

GUSTAVO GOMES VASQUES

Caracterização de uma micro pluma de plasma com descarga de argônio

Gustavo Gomes Vasques

Caracterização de uma micro pluma de plasma com descarga de argônio

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Física.

Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama

V335c Vasques, Gustavo Gomes
Caracterização de uma micro pluma de plasma com descarga de argônio / Gustavo Gomes Vasques – Guaratinguetá, 2018.
30 f.: il.
Bibliografia: f. 29-30

Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018.
Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama

1. Plasma (Gases ionizados). 2. Argônio. 3. Descargas luminosas.
I. Título

CDU 533.9

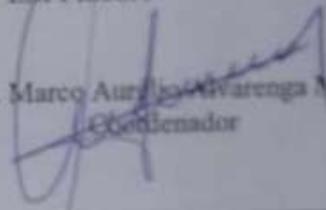
Luciana Máximo

Bibliotecária-CRB-8/3595

GUSTAVO GOMES VASQUES

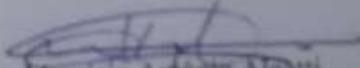
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM FÍSICA"

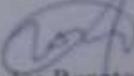
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM FÍSICA


Prof. Dr. Marco Aurélio Alvarenga Monteiro
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. Milton Eiji Kayama
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. Maurício Antônio Algatti
UNESP-FEG


Prof. Dr. Carlos Renato Zacharias
UNESP-FEG

Dezembro 2018

DADOS CURRICULARES

GUSTAVO GOMES VASQUES

NASCIMENTO	12.07.1991 – Suzano / SP
FILIAÇÃO	Afonso Tadeu Vasques Rosemeire Gomes da Silva Vasques
2015/2018	Bacharelado em Física - Graduação Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
2013/2014	Especialização em marketing digital Faculdade Impacta de Tecnologia
2009/2012	Comunicação social – Publicidade e propaganda - graduação Universidade Braz Cubas

Dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

à minha mãe Rosemeire Gomes da Silva Vasques, ao meu pai Afonso Tadeu Vasques e a minha esposa Ericka Louise Talarico Vasques que sempre me incentivaram e foram pacientes comigo.

ao meu orientador, Prof. Dr. Milton Eiji Kayama que sempre me ajudou e me incentivou durante a pesquisa e que sem sua orientação eu não teria aprendido tantas peculiaridades do trabalho de um físico experimental.

ao Prof. Dr. Saulo Henrique Pereira que possibilitou que eu aprendesse um pouco de como é o trabalho de um físico teórico.

aos professores e aos estudantes do grupo de plasma que me ajudaram e me ensinaram muito durante esses anos.

aos meus colegas e professores do departamento de física e química que sempre me acompanharam.

“O cientista é motivado principalmente pela curiosidade e pelo desejo da verdade”

Irving Langmuir

RESUMO

Micro plumas de plasma foram geradas através de um arranjo com uma agulha cirúrgica, um anel e um capilar através de uma Descarga por Barreira Dielétrica (DBD). A luz gerada foi coletada por uma lente e enviada por meio de uma fibra óptica a uma fotomultiplicadora para estudo da emissão espectral integrada. Um espectrômetro foi também usado para analisar as linhas espectrais. A análise da luz integrada mostrou uma emissão contínua de luz sobrepostas a um pico relacionada a projéteis de plasma (“bullets”) emitidas a partir da ponta da agulha. Esta emissão integrada em um semi-ciclo da tensão aplicada mostrou uma intensidade mais elevada em semi-ciclos positivos. Nas descargas com argônio foram observadas linhas do ArI e ArII. Ao longo da pluma de plasma a linha do 727,52 nm do ArI se extinguem à medida que há um aumento progressivo da intensidade da linha 337,64 nm do ArII. Essas medições fornecem um comprimento para a pluma de 11 ± 1 mm. A análise da potência foi efetuada através da corrente em um resistor em série com a descarga. A potência média varia proporcionalmente ao fluxo do gás e diminui para fluxo muito elevado. Tem um valor máximo de $0,92 \pm 0,02$ W e mínimo de $0,72 \pm 0,03$ W. Ao aplicar a pluma de plasma em uma superfície de polietileno de alta densidade, houve uma alteração da energia superficial do material, tornando a superfície hidrofílica. A maior alteração do ângulo de contato foi com a menor potência onde reduziu de $87^\circ \pm 11^\circ$ para $33^\circ \pm 5^\circ$.

PALAVRAS-CHAVE: Plasma. Descarga atmosférica. Potência. Luminosidade integrada.

ABSTRACT

Plasma micro plumes were generated by an experimental arrangement constituted by a surgical needle, a ring and a dielectric tube by a dielectric barrier discharge (DBD). The emitted light was collected with an optical fiber and sent to a photomultiplier to study the integrated luminosity. It was also used a spectrometer to analyze the spectral lines. Analyzing the integrated light emission was possible to see the light peaks related to the plasma bullets emitted by the needle tip. The integrated light in a half-cycle of the applied voltage was greater at the positive ones. About the argon discharges it was observed lines of ArI and ArII. Over the plasma plume the line of 727.52 nm of ArI was extinguished as long as the line of 337.64 nm of ArII was raising its luminosity. Those measurements gave us the length of 11 ± 1 mm of the plasma plume. The power was acquired by measuring the current at a resistor connected in series with the plasma. The average power changes according with the flux of the gas, the power drops as long as the flux raises. Its maximum and minimum is $0,92 \pm 0,02$ W and $0,72 \pm 0,03$ W, respectively. After applying the plasma plume at a high-density polyethylene surface, it was observed an alteration of its surface energy, it has become hydrophilic. The greater change of the contact angle happened with the lowest power, which reduce from $87^\circ \pm 11^\circ$ to $33^\circ \pm 5^\circ$.

KEYWORDS: Plasma. Atmospheric discharge. Power. Integrated luminosity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Quasineutralidade de plasma.....	12
Figura 2 – Esquemas básicos de confinamento de plasma.....	13
Figura 3 – Comparação entre jatos DFE, DBD, DBD-like e SE.....	15
Fotografia 1 – Controlador do fluxo de gás	17
Fotografia 2 – Equipamentos utilizados para o controle da descarga elétrica.....	18
Figura 4 – Resposta espectral da fotomultiplicadora.....	19
Figura 5 – Diagrama da montagem experimental	19
Fotografia 3 – Jato de plasma produzido.....	20
Figura 6 – Curvas de transmissão dos filtros de banda utilizados.....	21
Figura 7 – Comparação entre o sinal obtido sem filtro e com o filtro verde.....	22
Figura 8 – Gráfico Potência x Fluxo	23
Figura 9 – Gráfico comparativo entre a luminosidade nos meio ciclos e a potência	24
Figura 10 – Espectro da pluma de plasma obtida.....	24
Figura 11 – Gráfico da evolução da linha espectral de ArII em 337,64 nm.....	25
Figura 12 – Gráfico da evolução da linha espectral de ArI em 727,52 nm.....	26
Figura 13 – Mudança do ângulo de contato de polietileno após tratamento com o plasma....	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	PLASMA E SUAS APLICAÇÕES	12
2.1	APLICAÇÕES DA FÍSICA DE PLASMAS	13
2.1.1	Fusão termonuclear controlada	13
2.1.2	Gerador magnetohidrodinâmico e plasma de propulsão	14
2.1.3	Jatos de plasma.....	14
3	ESPECTROSCOPIA DE PLASMA.....	16
4	ARRANJO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA	17
4.1	CONTROLE DA PLUMA DE PLASMA	17
4.2	MEDIÇÃO DA PLUMA DE PLASMA	18
4.3	METODOLOGIA	20
5	RESULTADOS E ANÁLISE	22
5.1	ALTERAÇÃO DE MOLHABILIDADE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE	26
6	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS	29
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	30

1 INTRODUÇÃO

O plasma é um gás ionizado que expressa propriedades coletivas. Um tipo de plasma é o de baixa temperatura. Este é parcialmente ionizado e usado no tratamento e modificação de propriedades físicas de superfícies. Toda indústria da microeletrônica utiliza estes gases ionizados na produção de componentes semicondutores por métodos de deposição e remoção de materiais em escala nanométrica. Nestes aplicativos usam-se gases em pressão baixa, na região do ultra vácuo. Ganhou impulso na última década o uso de plasmas não-térmicos gerados em pressão atmosférica. A pressão elevada naturalmente dispensa o sistema de vácuo que leva a uma redução no custo de um equipamento e simplifica sua operação. Esta tecnologia vem sendo utilizada com sucesso na área de superfícies e materiais, e também para tratamento de peles, feridas e desinfecção (Bruggeman, 2013).

