

Dissertação apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Física de Plasmas.

**Gabriel de Almeida Filgueira**

**ESTUDO DO EFEITO DA ÁGUA ATIVADA POR PLASMA DE  
ARCO DESLIZANTE SOBRE A GERMINAÇÃO DE  
SEMENTES E CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:

*Argemiro Soares da Silva*

---

Prof. Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho  
Orientador

*Rodrigo S. Pessoa*

---

Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa  
Coorientador

---

Prof. Dra. Emília Villani  
Pró-Reitora de Pós-Graduação

Campo Montenegro  
São José dos Campos, SP – Brasil  
2023

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)****Divisão de Informação e Documentação**

Filgueira, Gabriel de Almeida

Estudo do efeito da água ativada por plasma de arco deslizante sobre a germinação de sementes e crescimento de plântulas. / Gabriel de Almeida Filgueira.

São José dos Campos, 2023.

108f

Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Física de Plasmas – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2023. Orientadores: Prof. Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho e Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa

1. Processamento de materiais à plasma. 2. Física de plasmas. 3. Química de plasmas 4. Agricultura 5. Físico-química. 6. Física. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

Filgueira, Gabriel de Almeida. **Estudo do efeito da água ativada por plasma de arco deslizante sobre a germinação de sementes e crescimento de plântulas**. 2023. 108f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2023

**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Gabriel de Almeida Filgueira

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo do efeito da água ativada por plasma de arco deslizante sobre a germinação de sementes e crescimento de plântulas.

TIPO DE TRABALHO /ANO: Dissertação/2023

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta dissertação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização (do autor).

---

Gabriel de Almeida Filgueira

Av. Dr. Néelson d'Ávila, 1875, Jardim São Dimas

12245-030, São José dos Campos - SP

# **ESTUDO DO EFEITO DA ÁGUA ATIVADA POR PLASMA DE ARCO DESLIZANTE SOBRE A GERMINAÇÃO DE SEMENTES E CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS**

**Gabriel de Almeida Filgueira**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Douglas Marcel Gonçalves Leite	Presidente	- ITA
Prof. Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho	Orientador	- ITA
Prof. Dr. Rodrigo Sávio Pessoa	Coorientador	- ITA
Prof. Dr. Gilberto Petraconi Filho	Interno	- ITA
Prof. Dr. Konstantin Georgiev Kostov	Externo	- UNESP

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar, eu agradeço a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada de pesquisa científica.

À minha família pelo apoio, compreensão, palavras de encorajamento e paciência durante os momentos de dedicação intensa.

Aos meus orientadores de mestrado, Dr. Argemiro Soares da Silva Sobrinho e Dr. Rodrigo Sávio Pessoa, por suas valiosas orientações e vasta experiência na área de Física de Plasmas. Suas contribuições foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador da graduação, Dr. Roberto Katsuhiko Yamamoto, pelas orientações no meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) como requisito para concluir minha graduação em Microeletrônica pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-SP). Sua recomendação foi extremamente importante para eu iniciar o programa de mestrado para aprimorar os conhecimentos na Área de Plasma e suas Aplicações Tecnológicas no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).

A todos os pesquisadores, profissionais e colegas do ITA e Laboratório de Plasma e Processos (LPP) que participaram no desenvolvimento deste trabalho de forma direta ou indireta.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil) pelo apoio financeiro.

“Qualquer processo, por mais eficiente que seja, sempre pode ser melhorado.”  
Peter Drucker.

