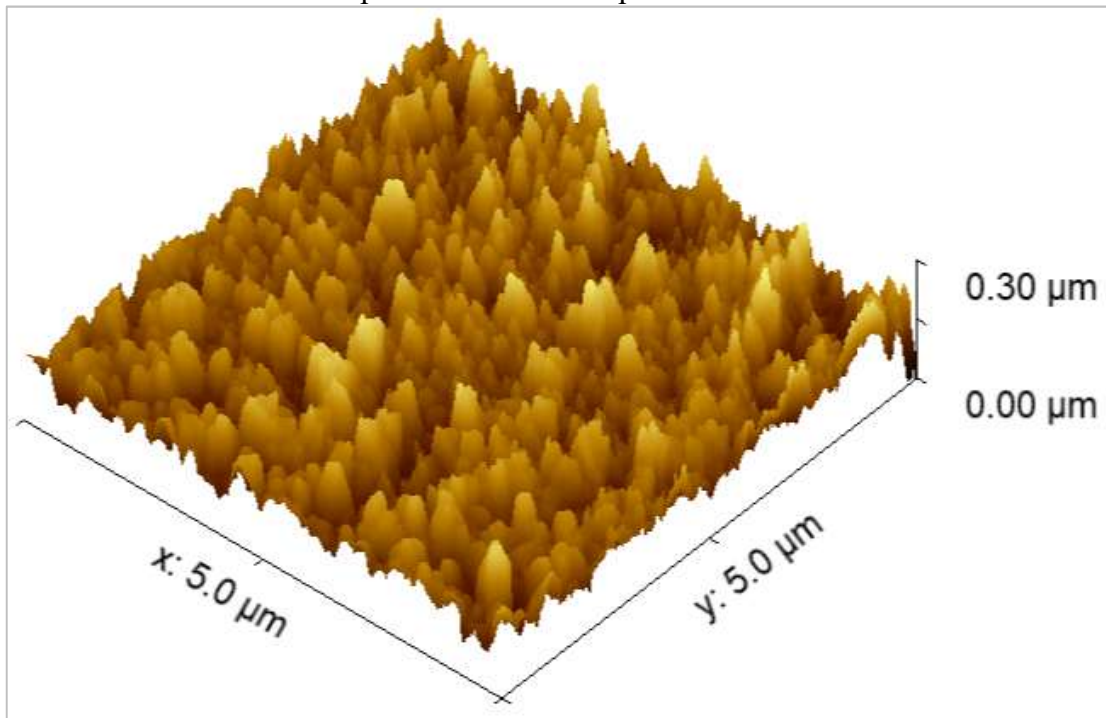
A análise topográfica nas amostras de PVC também mostrou aumento da rugosidade média nas amostras submetidas ao tratamento do plasma atmosférico em relação ao PVC puro. Na amostra sem tratamento foi verificada uma rugosidade média de 5,3 nm, enquanto na amostra tratada por 3 minutos a rugosidade alcançou o valor de 28,8 nm atingindo um aumento de maior que 5 vezes. A amostra tratada por 10 minutos teve sua rugosidade média em 48,8 nm, registrando um aumento maior que 9 vezes em relação a amostra pura.

Figura 43 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia e força atômica em amostras de PVC não tratada.



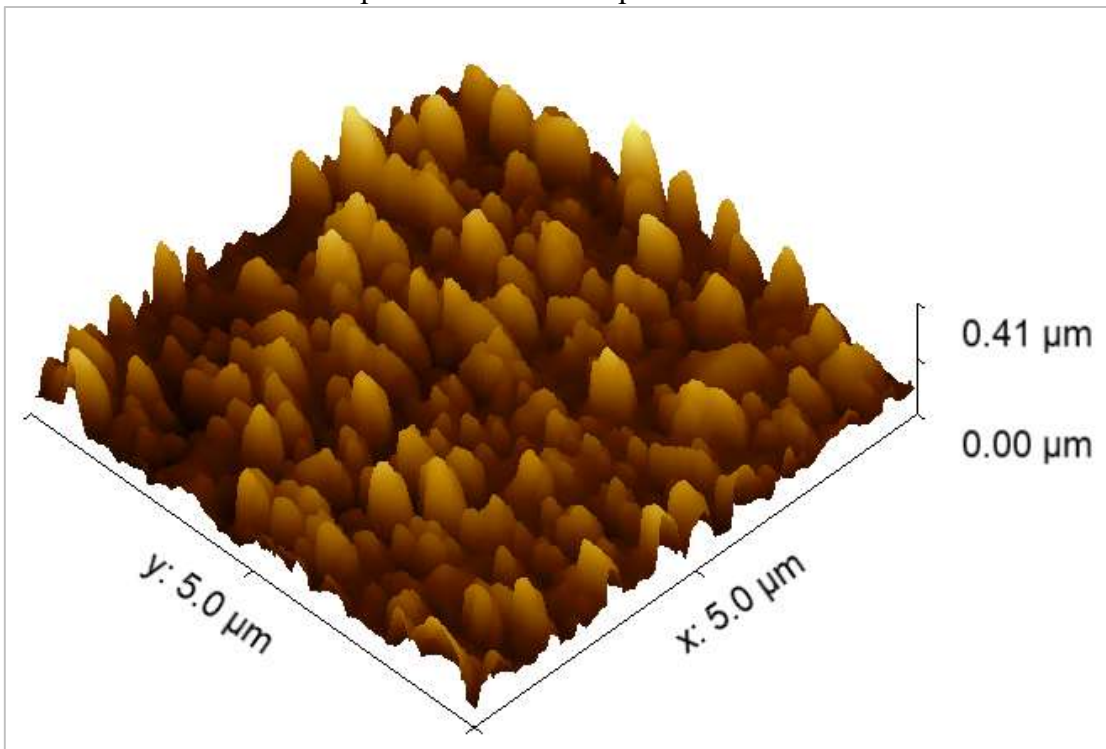
Fonte: do Autor, 2019.

Figura 44 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia e força atômica em amostras de PVC submetida ao plasma atmosférico por 3 minutos



Fonte: do Autor, 2019.

Figura 45 - Imagem da morfologia de superfície obtida por microscopia e força atômica em amostras de PVC submetida ao plasma atmosférico por 10 minutos



Fonte: do Autor, 2019.

Na análise das três amostras de PVC os resultados mostram a influência do plasma atmosférico na modificação superficial. Através dos valores de rugosidade e das imagens do

AFM percebemos que o tratamento com plasma atmosférico aumenta a rugosidade superficial, e que o aumento do tempo em que a amostra é submetida ao tratamento provoca uma maior alteração na superfície, neste caso, aumentando a rugosidade.

Um número maior de amostras considerando uma quantidade maior de intervalos de tratamento podem ser realizados em trabalhos futuros com objetivo de investigar com maior detalhamento a influência do plasma atmosférico em relação ao tempo.

5.2.2 Espectroscopia infravermelha por Transformada de Fourier

A técnica FTIR possibilitou a verificação de possíveis mudanças no espectro do PVC. Para esta análise foram utilizadas duas amostras de PVC, uma amostra sem tratamento e outra tratada durante 10 minutos com plasma atmosférico de argônio.

Os resultados da espectroscopia infravermelha são mostrados nas Figuras 46 e 47, em que são apresentadas duas faixas do espectro do PVC, considerando uma amostra de PVC sem tratamento e outra de PVC tratada por 10 minutos. São realizadas avaliações do espectro nas faixas de 2000 a 500 cm^{-1} (Figura 46) e 4000 a 2000 cm^{-1} (Figura 47).

Figura 46 - Espectroscopia infravermelha (FTIR) de amostras de PVC na faixa de 2000 a 500 cm^{-1} (vibração molecular: ν estiramento, δ dobramento e ρ balanço)

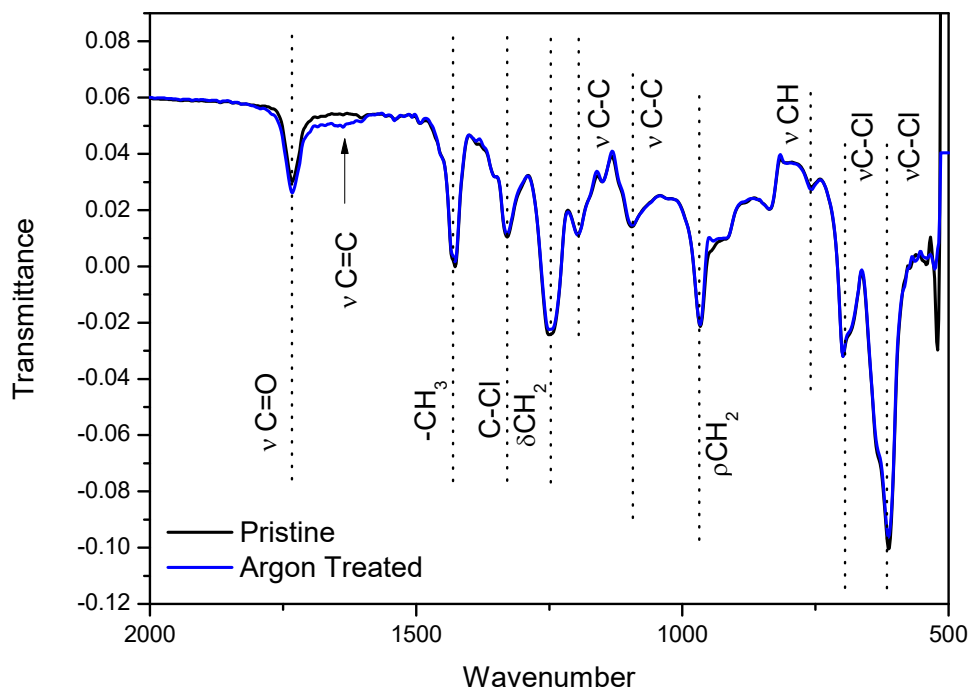
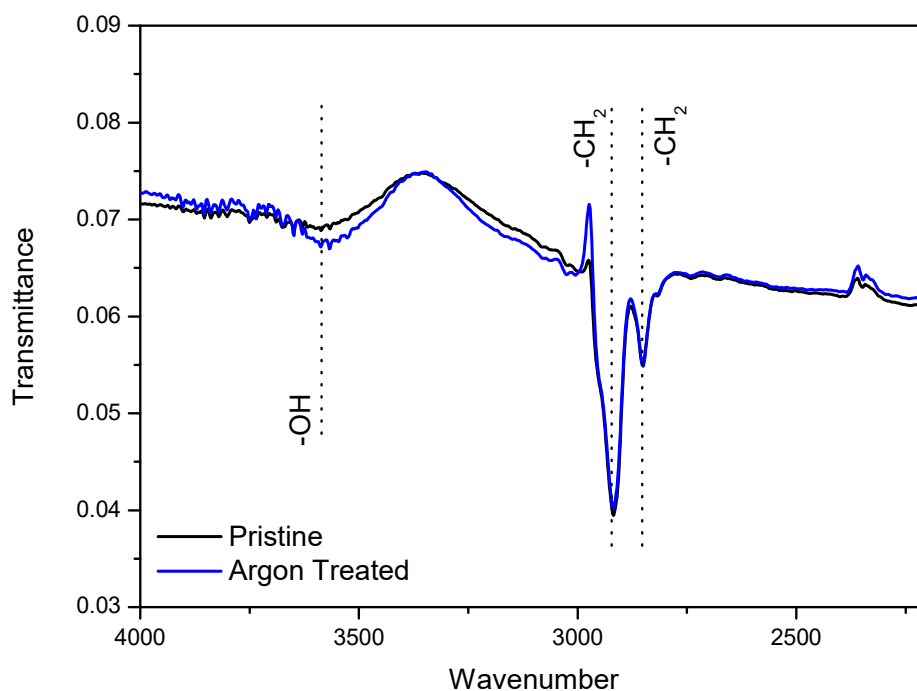


Figura 47 - Espectroscopia infravermelha (FTIR) amostras de PVC - Faixa de 4000 a 2000 cm^{-1}



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

Os espectros obtidos através dos padrões extraídos do FTIR permitem relacionar os picos principais com as ligações químicas constituintes de cada molécula, possibilitando a identificação das principais bandas características de absorção das ligações químicas de interesse (HOLLER, SKOOG E CROUCH, 2009). Os pontos de interesse são apresentados em destaque nas figuras, representados pelas linhas verticais.