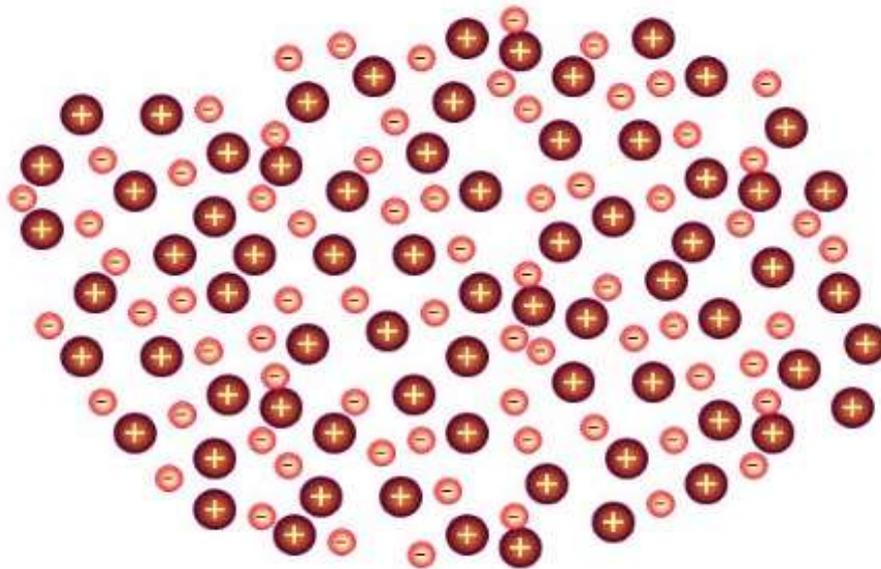
Uma forma de produzir plasmas não térmicos em pressão atmosférica é por descarga entre pequenos eletrodos. São chamadas de micro descargas e assim classificadas se uma de suas dimensões for menor que alguns milímetros. Os micro plasmas produzidos tem temperatura eletrônica mais elevada que em dispositivos semelhantes maiores. Sua densidade de potência é também maior e, portanto, muito adequados para produzir espécies reativas para tratamento de materiais (HONG, 2013). Com um eletrodo no interior de um capilar de vidro e um eletrodo cilíndrico envolvendo o capilar pode-se gerar a ruptura dielétrica entre os eletrodos. Este tipo de descarga tem a denominação ‘dielectric barrier discharge (DBD)’. Com um gás fluindo axialmente desenvolve-se uma pluma de plasma que se estende ao exterior do capilar onde interage com a superfície do material em tratamento (SILVA, 2015).

Neste trabalho foi feita a seguinte divisão: no capítulo 2 é explicado brevemente o que é um plasma e então algumas de suas aplicações mais comuns são apresentadas, onde o maior foco é dado aos jatos de plasma, devido ao tema do trabalho. O capítulo 3 é dedicado apenas a espectroscopia de plasma, desta maneira é possível conhecer a técnica de diagnóstico utilizada. O capítulo 4 se dedica em apresentar quais foram os equipamentos utilizados para gerar o jato de plasma bem como para controlá-lo, além do método utilizado para coletar e analisar os dados. No capítulo 5 os resultados obtidos são apresentados bem como a análise dos mesmos.

2 PLASMA E SUAS APLICAÇÕES

Segundo Chen (1974) o plasma é “um gás quase neutro de partículas neutras e carregadas que apresentam um comportamento coletivo”. Quase neutro significa que a soma das cargas é aproximadamente nula. As partículas interagem via interação coulombiana, ou seja, o efeito de uma carga ocorre via campo coulombiano e assim afeta todas as partículas da sua vizinhança. Daí seu caráter coletivo.

Figura 1 - Sistema quase neutro, onde macroscopicamente o número de partículas positivas é igual ao número de partículas negativas.



Fonte: Reinard Cannon (2016)

O plasma é definido segundo três critérios. O primeiro é o de neutralidade macroscópica que foi explicado anteriormente. O seu segundo se baseia na distância da blindagem de Debye, é a distância em que o efeito coulombiano de uma carga é blindado por cargas de sinal oposto. Como critério, o número de partículas dentro de uma esfera com raio igual à distância de Debye deve ser elevado (BITTENCOURT, 2004).

Seu terceiro critério se baseia na frequência de plasma. Esta é a frequência natural do plasma relacionada ao efeito coletivo no qual as partículas oscilam coletivamente com o intuito de restaurar o equilíbrio macroscópico do plasma após alguma interferência em sua condição de equilíbrio. Assim o tempo de colisão média de elétrons com partículas neutras deve ser muito maior que o período da oscilação natural do plasma.

2.1. APLICAÇÕES DA FÍSICA DE PLASMAS

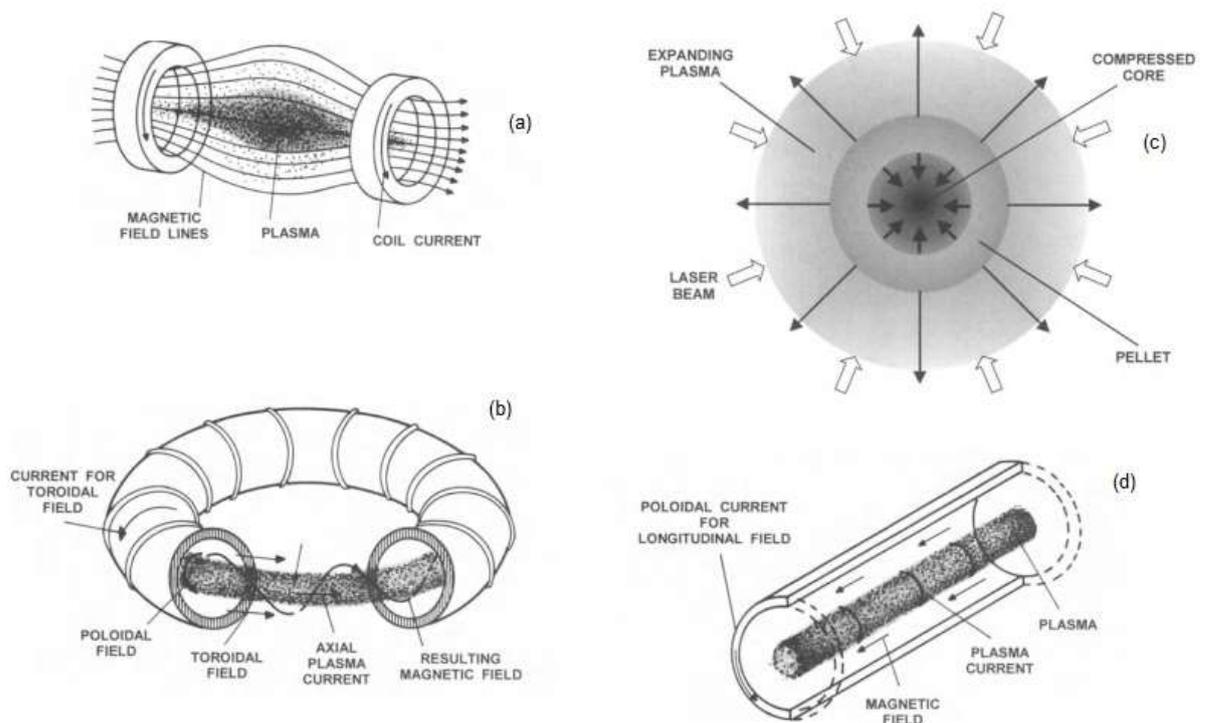
O plasma existe de forma natural, como por exemplo, ventos solares, as auroras austrais e polares e na ionosfera e também podem ser obtidos através de experimentos. Alguns destes serão explicados nesta seção.