## RESUMO

A tecnologia de plasma não-térmico tem sido amplamente demandada nas áreas da saúde e agricultura devido a sua capacidade de processamento de materiais através de reações físico-químicas. Na agricultura, as sementes podem ser tratadas com plasma de forma direta ou indireta. Ambas as formas tendem a provocar um efeito sinérgico das espécies reativas oxigenadas e nitrogenadas (RONS) sobre as sementes. Devido à alta demanda de publicações científicas associadas ao tratamento indireto das sementes por meio da água ativada por plasma, este trabalho se propôs a estudar o efeito da água de torneira ativada por plasma (PATW) de arco deslizante (30,93 W) sobre a germinação de lentilhas e o crescimento inicial de suas plântulas. A PATW variou em seus parâmetros físico-químicos durante o processo de ativação, atingindo os valores de pH-3,66, ORP-181,0 mV; concentrações estimadas (mg/L) dos íons nitrito ( $\text{NO}_2^-$ )-37,47 e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )-27,26; além da eficiência energética das RONS de  $7,98 \cdot 10^{-3}$  mol/kWh após 180 minutos de ativação de amostras retiradas do volume de 250 ml. A partir da embebição das sementes, pôde-se notar, qualitativamente, a formação de granulações mais espaçadas e a presença de grupos nitrogenados mais significativa sobre as lentilhas embebidas em PATW. A taxa de absorção pelas sementes de lentilhas embebidas em água de torneira foi de 0,977 (Controle, pH-6,68) e 0,978 em PATW (pH-5,27 e pH-4,00). Após 7 dias de germinação, as amostras de lentilhas tratadas com PATW-180 min apresentaram comprimentos de caules significativamente maiores em comparação com o grupo de controle, além de uma diferença estatisticamente significativa (valor-p < 0,05) nos grupos amostrais semanais distintos. Os mecanismos metabólicos associados a germinação de sementes (quebra de dormência) e crescimento de caule (síntese proteica) podem ter sido intensificados devido à ação dos íons nitrato e nitrito presentes na PATW. Com isso, é possível propor que o tratamento indireto com a PATW pode aprimorar a produtividade e a qualidade das culturas de leguminosas, como as lentilhas, no agronegócio.

## ABSTRACT

The non-thermal plasma technology has been widely demanded in the fields of health and agriculture due to its capability of material processing through physicochemical reactions. In agriculture, seeds can undergo direct or indirect plasma treatment, both of which tend to elicit a synergistic effect of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) on the seeds. Owing to the high demand for scientific publications related to the indirect treatment of seeds using plasma-activated water, this study aimed to investigate the effect of plasma-activated tap water (PATW) generated by gliding arc (30.93 W) on the germination of lentils and the initial growth of their seedlings. The PATW varied in its physicochemical parameters during the activation process, reaching values of pH-3.66, ORP -181.0 mV, estimated concentrations (mg/L) of nitrite ions ( $\text{NO}_2^-$ )-37.47, and nitrate ions ( $\text{NO}_3^-$ )-27.26. Additionally, the energetic efficiency of RONS was measured at  $7.98 \cdot 10^{-3}$  mol/kWh after 180 minutes of activation of samples extracted from a volume of 250 ml. From the seed soaking, a qualitative observation revealed the formation of more spaced granules and a more significant presence of nitrogen groups on lentils treated with PATW. The absorption rate by lentil seeds soaked in tap water was 0.977 (Control, pH-6.68), while for PATW (pH 5.27 and pH 4.00) it was 0.978. After 7 days of germination, samples of lentils treated with PATW-180 min showed significantly longer stem lengths compared to the control group, along with a statistically significant difference (p-value < 0.05) among different weekly sample groups. The metabolic mechanisms associated with seed germination (dormancy breakage) and stem growth (protein synthesis) may have been intensified due to the action of nitrate and nitrite ions present in PATW. Therefore, it is possible to propose that the indirect treatment with PATW can enhance the productivity and quality of legume crops, such as lentils, in the agribusiness sector.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama dos principais efeitos relacionados com a tecnologia de plasma em áreas de estudo e industriais. (Traduzido e Adaptado de [2]).	19
Figura 2. Demanda de publicações gerais e artigos de revisão sobre água ativada por plasma na agricultura entre os anos de 2013 e 2023.	20
Figura 3. Curva de tensão em função da corrente para classificar, qualitativamente, os diferentes regimes de descarga elétrica. (Reproduzido por [11]).	24
Figura 4. Ilustração simples de ionizações sucessivas e multiplicação de elétrons pelo processo do impacto eletrônico direto provocado pelo choque dos elétrons livres acelerados sobre as demais partículas neutras. (Elaborado por [12]).	24
Figura 5. Ilustração das vertentes de descarga em arco deslizante tradicional (a) e em vórtice (b). (Traduzido de [19]).	27
Figura 6. Representação simplificada dos tratamentos direto e indireto de sementes à plasma não-térmico. (Traduzido e adaptado de [29]).	28
Figura 7. Reator para tratamento direto de semente à plasma de DBD (a) e jato atmosférico (b). (Traduzido e adaptado de [29]).	29
Figura 8. Reator de ativação de líquido por meio de sistema de descarga elétrica em gases (a) e híbrido em líquido-gases. (Traduzido e Adaptado de [39]).	30
Figura 9. Principais interações das RONS secundárias de interesse ( $\text{NO}_2^-$ e $\text{NO}_3^-$ ) na água ativada por plasma que influenciam nos mecanismos metabólicos relacionados com a quebra de dormência das sementes (a) e crescimento de plântulas (b). (Traduzido e Adaptado de [29, 30]).	31
Figura 10. Representação da PAW e principais processos físico-químicos em diferentes fases. (Adaptado de [49]).	32
Figura 11. Representação do sistema de transferência das RONS para a interface e volume de água ativada. (Traduzido e Adaptado de [61]).	35
Figura 12. Diagrama das principais etapas envolvidas na metodologia deste trabalho.	37
Figura 13. Desenho esquemático do circuito elétrico básico do gerador de alta tensão.	38
Figura 14. Circuito elétrico para aquisição de dados de potência referentes a descarga em arco deslizante.	39
Figura 15. Representação do arranjo experimental para a ativação da água de torneira (a) por plasma de arco deslizante (b). (Adaptado de [12]).	40