Como podemos observar vários picos característicos apresentados na superfície das amostras de PVC, os picos em 3588 cm^{-1} para -OH, 2925 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} para -CH₂, 1735 cm^{-1} para $\nu\text{C=O}$, 1630 cm^{-1} para $\nu\text{C=C}$, 1430 cm^{-1} para -CH₃, 1328 cm^{-1} para C-Cl, 1248 cm^{-1} para δCH_2 , 1194 cm^{-1} e 1093 para $\nu\text{C-C}$, 968 cm^{-1} para ρCH_2 , 760 cm^{-1} para νCH , 693 cm^{-1} e 615 cm^{-1} para $\nu\text{C-CL}$.

As mudanças observadas na amostra de PVC submetida ao plasma atmosférico em relação ao PVC não tratado foram as seguintes:

- Ligeira diminuição da banda associada à ligação C-Cl em 615 cm^{-1} .
- Surgimento do estiramento C=C em 1630 cm^{-1} ;
- Aumento da intensidade da banda associada ao estiramento C=O em 1730 cm^{-1} ;
- Aumento da intensidade da banda associada à ligação OH em 3588 cm^{-1} ;

Essas alterações estão associadas a efeitos relacionados à degradação da estrutura polimérica, aumento da reticulação da cadeia (crosslinks), aumento da oxidação e de grupos aromáticos, efeitos similares aos observados por Galmiz et al., (2017) no estudo da degradação do PVC usando DBD com ácido oxálico. Na Tabela 3 são apresentadas as atribuições dos picos com seus respectivos grupos funcionais e modo vibracional.

Tabela 3 - Alteração das bandas do espectro do PVC tratado em relação ao PVC puro

Número de onda (cm ⁻¹)	Tipo de vibração	Símbolo do modo vibracional	Grupo Funcional
3588	Estiramento	v	OH
2925 e 2850	Estiramento	v	CH ₂ e CH
1735	Estiramento	v	C=O
1630	Estiramento	v	C=C
1430	Dobramento	δ	CH
1248	Dobramento	δ	CH ₂
1194 e 1093	Estiramento	v	C-C
968	Balanço	ρ	CH ₂
760	Estiramento	v	CH
693 e 615	Estiramento	v	C-CL

Fonte: Adaptado de Galmiz et al., 2017.

5.2.3 Medição do ângulo de contato

O parâmetro ΔG_{sas}^{TOT} calculado expressou a variação da energia livre de interação interfacial entre as moléculas do material imersas em água, sendo a mais apropriada medida da hidrofobicidade, considerado um critério quantitativo. De acordo com Fialho Júnior et. al. (2017), esse critério quantitativo define a superfície quanto à hidrofobicidade de forma eficiente, uma vez que leva em consideração as interações do tipo van der Waals, interações eletrostáticas, além das forças de interação de caráter polar podendo estas ser atrativas ou repulsivas.

A Tabela 4 apresenta os resultados da variação de energia livre de interação hidrofóbica (ΔG_{sas}^{TOT}) obtida por meio dos valores dos ângulos de contatos para as amostras de cobre e PVC, tratadas e não tratadas. As amostras tratadas foram submetidas ao plasma atmosférico de argônio durante 18 minutos.

Tabela 4 - Valores dos componentes apolares (ΔG_{sas}^{LW}) e polares (ΔG_{sas}^{AB}) da energia livre total de interação das superfícies estudadas

Amostras	ΔG_{sas}^{LW} (mJ.m ⁻²)	ΔG_{sas}^{AB} (mJ.m ⁻²)	ΔG_{sas}^{TOT} (mJ.m ⁻²)
PVC puro	-6,681	-65,131	- 71,813
PVC tratado	-7,911	-38,826	- 46,736
Cobre puro	-3,517	38,950	35,433
Cobre tratado	-1,839	-48,624	- 50,463

Fonte: Elaborado pelo Autor, 2019.

As superfícies de PVC e de cobre tratado com plasma foram consideradas hidrofóbicas ($\Delta G_{sas}^{TOT} < 0$), enquanto a superfície de cobre (controle) hidrofílica ($\Delta G_{sas}^{TOT} > 0$), sendo possível afirmar que o tratamento com plasma promoveu alteração nas superfícies avaliadas.

Se forem comparados os valores do PVC sem tratamento em relação ao PVC tratado, observa-se que o valor da energia de interação se torna menos negativo após o tratamento. Por outro lado, para as amostras de cobre, percebe-se uma diminuição significativa no valor da energia livre de interação, em que se tem um valor positivo para o cobre puro e um valor negativo para a amostra submetida ao tratamento, mostrando que o tratamento superficial deixou o material hidrofóbico.

A Tabela 4 também fornece os valores de ΔG_{sas}^{LW} e ΔG_{sas}^{AB} , ou seja, apresentam os valores das interações do tipo Lifshitz-van der Waals e interações do tipo ácido-base de Lewis. Observou-se forte contribuição no valor final das interações do tipo ácido-base que do tipo van der Waals para as amostras de PVC e de cobre após o tratamento com plasma. As interações ácido-base constituem o balanço das interações que são responsáveis pela tensão interfacial. Estas interações ocorreram entre as moléculas que estão muito próximas. Pode-se dizer que nessas superfícies, as moléculas de água evitaram interações desfavoráveis (menor energia de adesão entre líquido e sólido) com as superfícies apolares. No caso de superfícies hidrofóbicas, as moléculas de água preferem interagir entre elas (maior energia de coesão do líquido) a adsorverem na interface hidrofóbica. Portanto, as moléculas de água adquiriram maior grau de liberdade o que provocou o aumento de entropia do sistema e a obtenção da variação da energia livre de Gibbs de interação hidrofóbica negativa. Já para a superfície hidrofílica do cobre (controle), as interações do substrato com a água foram favoráveis.

No caso do PVC, além da rugosidade, mudanças químicas na estrutura do polímero foram observadas por FTIR, podendo dessa forma haver uma contribuição dessa superfície quimicamente modificada sobre o caráter hidrofílico do material.

Por meio dos resultados gerados pelas medidas de ângulo de contato pode-se concluir que o plasma atmosférico à temperatura ambiente promoveu modificações superficiais nas amostras de PVC e de cobre, sendo capaz de gerar mudanças físico-químicas na superfície de materiais de maneira significativa sem o uso de processos químicos convencionais e preparações adicionais dos materiais.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Pode-se concluir que os objetivos deste trabalho foram alcançados, tendo como o principal deles o desenvolvimento e a construção de um gerador de jato de plasma frio à pressão atmosférica. O equipamento foi capaz de produzir jatos de plasma com frequências de 1,5K a 10KHz, tensões de 18 a 25VCC e sendo alimentado com os gases argônio ou hélio.

Foi possível projetar e fabricar um equipamento de grande utilidade para atividade de pesquisa, empregando componentes e peças de baixo custo e de fácil acesso comercial, oferecendo qualidade, confiabilidade, facilidade de operação e segurança ao usuário. Peças de reposição também podem ser adquiridas no comércio nacional sem a necessidade de importação.

Observou-se que o jato de plasma atmosférico produzido tem sua intensidade e comprimento alterados de acordo com as variações de parâmetros como: frequência, largura de pulso e amplitude do sinal aplicado à bobina de ignição, o fluxo de gás injetado no reator e a distância entre a saída (extremidade inferior do bico injetor) e a amostra.

Através das três técnicas utilizadas para caracterização das amostras tratadas, pode-se concluir que o jato de plasma, produzido à pressão atmosférica e próximo a temperatura ambiente, foi capaz de produzir modificações superficiais no cobre e no PVC.

Na microscopia de força atômica foi constatado que o tratamento do cobre e PVC com o plasma atmosférico aumenta a rugosidade média da superfície do material e que no PVC quanto maior o tempo de funcionalização maior será a modificação promovida. Na espectroscopia infravermelha foi observado que uma amostra de PVC tratada com plasma frio sofreu modificações químicas em suas cadeias moleculares e nas medidas de ângulo de contato pode-se inferir que o tratamento deixou o PVC menos hidrofóbico e a de cobre mais hidrofóbico.

Deseja-se que a tecnologia utilizada no desenvolvimento do equipamento e a forma de construção possa ser útil para outros trabalhos e servir de referência para outros estudos e projetos de equipamentos APPJ.

Espera-se que este equipamento, quando disponível no LFFPP do campus ICTE da UFTM possa ser utilizado para novas pesquisas e trabalhos envolvendo o tratamento de materiais com plasma atmosférico e também em aplicações com materiais biológicos.

7 REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**, São Paulo: Editora Prentice Hall, 2000. 479 p.
- ALLEGRO. **ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor**. 2017. Disponível <<https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/ACS712-Datasheet.ashx>>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- ALVES JR, C. et al. Nitriding of titanium disks and industrial dental implants using hollow cathode discharge. **Surface and Coating Technology**, v. 194, n. 2-3, p. 196-202, 2005.
- ARAUJO, E. A. et al. Nanopartículas de prata: Método alternativo de sanitização para couve minimamente processada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 138–145, 2015.
- BABIJ, M. et al. Atmospheric pressure plasma jet with high-voltage power supply based on piezoelectric transformer. **Review of Scientific Instruments**, v. 85, n. 5, 2014.
- BARBI, I. **Eletrônica de Potência**, 5. Ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2005. 315 p.
- BELLAN, P. M. **Fundamentals of Plasma Physics**, 1. Ed. Cambridge University Press, 2006. 628 p.
- BINNIG, G.; QUATE, C. F.; GERBER, C., Atomic Force Microscope. **Physical Review Letters**. v.56, n.9, p. 930–933, 1986. doi:10.1103/PhysRevLett.56.930.
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamental of Plasma Physics**, 3. Ed. New York: Editora Springer, 2004.
- BOGART JR., T. F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**, 3. Ed. São Paulo: Editora Makron Books, 2001. 463 p.
- BOSCH. **Bobinas de Ignição Bobinas Asfálticas e Bobinas Plásticas**. 2016. Disponível em: <http://br.boschautomotive.com/media/parts/download_2/ignicao/5363_BR_Catalogo_Bobinas_2016_v6.pdf>
- BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Dispositivos e teoria de circuitos**, 11. Ed. São Paulo: Editora Pearson, 2013. 766 p.
- BRAGA, N. C. **Fontes de Alimentação**, São Paulo: Editora Saber, 2005. 232 p.
- COUTINHO, M. P. **Influência da morfologia da superfície na molhabilidade do titânio comercialmente puro**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Instituto de Engenharia. Rio de Janeiro, p. 84. 2007.
- D'AGOSTINO, R. et al. Low-temperature plasma processing of materials: Past, present, and future. **Plasma Processes and Polymers**, v. 2, n. 1, p. 7–15, 2005.
- ELIASSON, B.; KOGELSCHATZU, L. Modelind and applications of silent discharge

plasmas. p. 309 - 323, 1991.

FAVIA, P.; D'AGOSTINO, R. Plasma treatments and plasma deposition of polymers for biomedical applications. **Surface and Coatings Technology**, v. 98, n. 1-3, p. 1102-1106, 1998.

FRANK-KAMENETSKII, D.A. **Plasma: The fourth state of matter**. New York: Springer, 1972

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**, 4. Ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2008. 250 p.

FIALHO JUNIOR, J. F. Q. et. Al. Stainless steel and polyethylene surfaces functionalized with silver nanoparticles. **Food Science and Technology International**, v. 0, n. 0, p. 1-8, 2017.

GALMIZ, O. et. al. Hydrophilization of outer and inner surfaces of Poly(vinyl chloride) tubes using surface dielectric barrier discharges generated in ambient air plasma. **Plasma Process and Polymers**, p.1-8, 2017.

GBS ELEKTRONIK **Minipuls 4**. Kit for efficiently generating high frequency high voltage. 2013. Disponível em: <http://www.electrofluidsystems.com/Plasma-Generator-Systems/minipuls4_e.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.