2.1.1. Fusão termonuclear controlada

Este é um plasma considerado quente, ou seja, este é um gás completamente ionizado e as partículas que o compõe possuem um grande livre caminho médio. A condição para que haja a ionização completa é que a energia térmica das partículas exceda a energia do íon (ZOHM, 2005).

Comumente estes plasmas são obtidos através de quatro maneiras, sendo elas: espelhos magnéticos (sistemas abertos), toroides (sistemas fechados), dispositivos de theta pinch e laser pulsado (BITTENCOURT, 2004).

Figura 2: Ilustração esquemática mostrando alguns esquemas básicos para o confinamento de plasma com campos magnéticos. (a) sistema de espelhos magnéticos, (b) tokamak, (c) fusão de laser pulsado e (d) theta pinch linear.



Nestes sistemas são gerados campos magnéticos com o intuito de confinar o plasma. Este plasma geralmente é produzido por isótopos de hidrogênio. Na natureza vemos este fenômeno ocorrer em estrelas.

Pesquisas nesta área se dedicam muito ao controle no confinamento do plasma. Um dos problemas de mantê-lo é com as perdas de energia causada pela radiação (predominantemente bremsstrahlung elétron-íon) (BITTENCOURT, 2004).

2.1.2 Gerador magnetoidrodinâmico e plasma de propulsão

O gerador possui um funcionamento no qual um plasma passa com uma certa velocidade por um campo magnético, e através da força de Lorentz os íons deste plasma irão se mover, gerando assim uma densidade de corrente. Desta maneira temos a conversão da energia cinética do plasma em energia elétrica (BITTENCOURT, 2004). A vantagem deste processo vem do fato de não haver a necessidade do ciclo de calor.

A utilização deste gerador propicia a criação de propulsores, os quais precisam além do campo magnético e também um campo elétrico aplicado. Devido ao plasma ser macroscopicamente neutro, para que haja a conservação de momento, um campo elétrico contrário será gerado. Com isto uma aceleração será gerada no sentido oposto ao fluxo do plasma.

2.1.3 Jatos de plasma

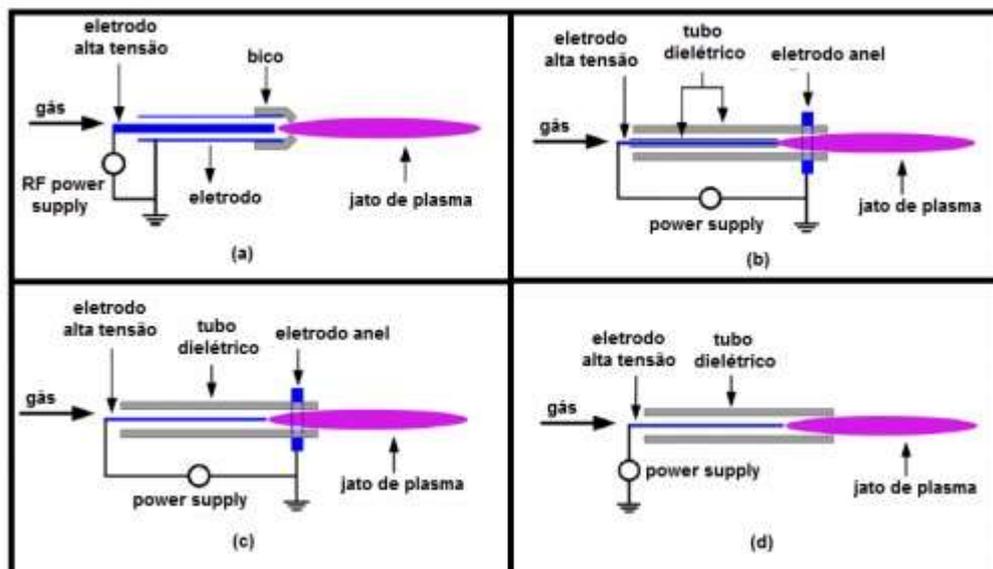
Jatos de plasma vêm sendo amplamente estudados devido ao grande número de aplicações. Com eles é possível efetuar modificações de superfícies de polímeros, cura de feridas e também inativação de biomoléculas e bactérias sem a utilização de uma câmara (WALSH, 2008).

Este tipo de plasma é produzido à pressão atmosférica e possui diversas maneiras de serem construídas. Uma característica comum é a separação espacial do gás inerte da descarga do reagente químico que será utilizado para efetuar um possível tratamento (WALSH, 2008).

Segundo LU (2012) há quatro maneiras diferentes de gerar um jato de plasma utilizando gases nobres (Figura 3). O primeiro são jatos de eletrodo sem dielétrico (DFE) que são produzidos com radio frequências, que geram arcos antes da condição de operação estável ser encontrada. Eles possuem uma grande potência o que faz com que sua temperatura seja alta e, portanto, inadequados para aplicação biomédica, e apropriados para o tratamento de materiais.

O segundo tipo de jato é o de descarga de barreira dielétrica (DBD) que consiste basicamente de dois eletrodos com um ou dois dielétricos entre eles um eletrodo é aterrado e o outro recebe uma alta tensão. Seu funcionamento pode ser tanto por uma fonte de corrente alternada ou então por corrente pulsada. Estes jatos geralmente possuem uma baixa temperatura, permitindo que seja utilizado para aplicações médicas. Além disso não há risco da criação de arcos devido ao dielétrico. Muito parecido com o DBD há os terceiros jatos que são do tipo DBD (DBD-like). Eles possuem uma configuração muito parecida com as descargas de barreira dielétrica, porém há uma diferença no posicionamento dos eletrodos, o que torna possível a criação de arcos. O quarto são os jatos de um único eletrodo (SE) onde um resistor e um capacitor são inseridos no sistema para controlar a corrente e a tensão da descarga. Segundo LU (2012) estes jatos podem ser tocados sem o risco de ocorrer ferimentos, o que os torna uma boa escolha para aplicações médicas.

Figura 3: Maneiras de se criar jatos de plasma (a) DFE, (b) DBD, (c) DBD-like e (d) SE.



Fonte: LU (2012)

3. ESPECTROSCOPIA DE PLASMA

Devido ao plasma emitir radiação eletromagnética uma das técnicas mais utilizadas para sua caracterização são as de análise do espectro de emissão. Com a análise do espectro é possível obter informações relacionadas a densidade de elétrons e de íons, grau de ionização, concentração relativa de espécies constituintes do plasma, bem como suas funções distribuição de velocidade (KUNZE, 2009). Estas informações também podem ser obtidas ao combinar técnicas como por absorção radiativa do plasma e também por espalhamento de luz.

A região do espectro de emissão a ser coletada depende do método que será utilizado. Por exemplo, na região do visível (380 – 750 nm) praticamente não há perda para a atmosfera. Na região do infravermelho é necessário tomar cuidado com as possíveis absorções de radiação das moléculas de água e de dióxido de carbono. Se quisermos efetuar uma análise da região do ultravioleta (abaixo de 200 nm) a coleta do espectro deve ser feita com mais cuidado, devido ao fato da atmosfera absorver a radiação eletromagnética (KUNZE, 2009).