Figura 16. Níveis do topo (T) e fundo (F) do volume total de água ativada (250 ml) relativos às regiões de retirada das amostras para análise. ....	41
Figura 17. Tratamento indireto das sementes de lentilha e suas métricas (taxa de sucesso de germinação e comprimento de caule e raiz) para avaliar o processo de desenvolvimento inicial desta espécie. ....	44
Figura 18. Lotes de sementes mergulhados em água em um porta-amostra específico. ....	49
Figura 19. Potência elétrica relativa à descarga em arco deslizante tradicional em função do tempo. ....	51
Figura 20. A evolução da potência absoluta com pico próximo à 50 W a partir de -0,30 até 0 ms. ....	52
Figura 21. Potência que pode ser relacionada com o aumento de potência dissipada pelo plasma de arco não-térmico do <i>gliding arc</i> . ....	52
Figura 22. Variação de pH e Condutividade elétrica dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante. ....	54
Figura 23. Variação de pH e ORP dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante. ....	55
Figura 24. Variação de Temperatura e TDS dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante. ....	56
Figura 25. Espectrofotometria de absorvância na faixa do UV (a) e entre UV e visível (b) das amostras retiradas do topo do volume de 250 ml de água ativada por plasma de arco deslizante. ....	58
Figura 26. Concentração absoluta estimada das RONS dissolvidas de amostras do topo (2,5 ml) no volume de 250 ml em função do tempo de ativação a plasma por análise espectrofotométrica. ....	59
Figura 27. Eficiência energética e concentração total estimadas relativas às RONS formadas no volume de 250 ml de TW até 3 horas de processo de ativação por plasma não-térmico de arco deslizante (30,93 W). ....	61
Figura 28. Morfologia da casca da semente de lentilha realizado por MEV em diferentes condições: sem embebedimento em água (a), com embebedimento em água de controle (b) e ativada (c), com magnificações de 2000x (imagem principal) e 10000x (imagem secundária no canto superior direito). ....	62

Figura 29. Mapa de composição química da casca da semente de lentilha obtido por EDX em diferentes condições: sem embebedimento em água (a), com embebedimento em água de controle (b) e ativada (c).....	64
Figura 30. Espectro FTIR médio relativo às 5 amostras de sementes de lentilhas não embebidas (STRA) contendo os picos encontrados através do <i>software</i> Origin Graphing&Analysis, além do destaque à região de estiramento de ligação relacionados aos grupos metil, hidroxila, amina e amidas (azul) e a região característica ( <i>fingerprint-vermelha</i> ) relacionados aos macronutrientes sobre a amostra de lentilha analisada por FTIR (MIR). ....	65
Figura 31. Comparação dos espectros FTIR médios da amostra referencial (STRA) com as demais (CONT e PATW) as quais foram secas com papel toalha, inicialmente, e submetidas a 55 °C por 3 dias e 25°C, 1 dia (a); e 27° por 24 h (b) para secagem semidefinitiva dentro de uma estufa de secagem e esterilização. ....	66
Figura 32. Porcentuais de massa de água absorvida plotados em curvas de ajuste para obter os índices relativos à taxa de absorção e porcentual máximo de água absorvida em diferentes valores de pH pelos lotes de lentilhas em função do tempo total acumulado de embebedimento (a) e nos primeiros 30 min acumulados (b).....	69
Figura 33. Temperatura em relação à média móvel dentro da estufa <i>indoor</i> para o grupo amostral LS4 (a) e LS6(b). ....	71
Figura 34. Umidade relativa do ar em relação à média móvel dentro da estufa para o grupo amostral LS4 (a) e LS6 (b). ....	72
Figura 35. Germinação das sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos Dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) em 2 pares de tubos de ensaio do grupo LS4.....	74
Figura 36. Germinação das sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos Dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) no primeiro conjunto de bandejas de plástico (PP-1: lado esquerdo e CP-1: lado direito) em primeiro plano do grupo LS4.....	75
Figura 37. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica ( <i>box-plot</i> ) com 24 amostras (12 caules e 12 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).77	
Figura 38. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica ( <i>box-plot</i> ) com 28 amostras (14 caules e 14 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).78	
Figura 39. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica ( <i>box-plot</i> ) com 48 amostras (24 caules e 24 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).79	