HENRIQUE, T.S.; UEDA, M. **Projeto de uma fonte DC para produção de plasma aplicado em tratamento de materiais**. 2004. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Ministério da Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2004.

HERMANN, H.W. et al. Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ). **Physics of Plasmas**, v.6, n.5, p.2284-2289, 1999.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de Análise Instrumental**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

JARRIGE, J.; LAROUSSE, M.; KARAKAS, E. Formation and dynamics of plasma bullets in a nonthermal plasma jet: influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 19, n. 6, p. 065005, 2010.

KOGELSCHATZ, U; ELIASSON, B e EGLI, W. Dielectric-Barrier discharges. Principle and Applications. **Journal de Physique**. IV Colloque, 07 (C4), p.C4-47-C4-66, 1997.

KRUSS GHMB. Tensiometer DSA100, Instruction
Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292D.pdf>>. Acesso em: 11 jan 2018.

LAROUSSE, M.; AKAN, T. Arc-Free Atmospheric Pressure Cold Plasma Jets: **A Review**. **Plasma Processes and Polymers**, v. 4, n. 9, 2007.

LAROUSI, M.; LU, X. Room-temperature atmospheric pressure plasma plume for biomedical applications. **Applied Physics Letters**, v. 87, n. 11, p. 113902-3, 2005.

LI, X. et al. Characteristics of an atmospheric-pressure argon plasma jet excited by a dc voltage. **Plasma Sources Science and Technology**, v.22, 2013.

LIU, S.; NEIGER, M. Excitation of dielectric barrier discharges by unipolar submicrosecond square pulses. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 34, n. 11, p. 1632, 2001-05-22 2001.

LU, X.; LAROUSI, M.; PUECH, V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. **Plasma Source Science and Technology**, v.21, p. 17, 2012.

LU, X. An 11 cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine. **Applied Physics Letters**, v. 92, n. 8, p. 081502-2, 2008.
Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1063/1.2883945> >.

LUZ, A. P.; RIBEIRO, S.; PANDOLFELLI, V.C. Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários. **Cerâmica**, v. 54, p.174-183, 2008.

MACHIDA, M. Ferrite loaded DBD plasma device. **Brazilian Journal of Physics**, v.45, p. 132-137, 2015.

MACHUNO, L. G. B. et. al. Desenvolvimento e avaliação de uma fonte DC de alta tensão para utilização em sistema de deposição de filmes finos por pulverização catódica. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 492-500, 2016.

MALVINO, A.; BATES, D.J. **Eletrônica**, 7. Ed. Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2011. 672 p.

MEYER, E. Atomic Force Microscopy. **Progress in Surface Science**, v. 41, p. 3-49, 1992.

MICROCHIP **PIC16F87XA** Data Sheet 28/40/44-Pin Enhanced Flash Microcontrollers. 2013
Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292D.pdf>>. Acesso em: 11 jan 2018.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**, 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, INC, 1995. 802 p.

NASCIMENTO, A. E. G. **Estudo da molhabilidade de superfícies de parafina e aço inoxidável por soluções de tensoativos não iônicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 115. 2015.

NASESKA, M. Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Ljubljana: 2016. 12 p. Apostila utilizada no curso de graduação de Matemática e Física da Universidade da Ljubljana.

NEGRISOLI, M. E. M. **Instalações Elétricas: Projetos prediais em baixa tensão**. 3. Ed. São Paulo: Editora Blucher, 1987. 192 p.

ON SEMICONDUCTOR. **MUR460** Switchmode Power Rectifiers. 2013. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MUR420-D.PDF>>. Acesso em: 13 jan 2018.

PARK, G. Y. et al. Atmospheric-pressure plasma sources for biomedical applications. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 21, n. 4, p. 043001, 2012.

PARK, J. et al. An atmospheric pressure plasma source. **Applied Physics Letters**, v. 76, n. 3, p. 288–290, 2000.

PENKOV, O. V. et al. A review of recent applications of atmospheric pressure plasma jets for materials processing. **Jornal of Coatings Technology and Research**, v. 12, n. 2, p. 225-235, 2015.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas**, São Paulo: Editora Érica, 2002. 358 p.

PERTENCE JUNIOR, A. **Eletrônica Analógica: amplificadores operacionais e filtros ativos**, Porto Alegre: Editora Bookman, 2003.

PETRUZELLA, F. D. **Motores Elétricos e Acionamentos**, Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2013. 498 p.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**, São Paulo: Editora Makron Books, 1999.

ROCHA, V. **Esterilização de materiais termossensíveis através da aplicação de plasma gerado por Descarga com Barreira Dielétrica (DBD)**. 2009. 160f. Dissertação (Mestrado em Física) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

SALA, O. **Fundamentos da Espectroscopia Raman e no Infravermelho**. 2. Ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 280 p.

SANTOS, R. G. **Avaliação da molhabilidade de superfícies de oleodutos através de medidas de ângulo de contato: Efeito de asfaltenos e de ácidos naftênicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnológica, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 101. 2003.

SCHUTZE, A. et al. The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to Other Plasma Sources, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 26, p. 1685 – 1694, Dec. 1998.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

SMITH, B. C. **Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy**, 2 Ed. Boca Raton: Editora CRC Press, 2011. 182 p.

SHAW, D. J. **Introdução à Química de Colóides e Superfícies**, 1. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher/Edusp, 1975, S.P.

TESCHKE, M. et al. High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet. **Plasma Science, IEEE Transactions**, v. 33, n. 2, p. 310-311, 2005. ISSN 0093-3813. Disponível em: < 10.1109/TPS.2005.845377 >.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM35** Precision Centigrade Temperature Sensors. 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

VAN OSS, C. J. *Interfacial Forces in Aqueous Media*. New York: Marcel Dekker Inc, 1994. 440 p.

VISHAY **IL300** Linear Optocoupler, High Gain Stability, Wide Bandwidth. 2014. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/83622/il300.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2018

VISHAY **6N137** High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10MBd. 2016. Disponível em: <<https://www.vishay.com/docs/84732/6n137.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2018

WALSH, J. L.; KONG, M. G. Room-temperature atmospheric argon plasma jet sustained with submicrosecond high-voltage pulses. **Applied Physics Letters**, v. 91, n. 22, p. 221502-3, 11/26/ 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1063/1.2817965> >.

WANG, C.; ZHANG, G.; WANG, X. Comparisons of discharge characteristics of a dielectric barrier discharge with different electrode structures. Selected papers from the IUVSTA 18th International Vacuum Congress (IVC-18) held in Beijing, P.R.China, 23 -27 August 2010, v. 86, n. 7, p. 960-964, 2012.

WELTMANN, K. D. et al. Atmospheric pressure plasma jet for medical therapy: Plasma parameters and risk estimation. **Contributions to Plasma Physics**, v. 49, n. 9, p. 631–640, 2009.

WINTER, J.; BRANDENBURG, R.; WELTMANN, K. D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions. *Plasma Sources Science and Technology*, v. 24, p.1-19, 2015.

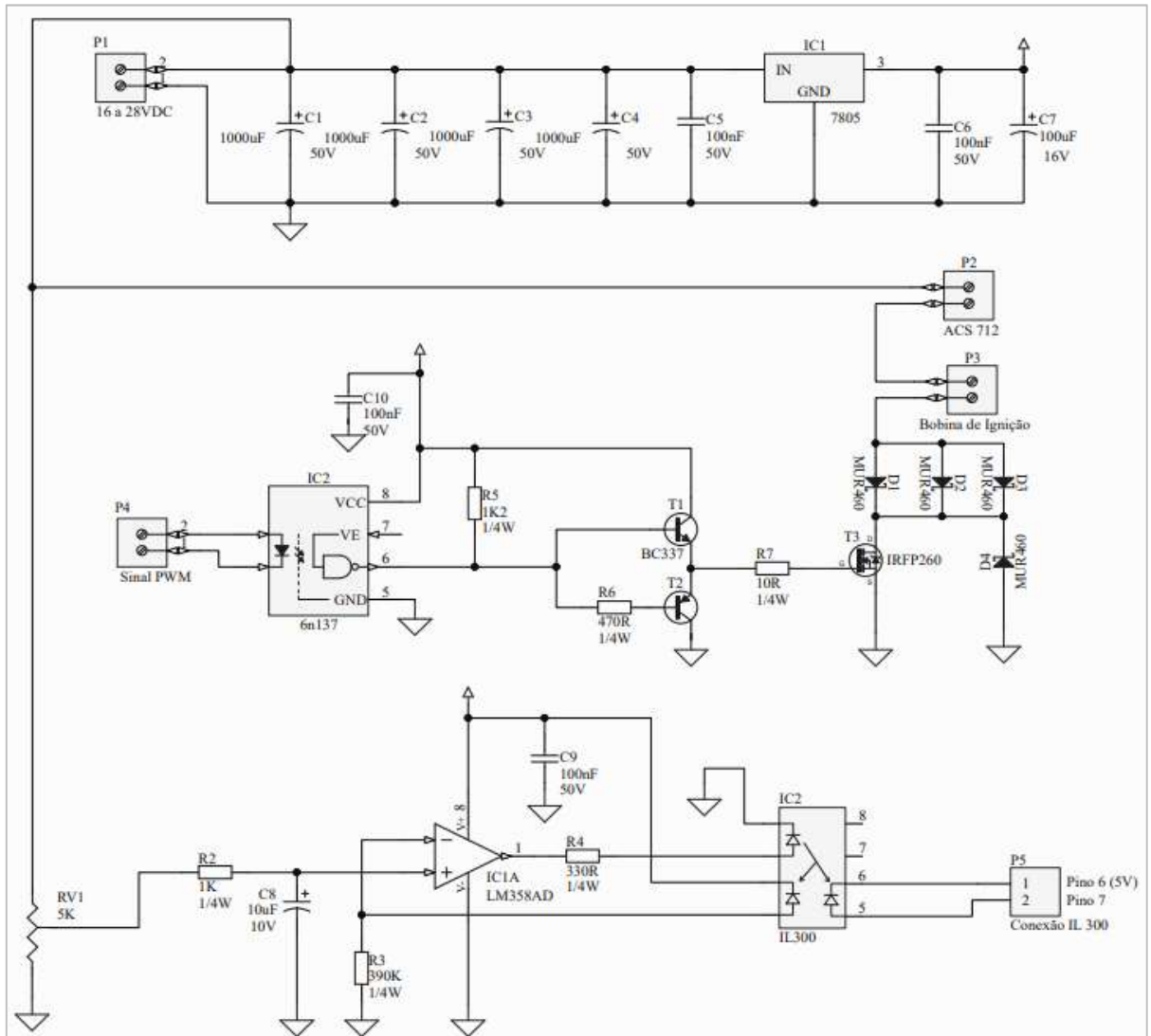
YAO, L.; HE, J. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology – from surface engineering to functional surfaces. **Progress in Materials Science**, v. 61, p. 94–143, 2014.

ZANETTE, S. I.; **Introdução à microscopia de força atômica**, 1 Ed. São Paulo: Livraria da Física, 2010, S.P.