Os instrumentos espectroscópicos são compostos geralmente de elementos dispersivos (prismas, grades, cristais e interferômetros), janelas, filtros, espelhos e detectores para captar, podendo ser: detectores foto emissivos (fotocélulas e fotomultiplicadoras), detectores semicondutores (fotocondutores e fotoemissores) e detectores de fotoionização (KUNZE, 2009). A escolha do sistema de espectroscópico é regida pelos aspectos que serão estudados, tais como a região do espectro que será estudada e a resolução desejada das linhas espectrais. No presente trabalho foram utilizados filtros de absorção para algumas áreas do espectro visível e uma fotomultiplicadora para se fazer uma análise de baixa resolução do espectro, e posteriormente uma análise com um espectrômetro acoplado a um sistema externo de lentes para ser possível verificar as linhas espectrais do plasma, bem como o quão ionizado estava.

4. ARRANJO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

Com relação ao equipamento utilizado podemos separá-los em duas partes, os relacionados a geração da pluma (controle do fluxo de gás e da tensão aplicada) e a outra relacionada a medição dos parâmetros da pluma.

4.1. CONTROLE DA PLUMA DE PLASMA

Estes equipamentos estão relacionados ao fluxo de gás e ao controle da descarga elétrica. Para efetuar o controle da vazão de gás utilizamos dois fluxômetros de massa (Horiba N100) controlados e alimentados pelo xPH-100 Power Hub Basic da Horiba. Na utilização dele é necessário tomar cuidado com o tipo de gás ao qual o instrumento está calibrado, pois cada gás possui um fator de conversão particular. Neste trabalho utilizamos somente argônio. Os gases da calibração escolhidos foram argônio e hélio, pelo fato de seus fatores de conversão serem muito próximos (1,39 e 1,45 respectivamente) (MKS, 2018).

Fotografia 1 – Controlado do fluxo dos gases.



Fonte: Simplex connect.

Com relação à descarga elétrica foi utilizada uma fonte regulada Lab0 FR 25/50. O sinal é então amplificado pelos transformadores em cascata da Miniplus 6 da GBS Eletronik e a da tensão elétrica aplicada é feita com a fonte PS-1440 da Voltcraft. Para o controle da frequência utilizamos o gerador de funções Rigol DG-1012. Na figura abaixo é possível visualizar a montagem do sistema de alimentação.

Fotografia 2: Mecanismo para o controle da descarga elétrica.

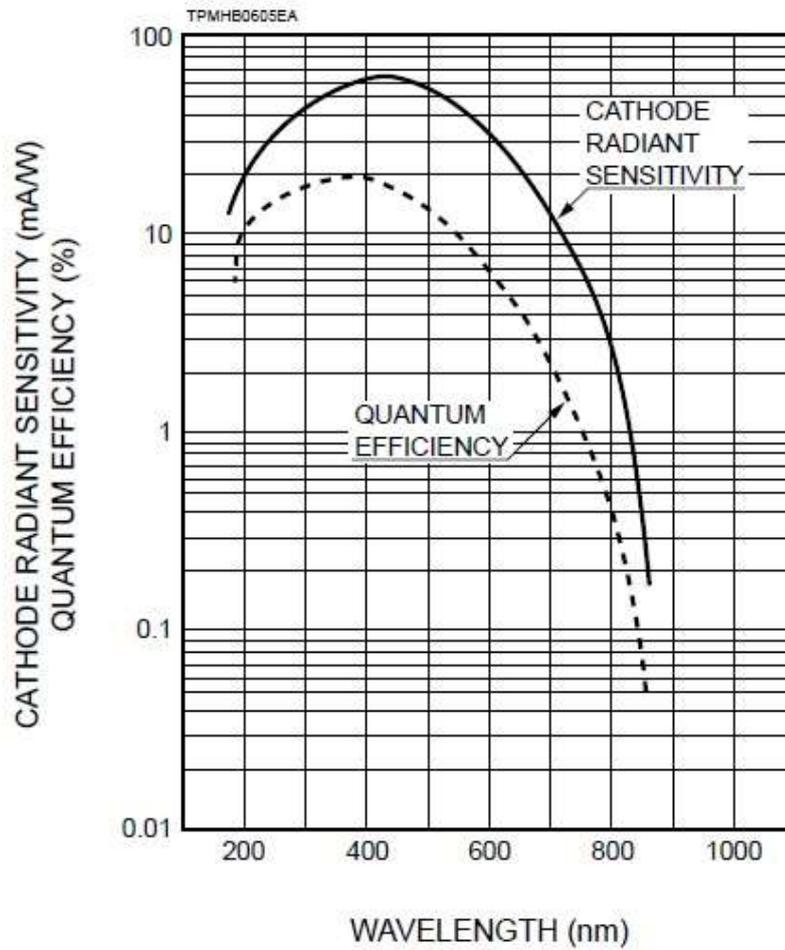


Fonte: Produção do próprio autor.

4.2. MEDIÇÃO DA PLUMA DE PLASMA

Para caracterizar a pluma do plasma utilizamos primeiramente a fotomultiplicadora Hamamatsu R374 devido a boa resposta na região do ultravioleta visível.

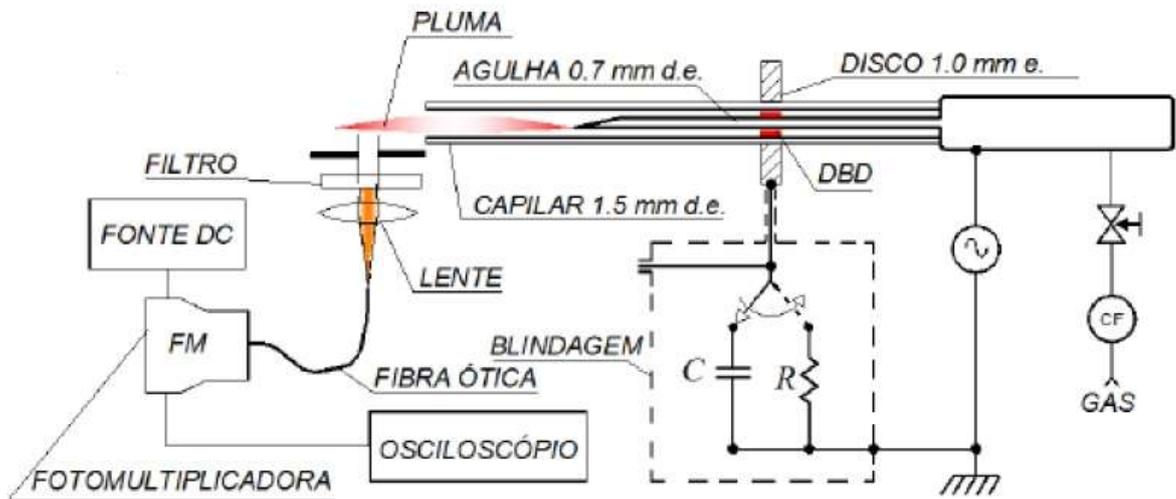
Figura 4 – Resposta espectral da fotomultiplicadora.



Fonte: Hamamatsu (1999)

O sinal da fotomultiplicadora (CH3) é enviado para o osciloscópio TDS 2024B da Tektronix, juntamente com o sinal coletado do divisor de tensão (CH2) e do sinal proveniente do gerador de funções (CH1).

Figura 5: Diagrama da montagem experimental para a coleta de luz.