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais reações físico-químicas em ativação de água por plasma. (Adaptado de [51]).	33
Tabela 2. Concentração absoluta estimada dos RONS da PATW em função do tempo.	60
Tabela 3. Porcentagem em massa (Wt%) dos elementos químicos presentes na superfície das amostras de lentilhas detectados via análise por EDS/EDX.	63
Tabela 4. Dados relativos à absorção de água pelo lote de sementes embebido em diferentes condições de pH.	69
Tabela 5. Contagem das amostras que obtiveram maiores valores de comprimentos de caule e raiz.	76
Tabela 6. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em geral (tubo de ensaio e bandejas de plástico) no grupo LS4.	80
Tabela 7. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em geral (tubo de ensaio e bandejas de plástico) no grupo LS6.	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA	Ácido Abscísico;
AC	<i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada);
ATR	<i>Attenuated Total Reflection</i> (Reflexão Total Atenuada);
Cap.	Capítulo(s);
Cond.	Condutividade elétrica;
CONT/Control	Grupos tratados com água de torneira sem ativação (Controle);
Coo	<i>Coolers</i> (Resfriadores);
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i> (Tubo de Raios Catódicos);
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua);
DHT	Sensor de umidade relativa do ar e temperatura;
DI	Deionizada;
EDX/EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Espectroscopia de Raio-X por Energia Dispersiva);
Eq.	Equação (ões);
F crítico	Razão entre as variâncias tabeladas;
F	Razão entre as variâncias calculadas;
Fan	Miniventiladores;
FTIR	<i>Fourier-Transform Infrared Spectroscopy</i> (Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier);
GA	Giberelina;
gl	Grau de liberdade;
HV	<i>High Voltage</i> (Alta Voltagem);
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter Integrado);
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Tela de Cristal Líquido);
LED	<i>Light Emission Diode</i> (Diodo Emissor de Luz);
LSn°	Primeira letra referente a semente de lentilha seguida do número da semana do grupo amostral testado ou analisado;
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura;
MIR	Mid-InfraRed correspondendo ao comprimento de onda do infravermelho médio (4000 cm <sup>-1</sup> a 400 cm <sup>-1</sup> );
MQ	Média Quadrática;

mT1-3	Temperatura média referente aos sensores DHT 1 ao 3;
mT4-6	Temperatura média referente aos sensores DHT 4 ao 6;
mU1-3	Umidade relativa do ar média referente aos sensores DHT 1 ao 3;
mU4-6	Umidade relativa do ar média referente aos sensores DHT 4 ao 6;
NTC	Negative Temperature Coefficient (Coeficiente Negativo de Temperatura) ou Termistor Negativo;
ORP	Oxidation-Reduction Potential (Potencial de Oxirredução) mensurado em mV;
PATW	Plasma Activated Tap Water (Água de Torneira Ativada por Plasma);
PAW	Plasma Activated Water (Água Ativada por Plasma);
pH	Potencial Hidrogeniônico;
RH	Resistance to Humidity (Resistência a Umidade);
RNS	Reactive Nitrogen Species (Espécies Reativas Nitrogenadas);
ROS	Reactive Oxygen Species (Espécies Reativas Oxigenadas);
RONs	Reactive Oxygen and Nitrogen Species (Espécies Reativas Oxigenadas e Nitrogenadas);
RTC	Real Time Clock (Relógio de Tempo Real);
Seç.	Seção(ões);
SQ	Soma Quadrática;
TDS	Total Dissolved Solids (Total de Sólidos Dissolvidos);
Tef	Temperatura efetiva calculada de todos os sensores DHT;
Temp.	Temperatura.
TW	Tap Water (Água de Torneira);
TXT	Arquivo de Texto;
Uef	Umidade relativa do ar efetiva calculada de todos os sensores DHT;
USB	Universal Serial Bus (Porta Serial Universal);
UV-vis	Espectro de radiação ultravioleta ao visível (190 nm ao 700 nm);