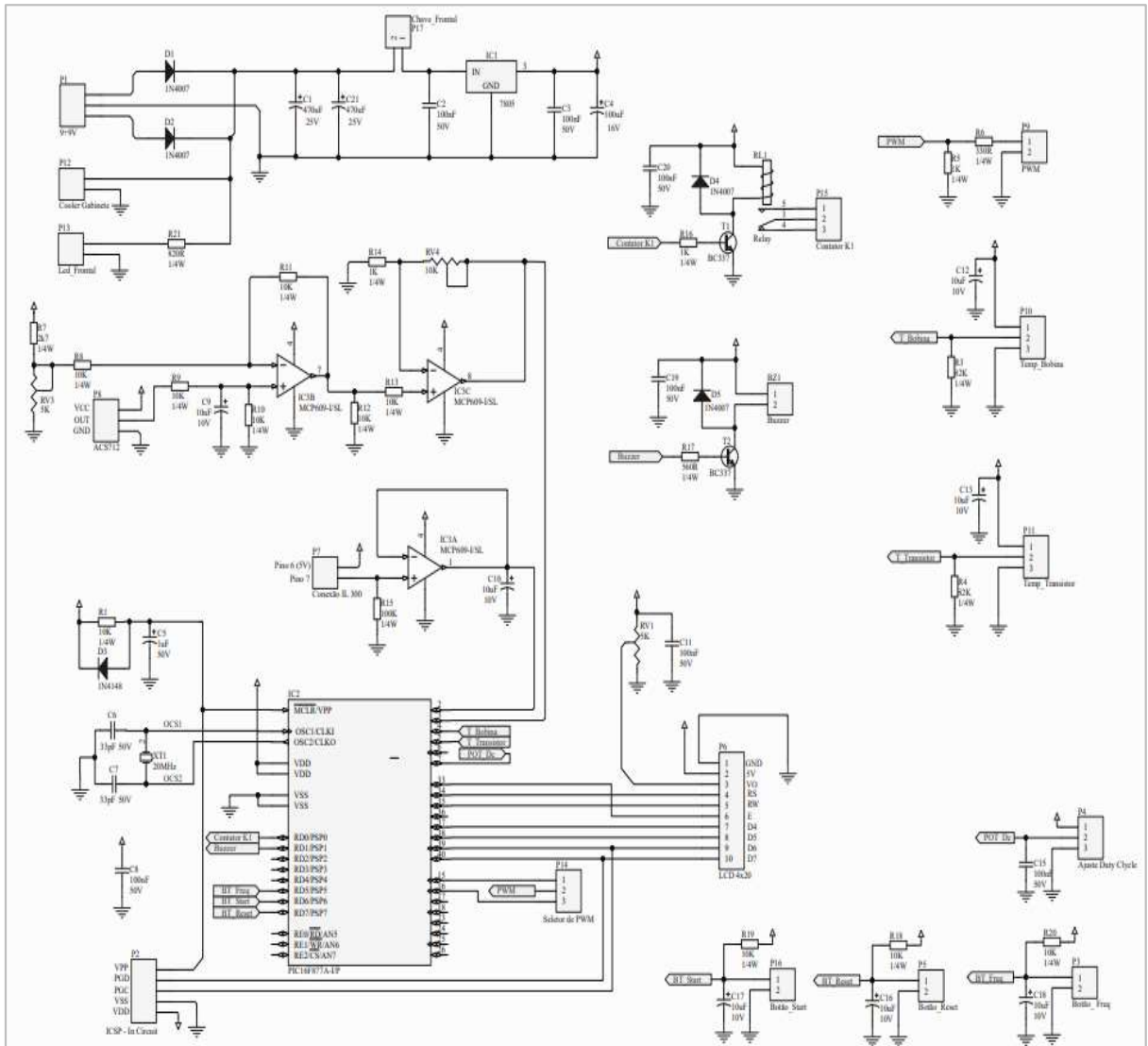
ZANG, Z. et al. Cobalt Nanomaterials: Synthesis and Characterization. In: KUMAR, C.S.S.R. (Ed.). **Nanomaterials for the Life Sciences: Magnetic Nanomaterials**. v.4. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, p. 587-631, 2011.

APÊNDICES

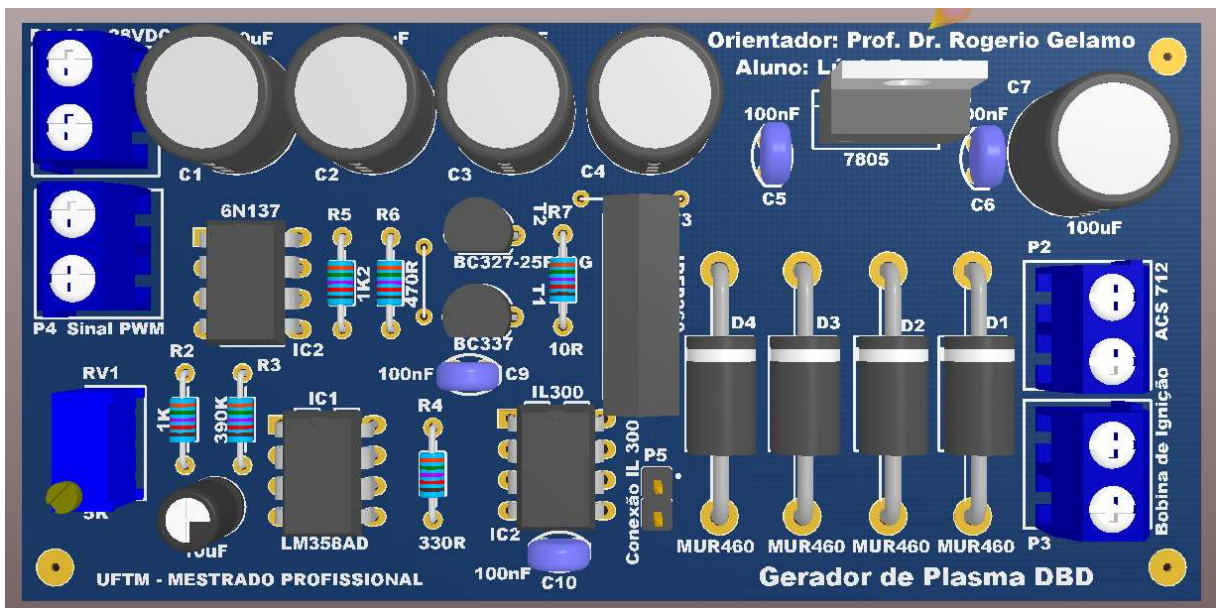
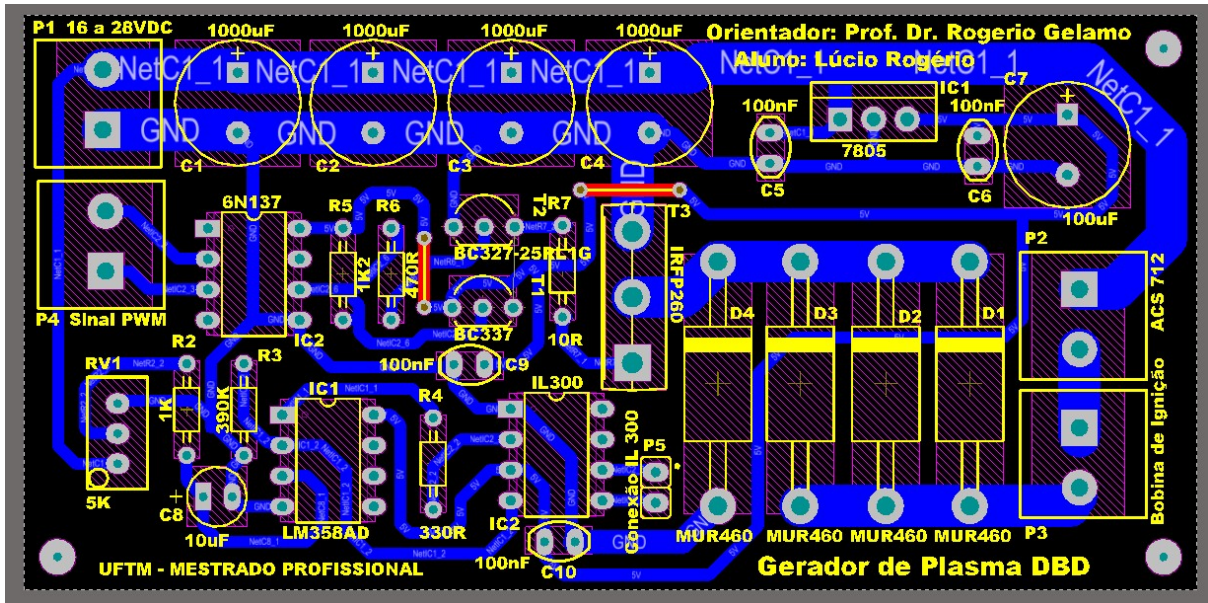
APÊNDICE A – ESQUEMA ELETRÔNICO – POTÊNCIA



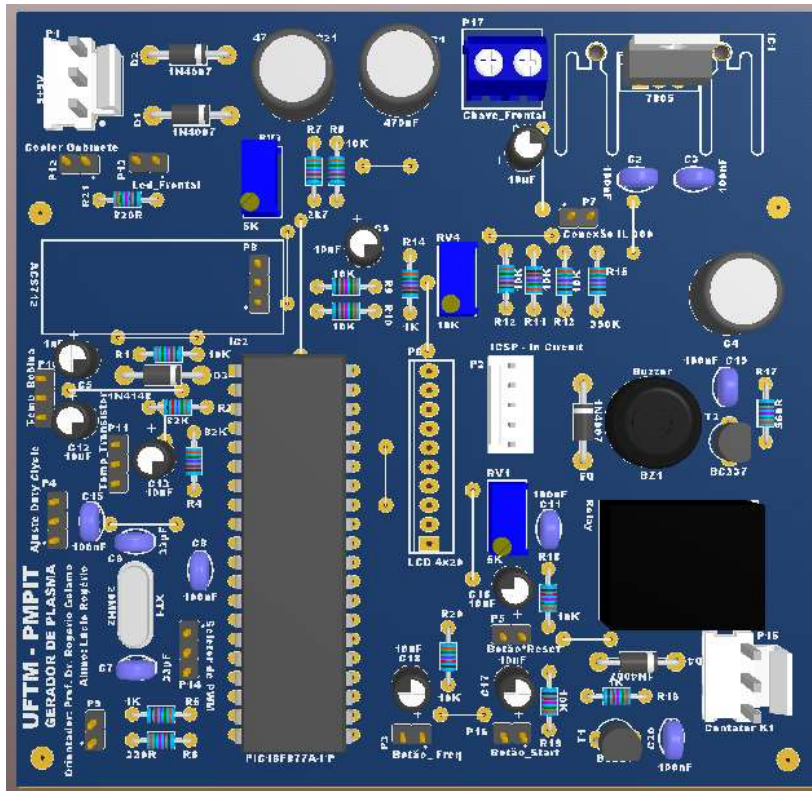
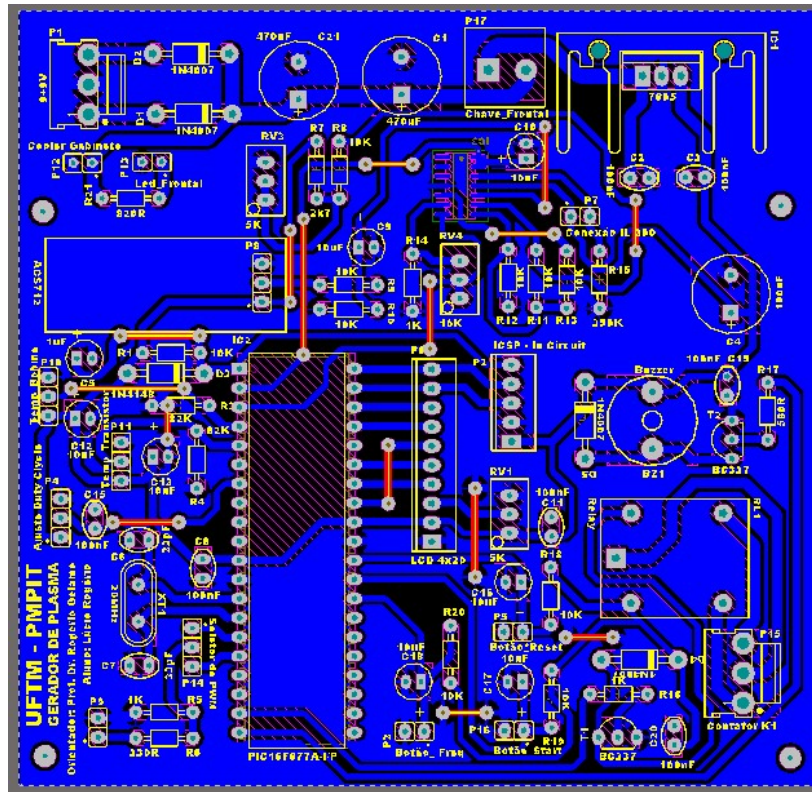
APÊNDICE B – ESQUEMAS ELETRÔNICO – CONTROLE