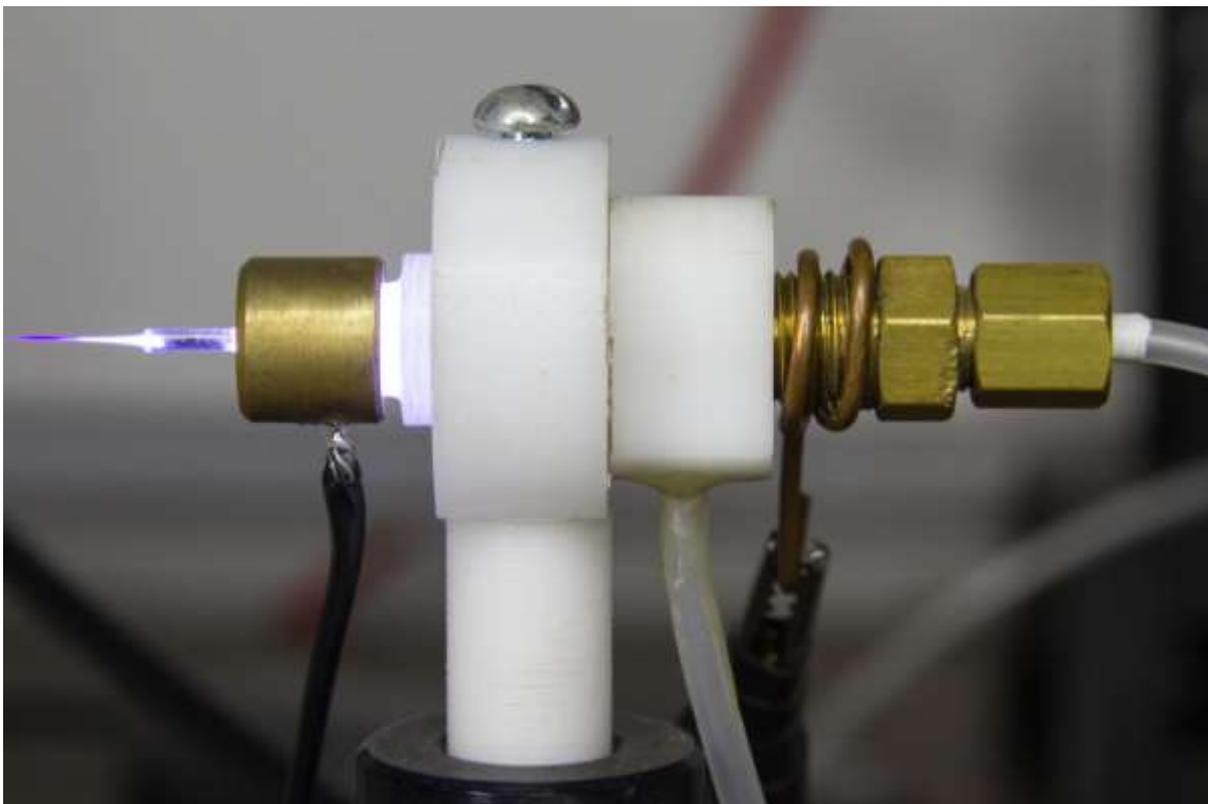


Fonte: Produção do próprio autor.

4.3. METODOLOGIA

Em uma primeira etapa foram feitas as medições com a utilização de filtros de banda e da fotomultiplicadora. A vazão de argônio foi sendo alterada de $0,20 \pm 0,01$ L/min até $1,00 \pm 0,01$ L/min no capilar e na agulha de $0,20 \pm 0,01$ L/min até $1,00 \pm 0,01$ L/min (passo de $0,20$ L/min), com a tensão aplicada fixa em $4,8$ kV pico-a-pico e a frequência em 37 kHz foi possível gerar uma micropluma de plasma estável. Após isto o cabo óptico foi posicionado de uma maneira que fosse possível captar toda luz emitida pelo plasma.

Fotografia 3 – Jato de plasma produzido no experimento.

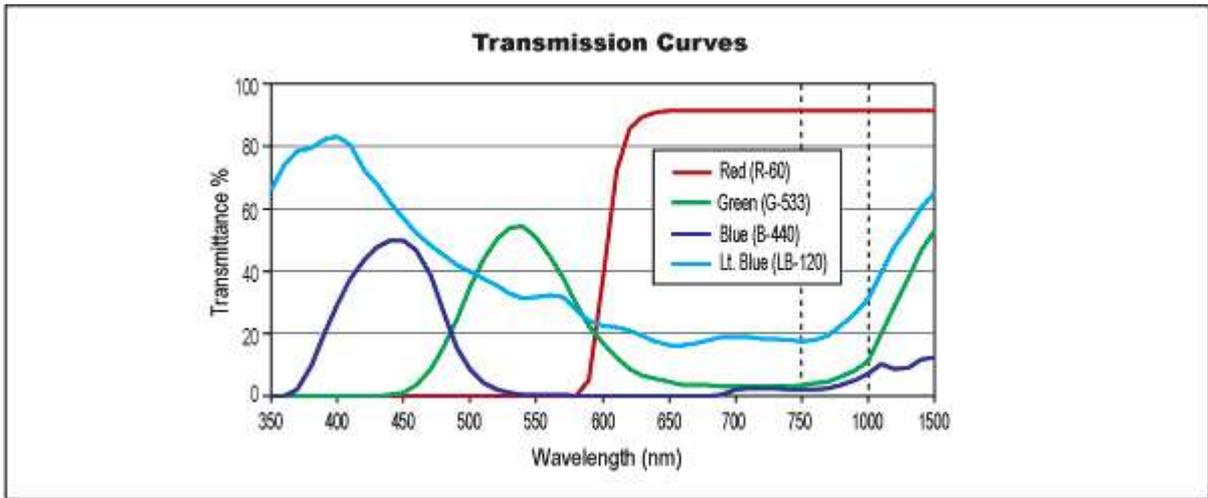


Fonte: Produção do próprio autor.

No canal 1 do osciloscópio obtemos o sinal que está gerando o plasma. No canal 2 é obtida a tensão que passa pelo resistor indicado no diagrama experimental (figura 5). Com ele foi possível determinar a potência do plasma. O sinal coletado pela fotomultiplicadora foi enviado para o canal 3.

Primeiramente foram coletados os sinais da fotomultiplicadora sem filtros. Após isto utilizamos os filtros de absorção nas faixas do verde, azul e vermelho. Assim pudemos fazer uma espectroscopia de baixa resolução. Os sinais foram integrados no tempo, durante meio-semi-ciclo da tensão, pelo método do paralelogramo, e com isto foi possível determinar com qual é a vazão do gás no capilar e na agulha que apresenta maior luminosidade e maior potência.

Figura 6 – Curvas de transmissão dos filtros de banda utilizados.



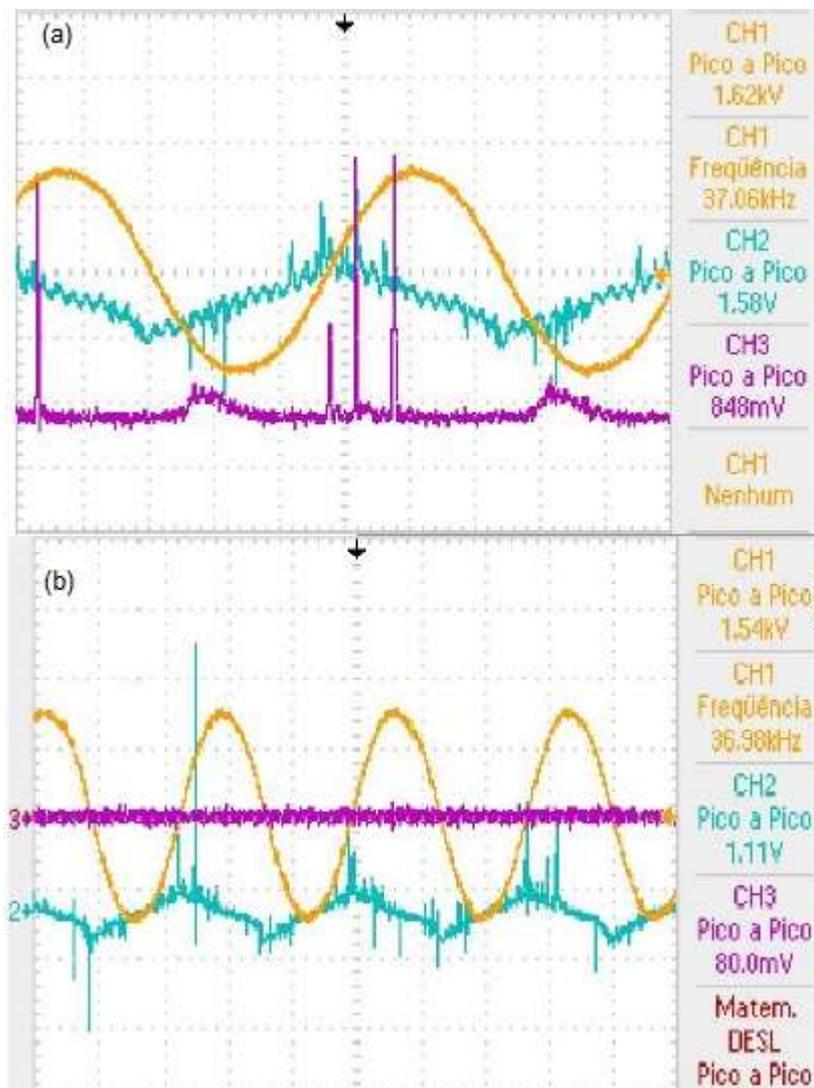
Fonte: Edmund optics (2018)