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Corrente elétrica em Ampere;
°C	Energia térmica média das partículas em Celsius;
C	Elemento químico relativo ao carbono;
Ca	Elemento químico relativo ao cálcio;
eV	Padrão de quantificação energética do plasma em elétron/Volt;
F	Capacitância em Faraday;
g	Massa em grama;
h	Tempo em horas;
Hz	Frequência em Hertz;
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Fórmula química relativa ao peróxido de hidrogênio ou água oxigenada;
Hg	Elemento químico relativo ao mercúrio;
HNO <sub>2</sub>	Fórmula química relativa ao ácido nitroso;
L	Volume em litros;
lm	Fluxo luminoso em lúmens;
m	Unidade métrica em metros;
min	Tempo em minutos;
Mg	Elemento químico relativo ao magnésio;
N	Elemento químico relativo ao nitrogênio;
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Fórmula química relativa ao íon de nitrito;
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fórmula química relativa ao íon de nitrato;
O	Elemento químico relativo ao oxigênio;
O <sub>3</sub>	Fórmula química relativa ao ozônio;
ppm	Concentração em partes por milhão;
pKa	Coefficiente relativo à constante de equilíbrio de acidez;
s	Tempo em segundos;
S/m	Condutividade elétrica de certo material em Siemens/metro;
Si	Elemento químico relativo ao silício;
Te	Temperatura dos elétrons em eV;
Ti	Temperatura dos íons em eV;
V	Tensão elétrica em Volts;
W	Potência elétrica em Watt;

$\Omega$	Unidade de resistência elétrica em Ohms;
$\Psi_p$	Símbolo para Potencial Osmótico;

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1 Contextualização</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>21</b>
1.2.1 Objetivo Geral.....	21
1.2.2 Objetivos Específicos.....	21
<b>2. REFERENCIAL TÉORICO</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1 Principais Tipos de Descargas Elétricas e Plasmas para Tratamentos de Materiais .</b> .....	<b>23</b>
2.1.1 Arco Deslizante (Gliding Arc).....	25
<b>2.2 Aplicações Tecnológicas de Plasma Não-Térmico em Sementes</b> .....	<b>27</b>
2.2.1 Tratamento Direto da Semente por Plasma.....	28
2.2.2 Tratamento Indireto da Semente por Meio da Água Ativada por Plasma Não- Térmico.....	29
2.2.2.1 Água Ativada por Plasma Não-Térmico .....	32
2.2.2.2 Transferência de Massa por meio de Bolhas em um Reator à Plasma ..	35
<b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>36</b>
<b>3.1 Gerador de Alta Tensão</b> .....	<b>37</b>
3.1.1 Caracterização Elétrica da Descarga em Arco Deslizante .....	38
<b>3.2 Reator de Ativação da Água de Torneira</b> .....	<b>39</b>
3.2.1 Caracterização do Processo de Ativação da Água de Torneira por Plasma.....	40
<b>3.3 Caracterização da Morfologia e Composição Química Superficial da Semente</b> .....	<b>42</b>
3.3.1 Taxa de Absorção de Água pelas Sementes.....	43
<b>3.4 Tratamento Indireto das Sementes de Lentilha</b> .....	<b>43</b>
3.4.1 Sistema de Desenvolvimento Inicial das Sementes .....	45
<b>4. TEORIA METODOLÓGICA</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1 Análise por Espectrofotometria UV-vis</b> .....	<b>46</b>
4.1.1 Análise da Taxa de Absorção.....	48
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>50</b>