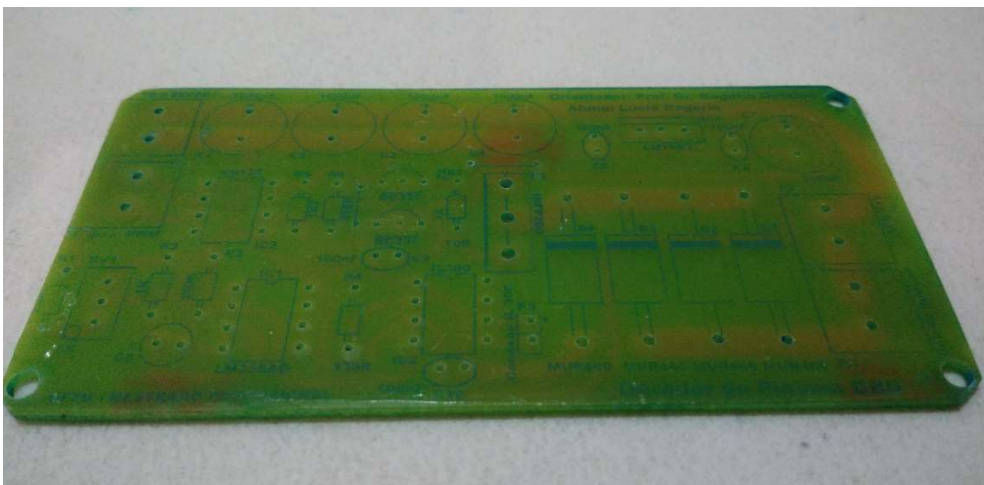
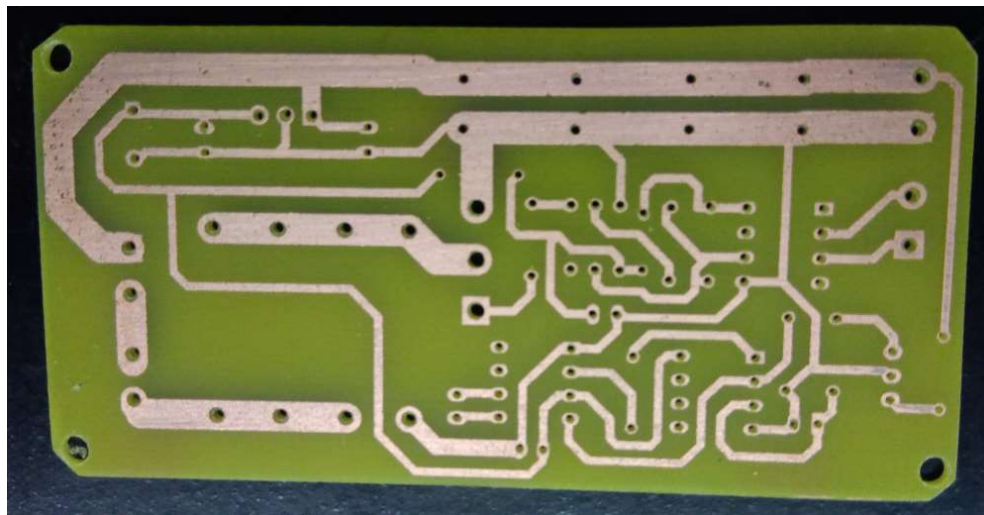
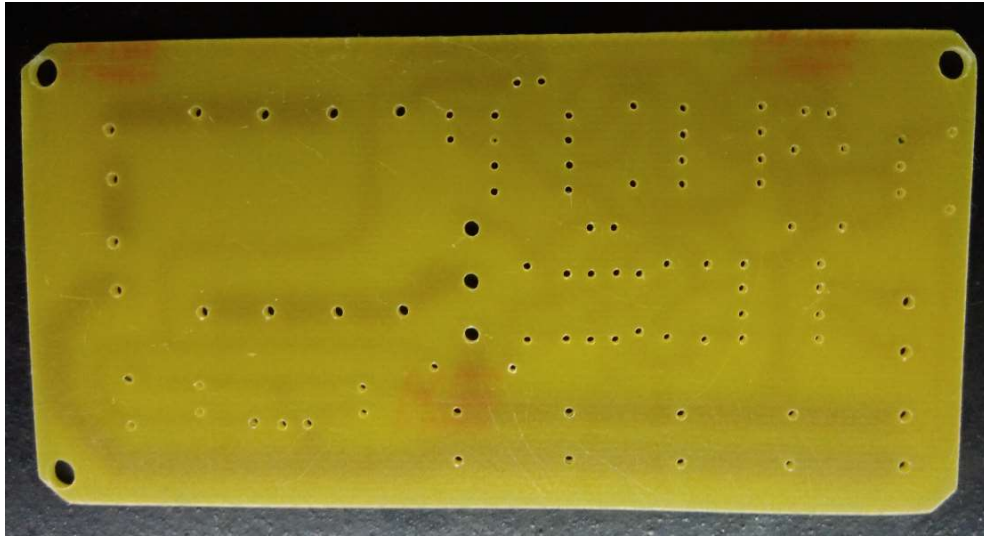
APÊNDICE C – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – POTÊNCIA

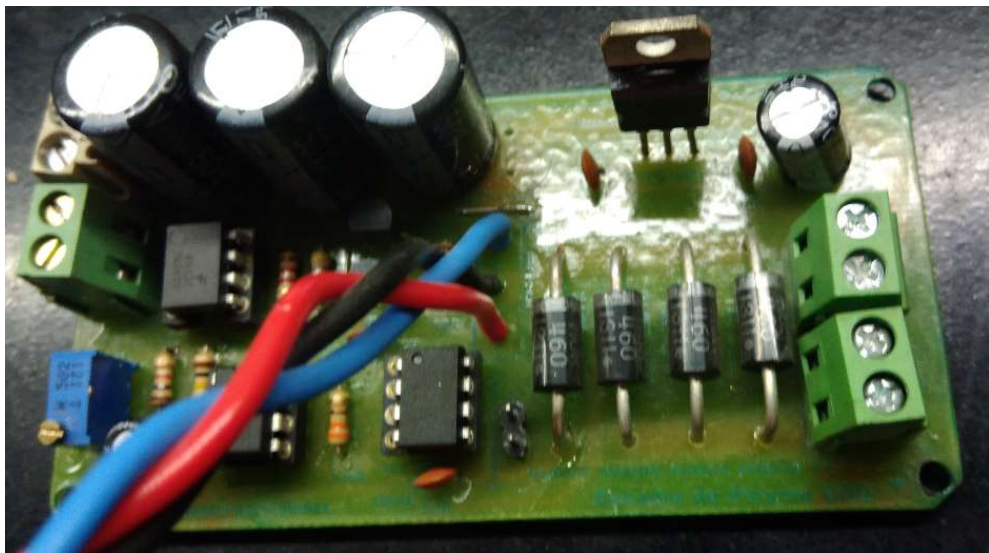
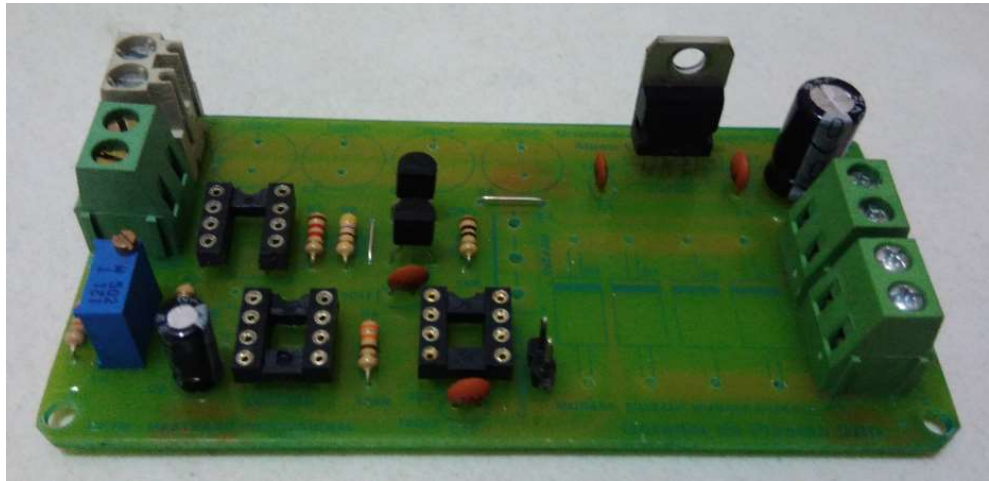
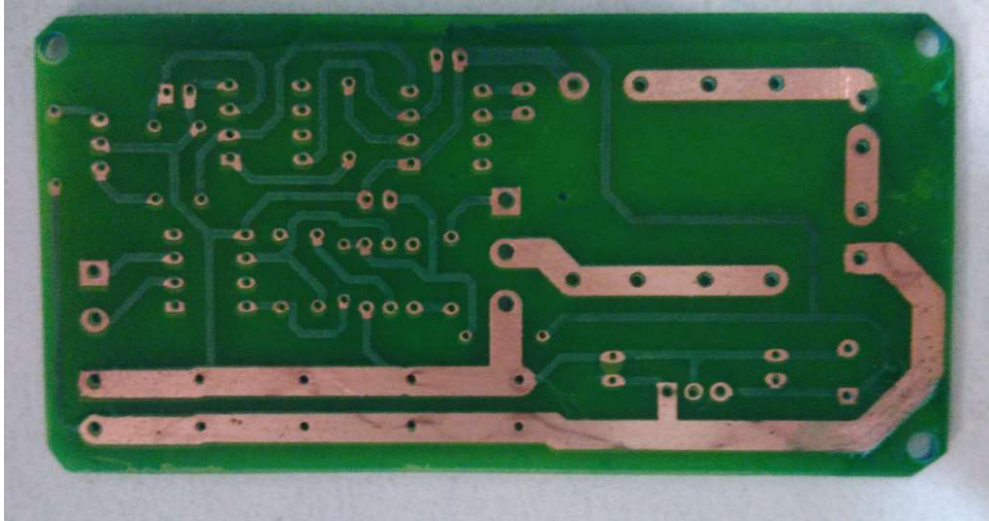


APÊNDICE D – LAYOUT PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – CONTROLE