Após esta etapa, fixamos o fluxo de argônio que gerou o jato de plasma com a maior luminosidade e passamos a utilizar o espectrômetro. Ao acoplar a fibra óptica do aparelho a um sistema de lentes montado no próprio laboratório pudemos focar pontos específicos do jato e com isto “varremos” toda a extensão da micro pluma, desde o ponto em que era gerada até o ponto no qual não era possível detectar mais nenhum sinal; assim conseguimos observar a região de maior ionização.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

No sinal da fotomultiplicadora foi possível observar uma série de picos, com maior predominância nos meio ciclos positivos da tensão aplicada (figura 7a). Mesmo com a fotomultiplicadora com a máxima sensibilidade a luz, foi possível apenas coletar dados quando não havia filtro e também com o filtro vermelho. Ao utilizar o filtro azul ou o verde nenhum sinal foi captado (figura 7b).

Figura 7 – (a) é um sinal típico coletado pelo osciloscópio sem filtro e (b) coletado com o uso do filtro verde, o canal 3 (CH3) é o sinal do que foi obtido com a fotomultiplicadora.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao efetuar a integração numérica dos dados referentes da luminosidade foi verificado que há uma maior intensidade luminosa nos meio ciclos positivos, isso implica em

possuirmos uma maior ionização no argônio nestes intervalos. Este fenômeno é devido ao fato de haver uma deposição de elétrons na parede do dielétrico que acaba reduzindo a corrente de descarga nos meio ciclos negativos subsequentes aos positivos.

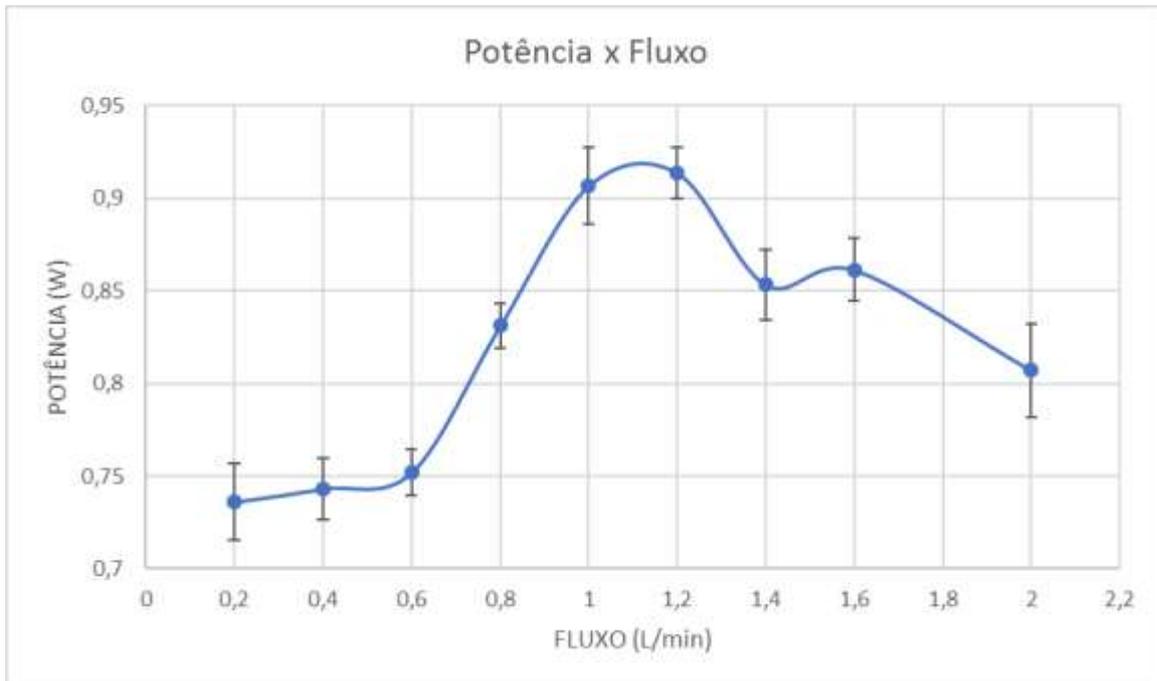
Antes da utilização do espectrômetro foi feita uma análise da potência com relação ao fluxo de argônio, bem como uma relação com a luminosidade, com base na queda de tensão no resistor e da frequência aplicada (figura 8).

Para a obtenção da potência utilizamos:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^t (v - v_R) i dt$$

Onde T é o período, v é a tensão aplicada, v_R é a tensão no resistor R , $i = R/v_R$ é a corrente e t é o tempo, $v \gg v_R$, v é da ordem de kV e v_R de V (figura 7).

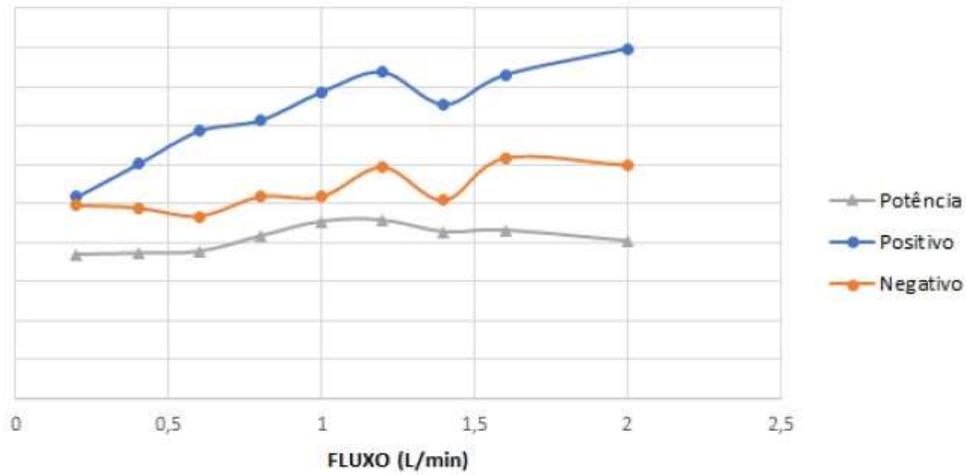
Figura 8 – Relação da potência com relação ao fluxo total de argônio.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao comparar a luminosidade integrada com a potência, é possível observar que a luminosidade integrada cresce juntamente com o crescimento da potência, até alcançarem seus máximos por volta do fluxo de $1,20 \pm 0,01$ L/min, após isto ambas grandezas diminuem, conforme pode ser observado na figura 9.