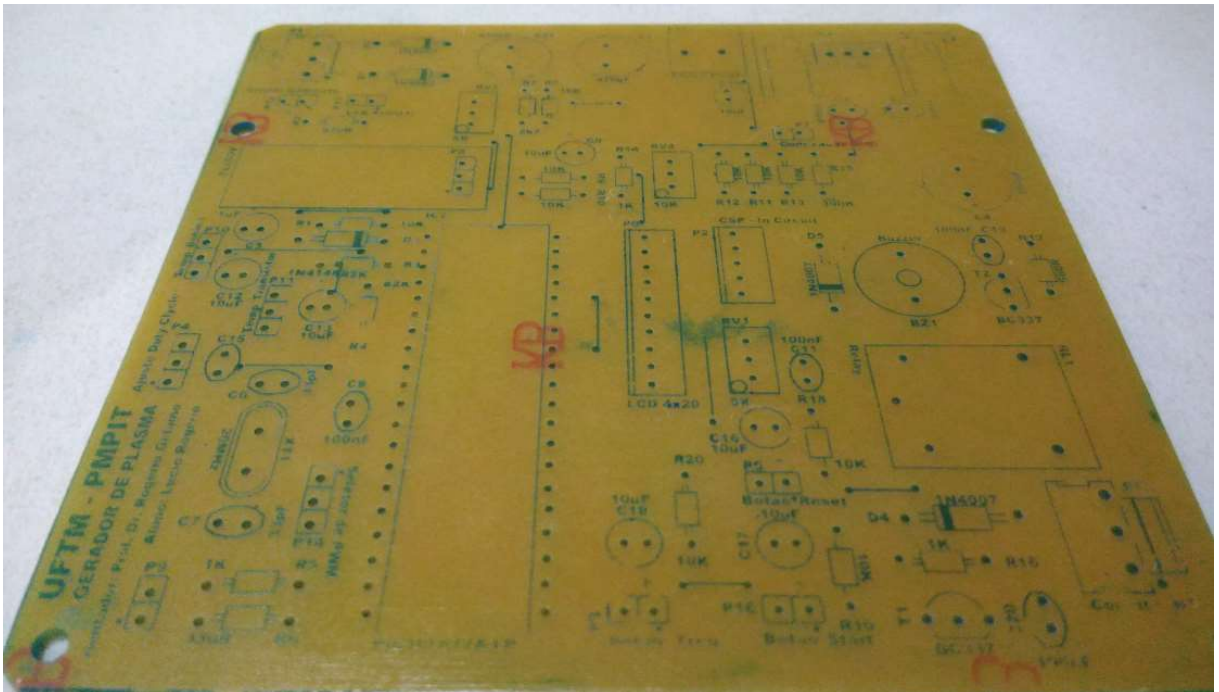
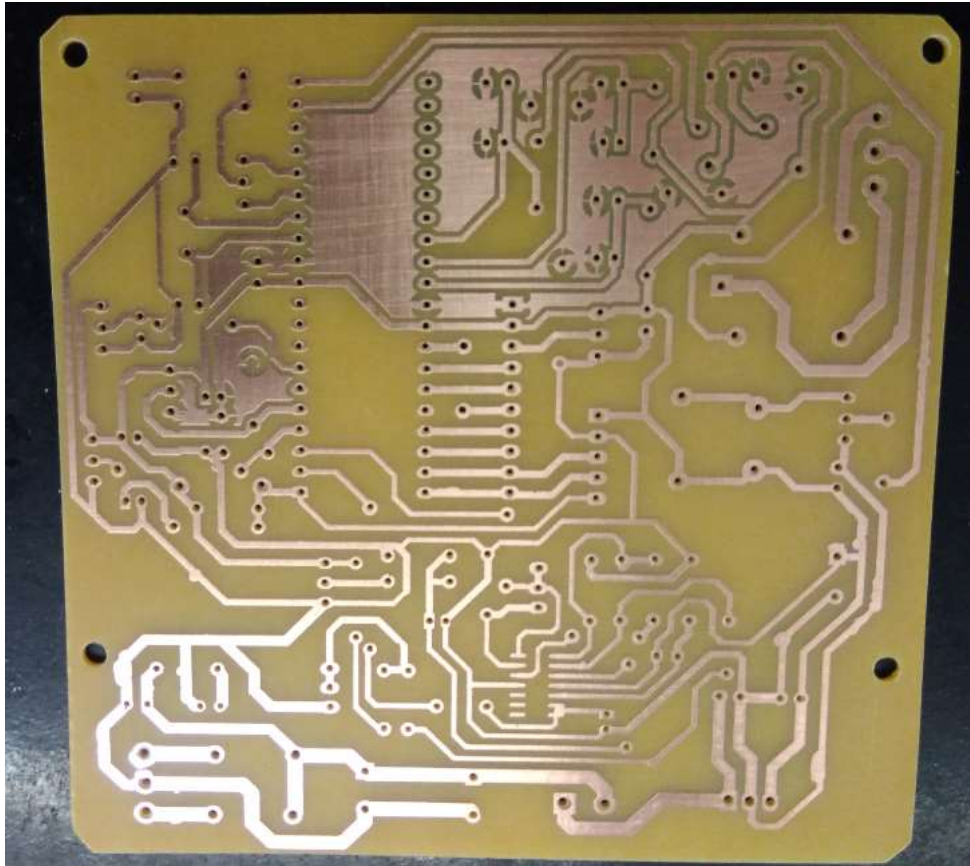


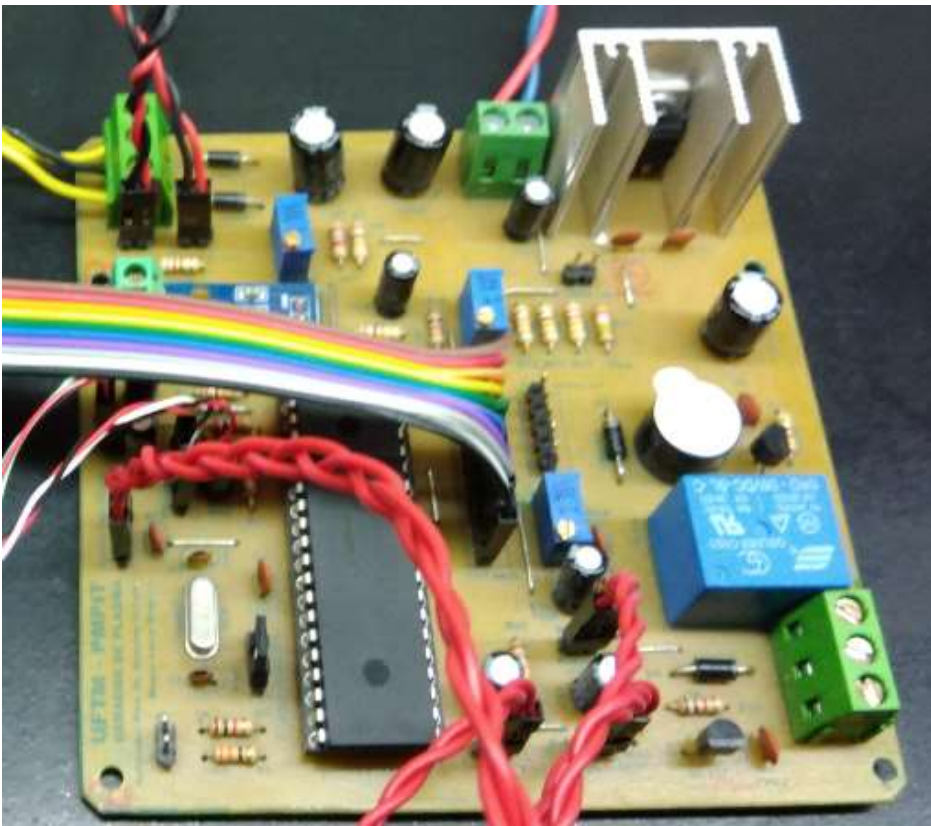
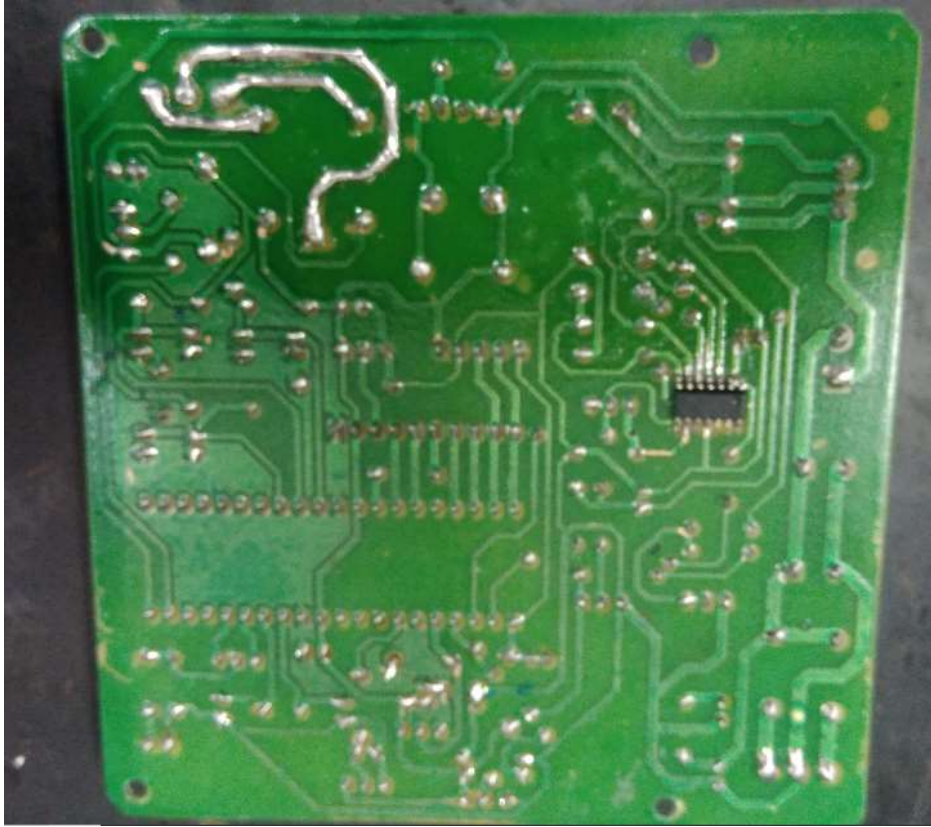
APÊNDICE E – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – POTÊNCIA



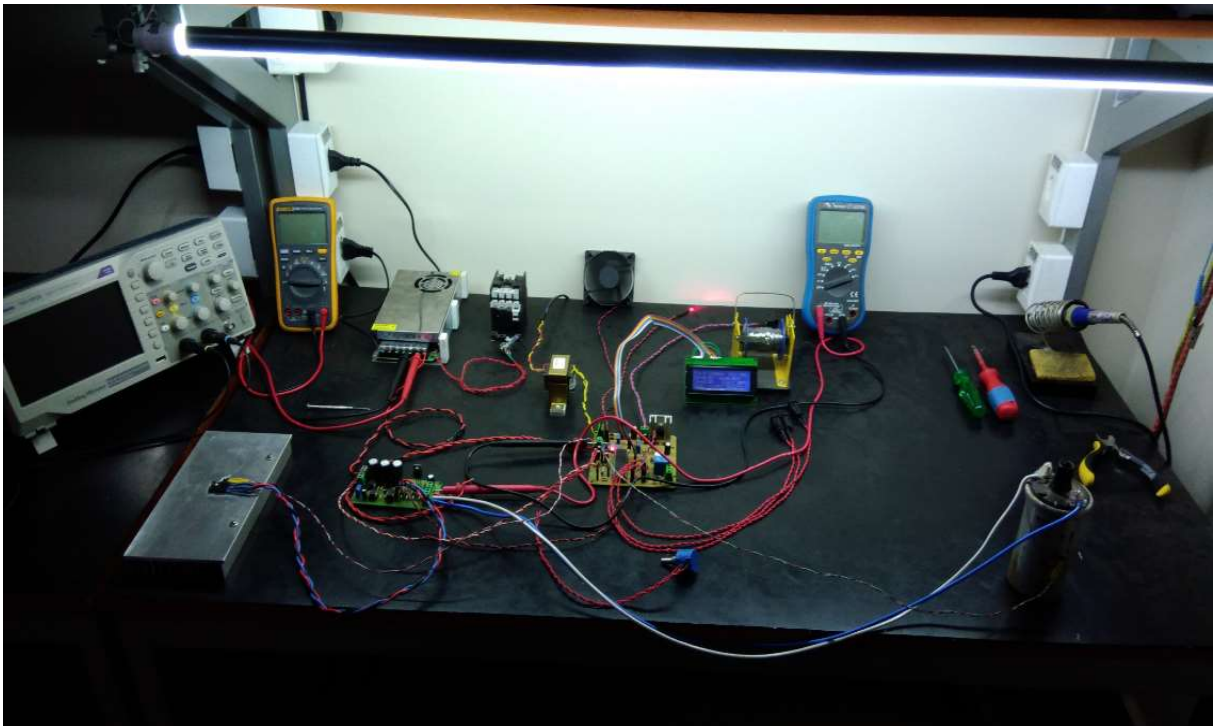
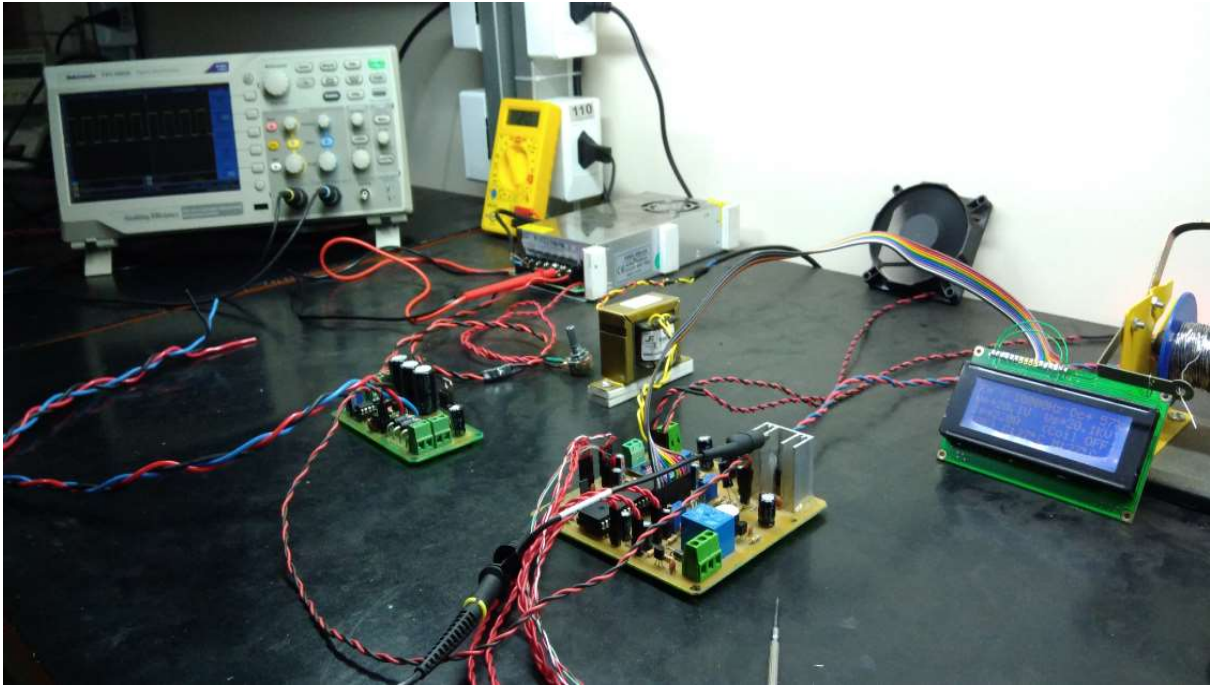