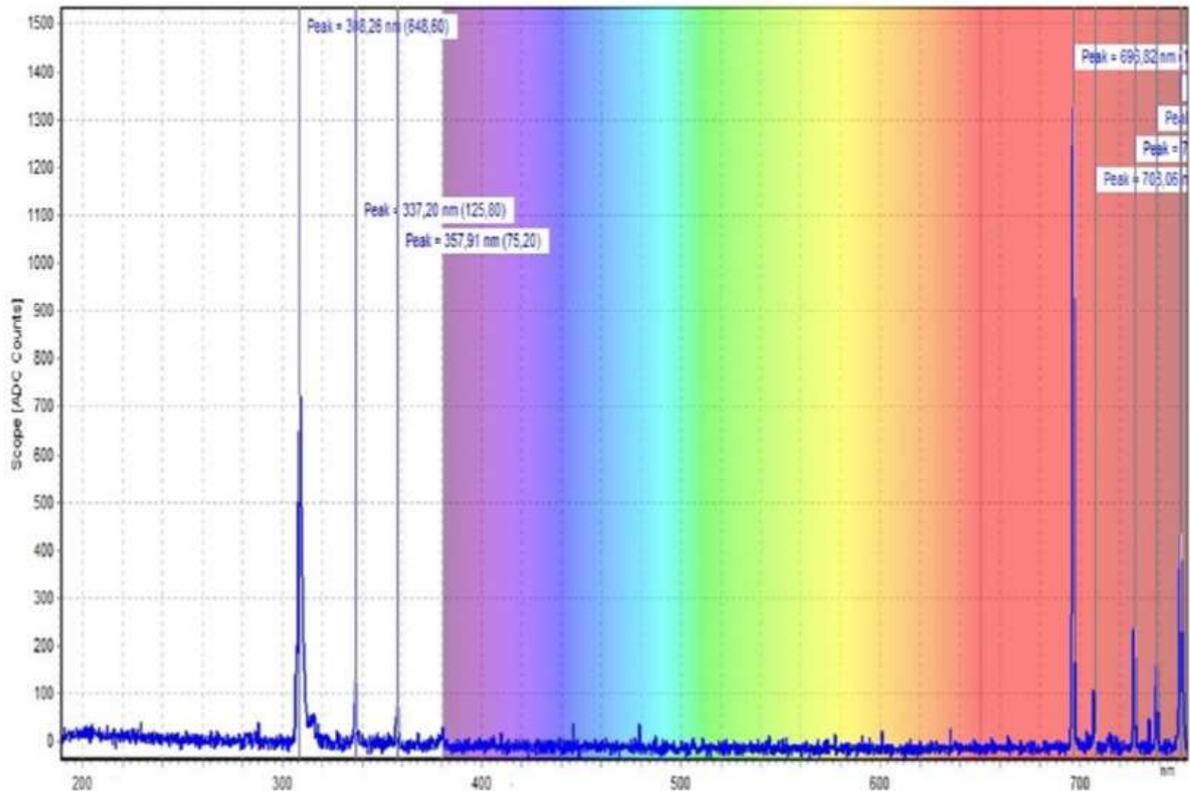
Figura 9 – Comparativo entre o comportamento da luminosidade integrada nos meio ciclos positivos e negativos com a potência (as unidades na ordenada são arbitrárias).



Fonte: Produção do próprio autor.

No momento em que o espectrômetro foi utilizado para fazermos um estudo sobre a evolução das linhas espectrais foi possível descobrir o motivo de não termos coletado sinal algum ao utilizarmos o filtro verde ou o azul.

Figura 10 – Espectro de emissão do jato de plasma com a região do espectro visível separada.

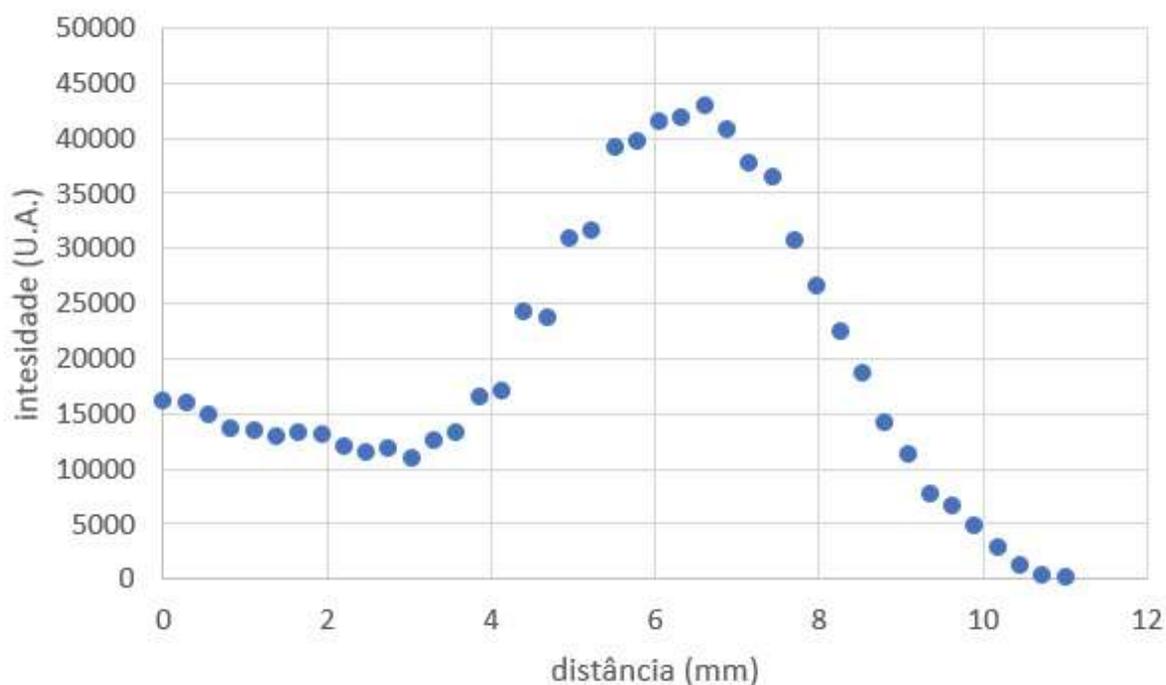


Fonte: Produção do próprio autor.

Há uma elevada intensidade de linhas de ArI (átomo de argônio não ionizado) na faixa do vermelho. As linhas presentes na região do ultravioleta são correspondentes a ArII (argônio ionizado uma vez) que são correspondentes a uma faixa na qual a fotomultiplicadora não possui uma boa sensibilidade.

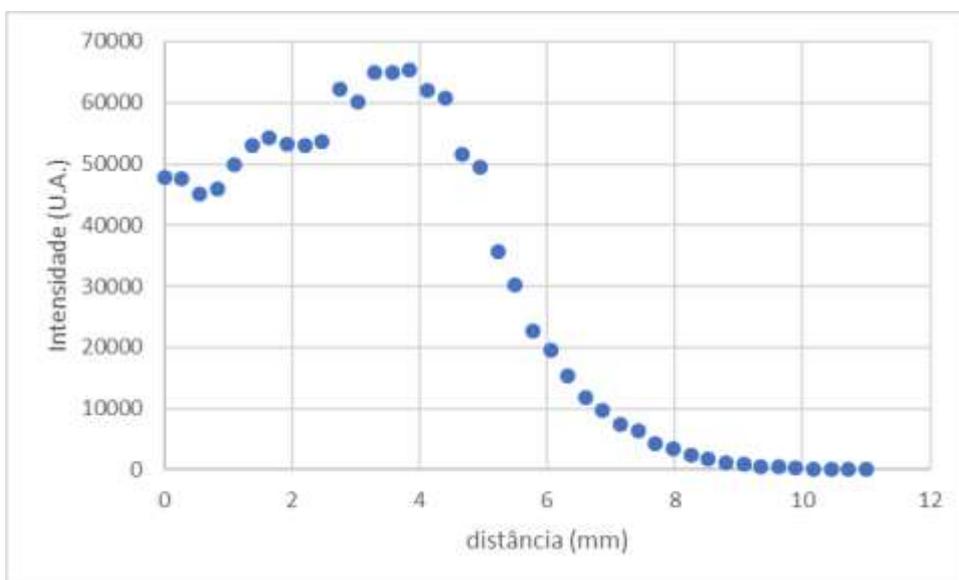
Ao analisar os dados coletados do espectrômetro, varrendo a coleta da luz desde o fim do capilar até a posição na qual o espectrômetro não conseguia coletar mais nenhuma informação, verificamos que a evolução das linhas espectrais da primeira ionização apresenta o mesmo comportamento. Desta forma foi constatado que a região onde há maior ionização é de 6,0 a 6,6 mm após o fim do capilar. Portanto ao se tratar um substrato esta é a região de maior interesse.