APÊNDICE F – PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO – CONTROLE

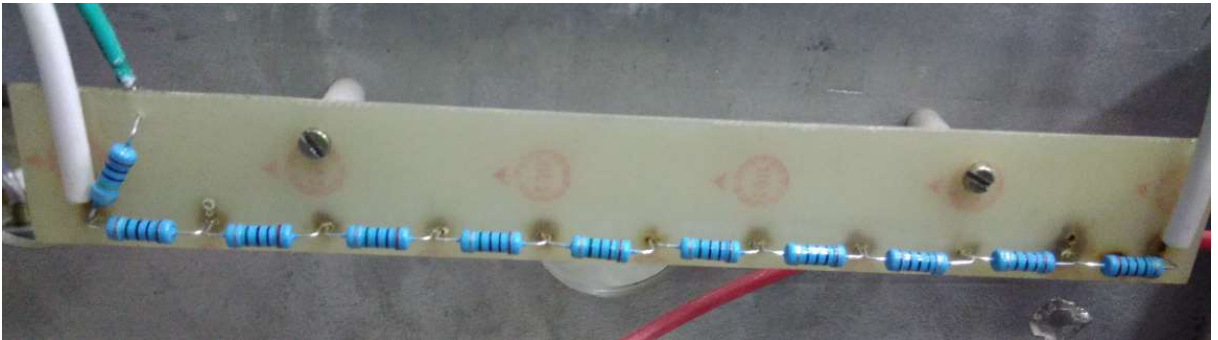
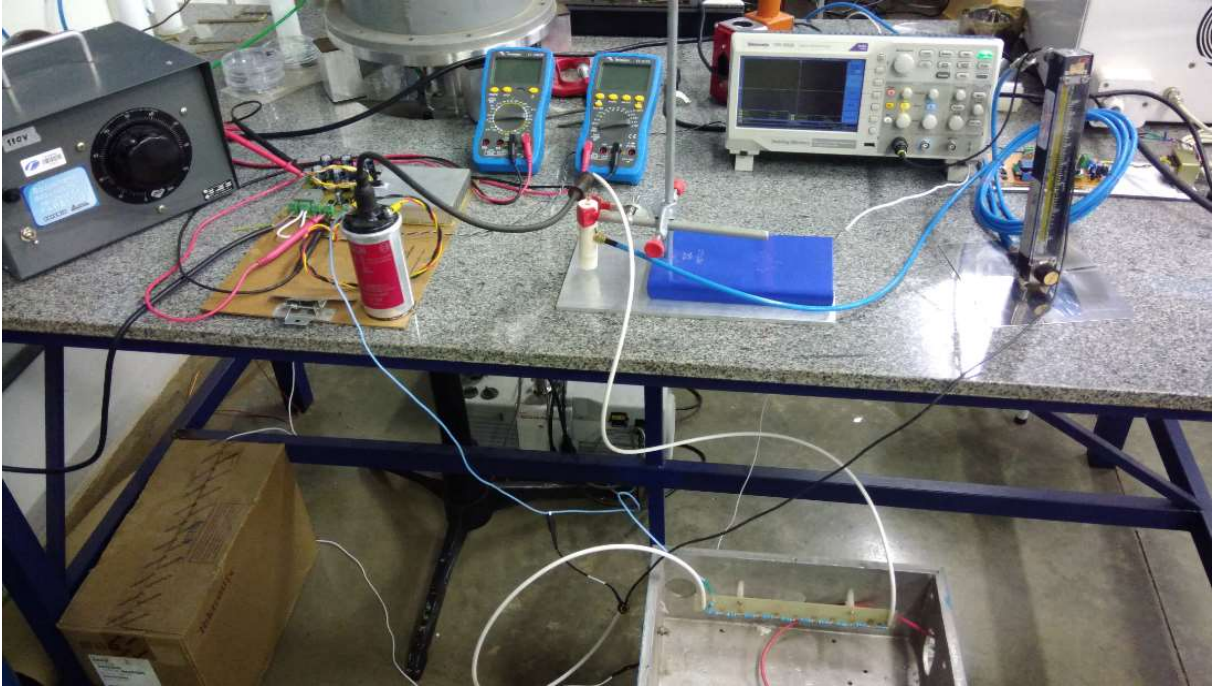




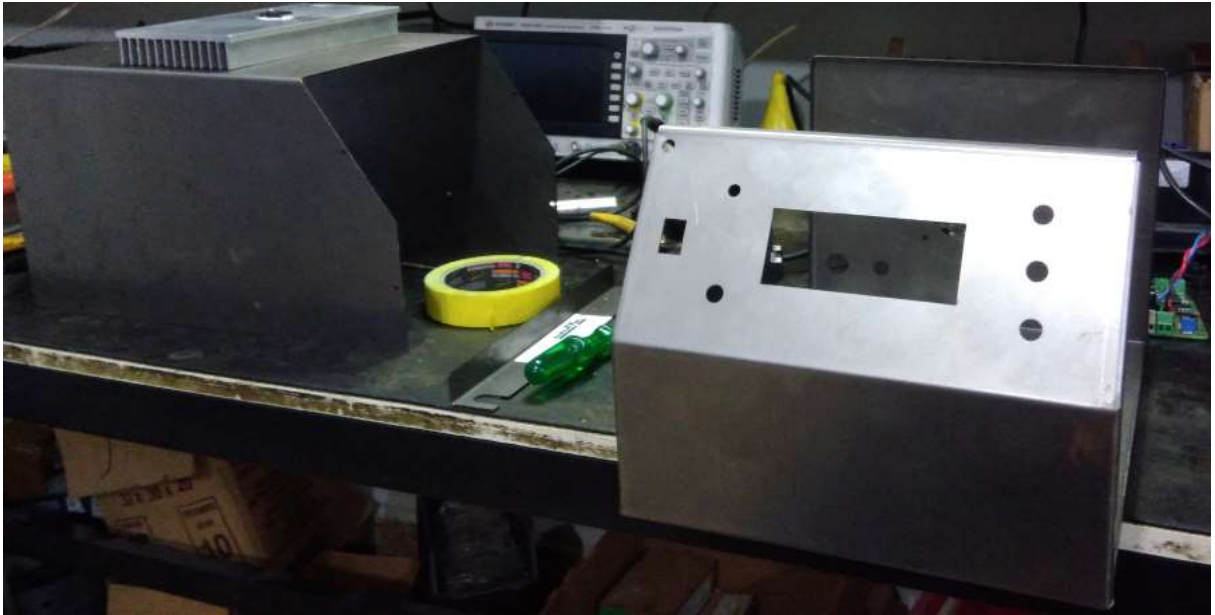
APÊNDICE G – TESTES, CONFIGURAÇÕES E AJUSTES DAS PCIs



APÊNDICE H – MEDIÇÃO DO SINAL DE ALTA TENSÃO DA BOBINA



APÊNDICE I – GABINETE FABRICADO DE AÇO-CARBONO



APÊNDICE J – ADESIVOS FRONTAL E TRASEIRO INSERIDOS NO GABINETE

ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA JET

Power:

ON/OFF

VOLTAGE

DUTY CYCLE

START

FREQ.

RESET



**Universidade Federal
do Triângulo Mineiro**



**PMPIT - PROGRAMA DE MESTRADO
PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO
TECNOLÓGICA**

APPJ GENERATION

POWER INPUT:	220VAC / 60HZ
USERS SETTINGS:	Voltage / Freq / DC
PROTECTION:	Circuit breaker / Fuse

MACHINE PARAMETERS
ADJUSTING ALARMS

- Coil Temperature: 30 to 100 °C
- Mosfet Temperature: 30 to 100 °C
- Coil Current: 1 to 10 A

After switch on the equipment, at the end of the initial message, press the start and freq keys at the same time to access the machine parameters.

GENERAL SWITCH

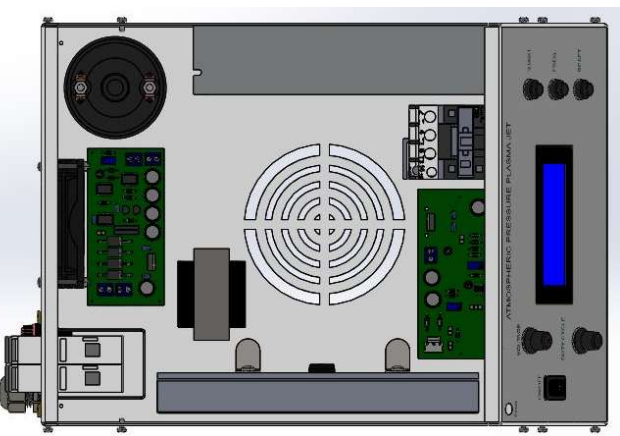
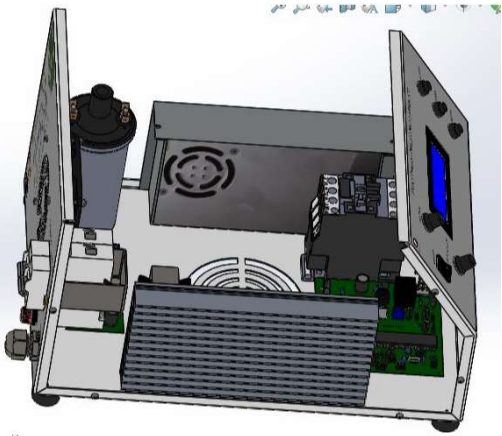
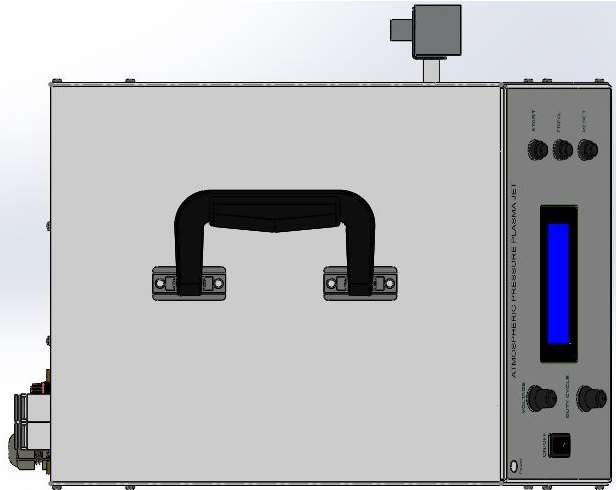
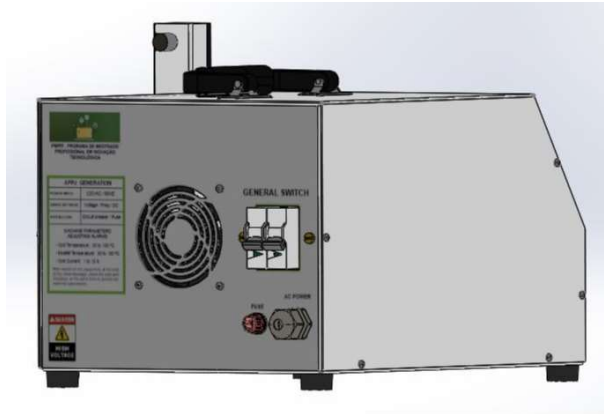
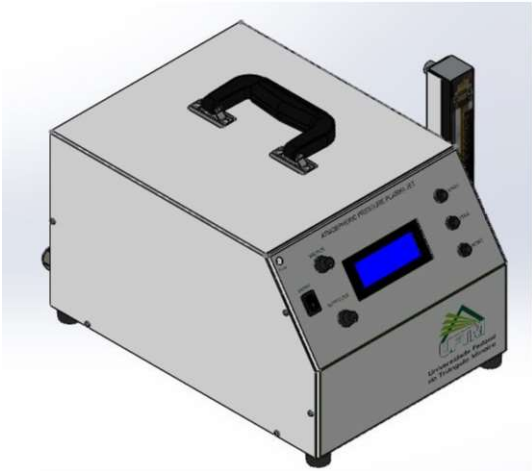