Figura 11 – Evolução da linha espectral de 337,64 nm do ArII. A distância do eixo horizontal tem como 0 o fim do capilar, e seu crescimento é no sentido da ponta da pluma do plasma (ver figura 5).



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 12 – Evolução da linha espectral de 727,52 nm do ArI. A distância do eixo horizontal tem como 0 o fim do capilar, e seu crescimento é no sentido da ponta da pluma do plasma (ver figura 5).



Fonte: Produção do próprio autor.

5.1. ALTERAÇÃO DE MOLHABILIDADE DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE.

Com o intuito de verificar como a potência do jato de plasma produzido neste trabalho modificaria a uma superfície com diferentes potências foi decidido efetuar o tratamento de polietileno de alta densidade.

Os parâmetros escolhidos foram de acordo com os dados da figura 8, onde para verificar o comportamento com a menor potência foi escolhido o fluxo de $0,60 \pm 0,01$ L/min, $2,00$ L/min para potência intermediária e $1,20 \pm 0,01$ L/min para a maior potência.

Foi possível observar que quanto maior a potência menor foi a alteração do ângulo de contato da superfície, as alterações médias foram: $28^\circ \pm 7^\circ$ para $1,20 \pm 0,01$ L/min, $41^\circ \pm 10^\circ$ para $2,00 \pm 0,01$ L/min e $54^\circ \pm 8^\circ$ para $0,60 \pm 0,01$ L/min. Todas as amostras ficaram expostas à pluma de plasma por 10 segundos.

Figura 13 – Alteração do ângulo de contato do jato de plasma com $1,20 \pm 0,01$ L/min, cima (antes do tratamento), baixo (após o tratamento).



Fonte: Produção do próprio autor.

6. CONCLUSÃO

Ao analisar a potência do jato de plasma foi possível verificar que o fluxo que apresenta a maior potência é entre $1,00 \pm 0,01$ L/min e $1,20 \pm 0,01$ L/min, conseqüentemente é o fluxo que apresenta maior ionização. Após este ponto ser atingido a potência passa a diminuir (figura 8). Com este parâmetro definido é possível obter maior eficiência do gás utilizado. Além disso, é um indicador de que é necessário aumentar a energia inserida no sistema para que se possua maior ionização do gás, pois a queda na luminosidade a partir do ponto de maior potência indica que há mais gás sendo injetado do que é possível ser ionizado com a energia dada (figura 9).

Com a análise da luminosidade, verificamos que entre $6,0 \pm 0,2$ mm e $6,6 \pm 0,2$ mm de distância do fim do capilar possuímos as linhas de ArII com maior intensidade, após este ponto a começam a diminuir, até que da distância de $11,0 \pm 0,2$ mm não há mais linhas de ArII indicando que não há mais ionização do gás.

Na aplicação do jato de plasma para o tratamento de uma superfície de polietileno de alta densidade foi observado que houve uma redução de seu ângulo de contato, ou seja, a superfície tornou-se hidrofílica. O efeito é dependente da potência do gás, foi observado que quanto menor a potência, maior é a alteração do ângulo, neste caso a maior mudança do ângulo de contato foi com a menor potência, onde a redução foi de $87^\circ \pm 11^\circ$ para $33^\circ \pm 5^\circ$ com o fluxo de $0,60 \pm 0,01$ L/min. A maior potência, em $1,20 \pm 0,01$ L/min apresentou uma redução de $69^\circ \pm 7^\circ$ para $41^\circ \pm 10^\circ$.

O trabalho aqui apresentado se mostra necessário a ser realizado de modo preliminar ao tratamento de superfícies via jatos de plasma, pois ao analisar a influência do fluxo na potência do jato, bem como a evolução das linhas espectrais é possível efetuar tratamentos de maneira mais eficiente e também poder prever possíveis resultados. Por exemplo, a micropluma de plasma estudada neste trabalho não possui uma potência elevada ($0,92 \pm 0,02$ W sendo o máximo da potência), ou seja, não seria possível efetuar um tratamento de uma superfície polimérica com o intuito de degradar as ligações moleculares, porém é possível efetuar a deposição de algum elemento, ou então alterar as propriedades físicas de sua superfície.

REFERÊNCIAS

- BITTENCOURT, A. J. **Fundamentals of plasma physics**. Nova Iorque: Ed. Springer, 2004. 679 p.
- BRUGGEMAN, P; BRANDENBURG, R. Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics. **Journal of physics D: Applied Physics**, Londres, 2013.
- CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. New York; London: Plenum Press, 1990. 421 p.
- EDMUND – EDMUND OPTICS. **Mounted color filters**. Disponível em: <<https://www.edmundoptics.com/f/Mounted-Color-Filters/12490/>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- HAMAMATSU. **Fotomultiplier tube R374**. Disponível em: <https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R374_TPMH1255E.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2017.
- HONG, Y. et al. Low temperature air plasma jet generated by syringe needle-ring electrodes dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. **Thin solid films**, Illinois, v. 548 p. 470-474. dez. 2013
- KUNZE, H. J. **Introduction to plasma spectroscopy**. Berlin: Springer, 2009. 242 p.
- LU, X. On non-equilibrium atmospheric pressure plasma jets and plasma bullet. In: ANNUAL GASEOUS ELECTRONICS CONFERENCE, 65., Austin, 2012. **Proceedings...** Austin: American physical society, 2012.
- MKS. **Gas correction factors for thermal-bases mass flow controllers**. Disponível em: <<https://www.mksinst.com/docs/ur/MFCGasCorrection.aspx>>. Acesso em: 07 ago. 2018.
- NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDART AND TECHNOLOGY. **Argon spectral lines**. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/cgi-bin/ASD/ie.pl>>. Acesso em: 20 out. 2018.
- SILVA, J. L. **Desenvolvimento e aplicação de microplumas para o tratamento de politereftalato de etileno (PET)**. 2015. 72 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- WALSH, J. L. Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets. **Applied Physics Letters**. set. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.2982497>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- ZOHM, H. Physics of “hot” plasmas. In: DINKLAGE, A. et al. **Plasma physics: confinement, transport and collective effects**. Berlin: Springer, 2005. 496 p.

BIBLIOGRAFICA CONSULTADA

ASHPIS, D. E. et al. **Progress toward accurate measurements of power consumptions of DBD Plasma Actuators.** 2012. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120009957.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2018.

FLAM, D. L. **Plasma diagnostics discharge parameters and chemistry.** Londres: Academic Press, INC, 1989. 456 p.

GRIEM, H. R. **Principles of plasma spectroscopy.** Cambridge: Cambridge Press, 2005. 366 p.

LOCHTE-HOLTGREVEN, W. **Plasma diagnostics.** Nova Iorque: North Holland, 1968. 930 p.

KAYAMA, M. E. et al. Breakdown mechanism in atmospheric micro plumes generated by needle-disk electrodes with borosilicate and Ar insulation. **IEEE Transactions on plasma science.** v. 45 p. 843-848. abr. 2017. Disponível em: <10.1109/TPS.2017.2684622>. Acesso em: 10 dez. 2018.

KUNZE, H. J. Plasma diagnostics. In: DINKLAGE, A. et al. **Plasma physics: confinement, transport and collective effects.** Berlin: Springer.2005. 496 p.

INAGAKI, N. **Plasma surface modification and plasma polymerization.** Lancaster: Technomic, 1996. 265 p.

MEICHSNER, J. Low temperature plasma. In: DINKLAGE, A. et al. **Plasma physics: confinement, transport and collective effects.** Berlin: Springer, 2005. 496 p.