AC POWER

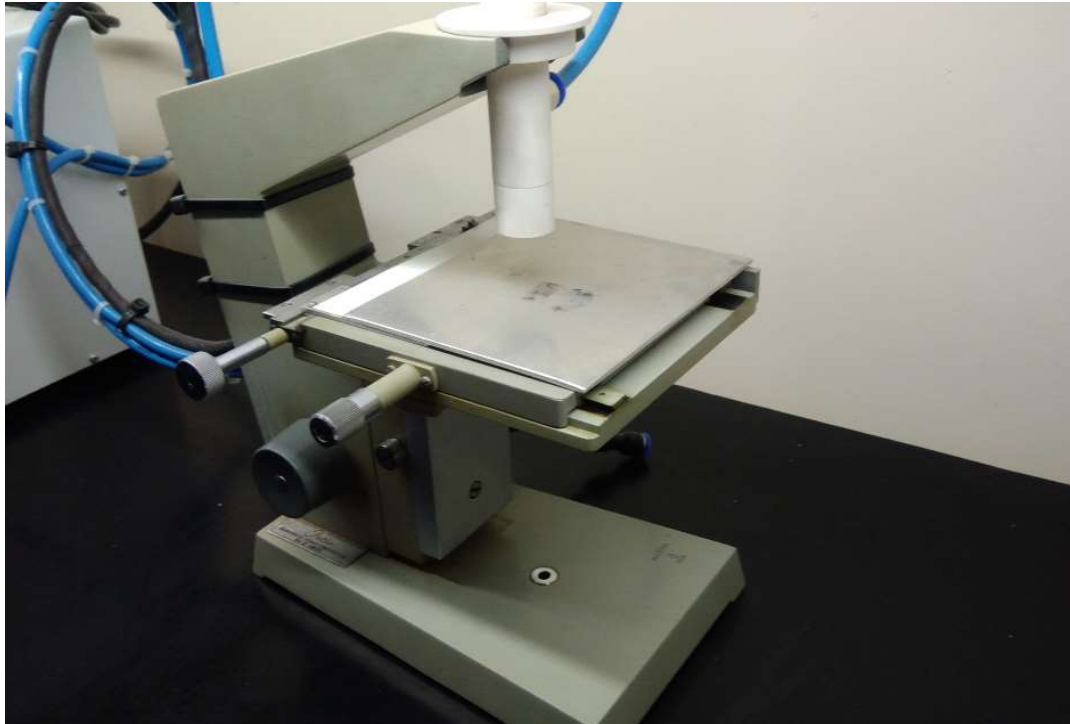
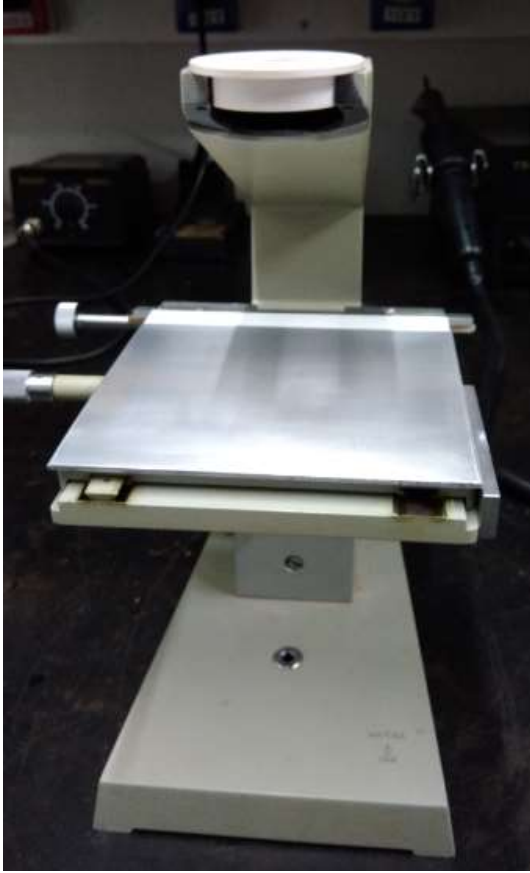
FUSE



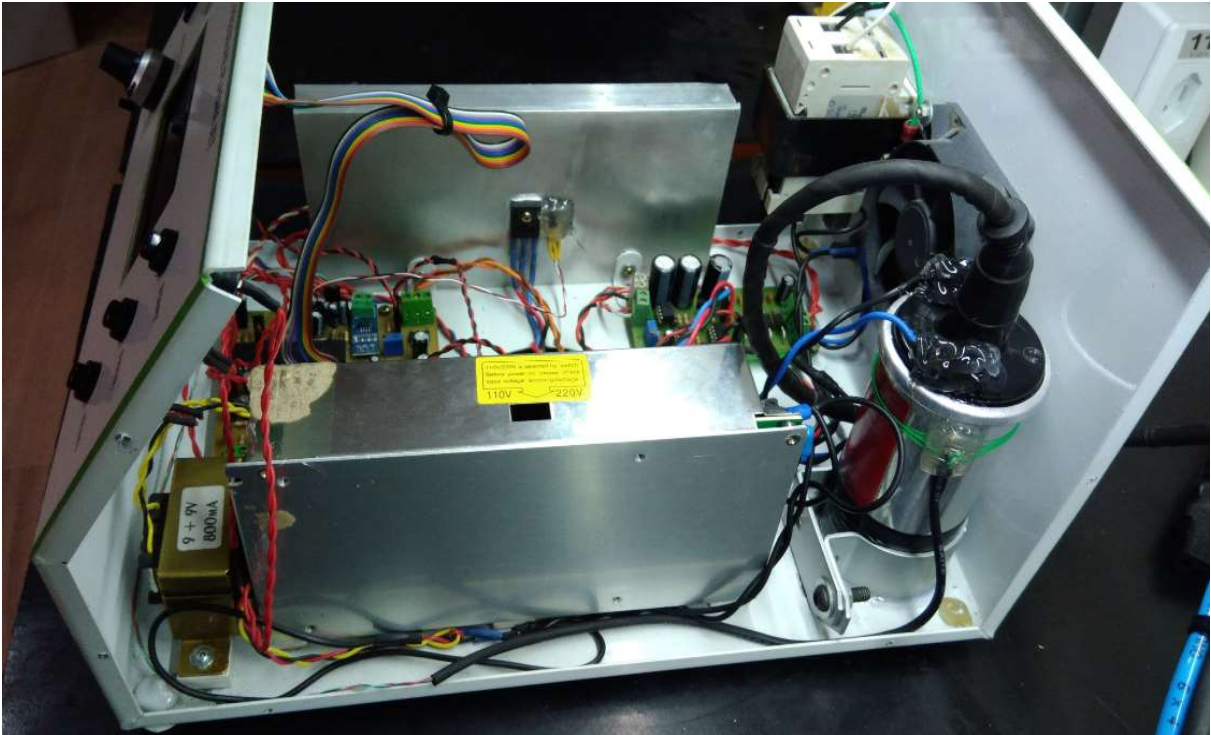
APÊNDICE K – DESENHO 3D MÓDULO DE CONTROLE DO GERADOR DE PLASMA



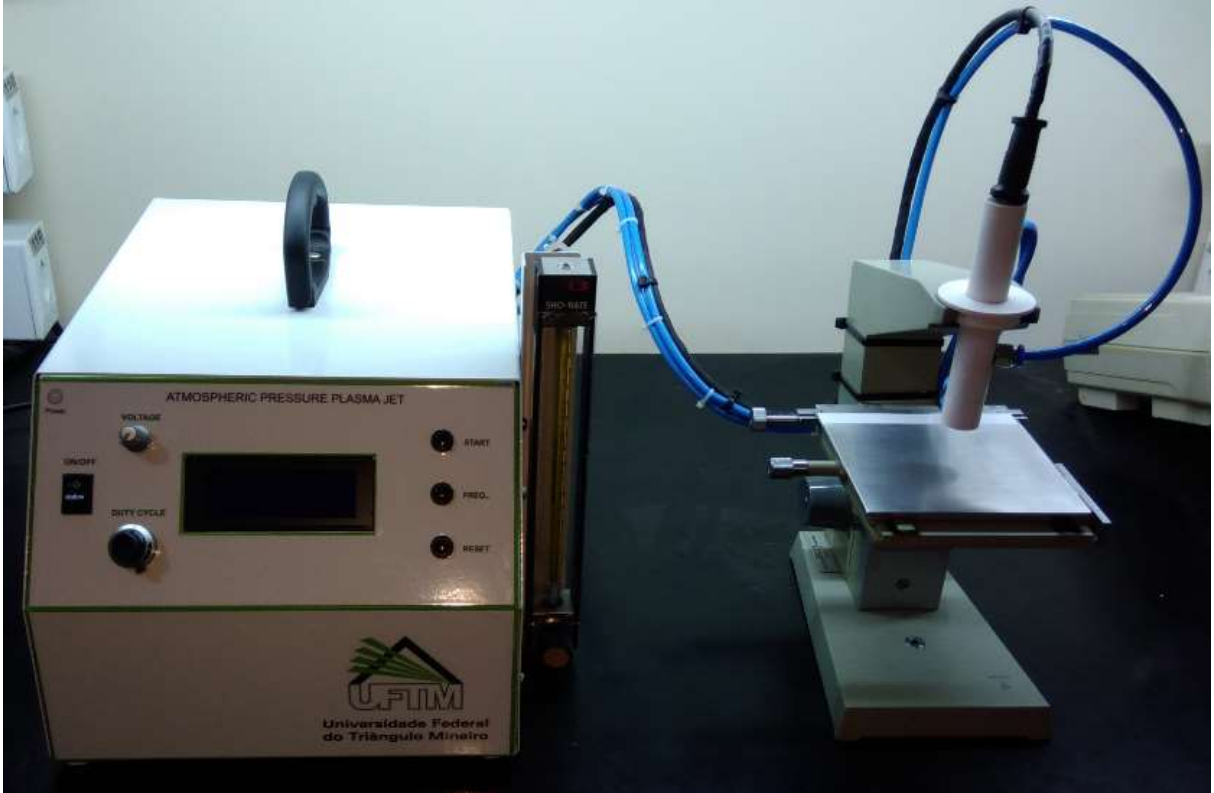
APENDICE L – SUPORTE DO BICO INJETOR E PORTA AMOSTRAS



APÊNDICE M – EQUIPAMENTO FINAL – CONJUNTO COMPLETO







APÊNDICE N – TRATAMENTO DE MATERIAIS – PLASMA C/ HÉLIO E ARGÔNIO