<b>5.1</b>	<b>Caracterização Elétrica .....</b>	<b>50</b>
5.1.1	Descarga em Arco Deslizante Tradicional.....	50
<b>5.2</b>	<b>Aplicação da Água Ativada por Plasma de Arco Deslizante.....</b>	<b>53</b>
5.2.1	Caracterização da PATW .....	53
5.2.2	Alteração de pH, Condutividade Elétrica, ORP, TDS e Temperatura .....	53
5.2.2.1	Concentração Absoluta Estimada das RONS e sua Eficiência Energética .....	57
5.2.3	Análise da Morfologia Superficial das Sementes de Lentilha por MEV .....	61
5.2.4	Composição Química Superficial da Casca das Sementes .....	63
5.2.4.1	Análise por EDS .....	63
5.2.4.2	Análise por FTIR.....	65
5.2.5	Taxa de Absorção de Água .....	68
5.2.6	Efeito da PATW no Desenvolvimento Inicial de Lentilhas.....	70
5.2.6.1	Parâmetros Físicos do Ambiente Interno da Estufa <i>indoor</i> .....	70
5.2.6.2	Desenvolvimento Inicial das Sementes de Lentilhas .....	73
5.2.6.2.1	Registro de Crescimento e Taxa de Sucesso da Germinação das Lentilhas .....	73
5.2.6.2.2	Comprimento de Caules e Raízes da Lentilha .....	76
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>6.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>
	<b>Apêndice A – Gerador De Alta Tensão e Arco Deslizante.....</b>	<b>91</b>
	<b>Apêndice B – Estufa Indoor e seus Componentes .....</b>	<b>92</b>
	<b>Apêndice C – Análises Da Água e Sementes .....</b>	<b>98</b>
	<b>Apêndice D – Resumo Apresentado e Premiado .....</b>	<b>104</b>
	<b>Anexo A – Módulo Sensor DTH 11 .....</b>	<b>105</b>
	<b>Anexo B – Transformador Flyback Para Geração de Alta Tensão .....</b>	<b>106</b>
	<b>Anexo C – Sistema de Controle de Dados .....</b>	<b>107</b>
	<b>Anexo D – Análise Morfológica e Química da Semente.....</b>	<b>108</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A palavra plasma tem sua etimologia grega na qual deriva-se para “aquilo que é moldado ou formado”. Na área da saúde e parte do senso comum, esta palavra tem sido mais utilizada no âmbito da medicina, pois o significado de plasma define, com mais clareza, como é formado o fluido transparente sanguíneo no qual é composto por células carreadoras de gases (hemoglobina) ou de defesa (leucócitos), além de outras moléculas e substâncias básicas e complexas. Já área da física, esta denominação foi utilizada, primeiramente, pelo químico americano Irving Langmuir na segunda década do século 20. Este cientista começou a usar este termo para descrever as oscilações no fluido gasoso ionizado presentes em lâmpadas com filamento de tungstênio. A analogia do plasma físico com o sanguíneo está no comportamento coletivo das partículas carregadas e neutras mantendo sua neutralidade macroscópica [1].

Este comportamento coletivo oferece certas vantagens para a tecnologia de plasma não-térmicos dada suas aplicações como, na área da saúde, a inativação de microrganismos indesejáveis, como bactérias, vírus e fungos, presentes em instrumentos cirúrgicos. Na área agrícola, pode favorecer o aumento da vida útil dos alimentos ao reduzir a deterioração e melhorar a segurança alimentar em tratamento sobre sementes e plantas para o aprimoramento de crescimento, controlar pragas e doenças, e aumentar a produção agrícola. Certos estudos e pesquisas demonstram os efeitos que este tipo de tecnologia pode proporcionar na germinação de sementes e desenvolvimento das plantas [2,3]. A descrição sucinta destes estudos e pesquisas sobre o tratamento de sementes à plasma está contida na Seç 2.2.

## 1.1 Contextualização

As aplicações tecnológicas de plasma têm sido amplamente demandadas nas mais diversas áreas como na saúde e agricultura. Nestas áreas, o tratamento de superfície à plasma é uma das aplicações mais utilizadas devido sua capacidade de processamento de materiais como os processos de esterilização de equipamentos cirúrgicos e alimentos a partir da geração ou quebra de biofilmes que causam a inativação de certos micro-organismos nocivos por efeito sinérgico da radiação ultravioleta e certas espécies reativas geradas pelo plasma não-térmico [2]. Também existem processos destrutivos de materiais sólidos e líquidos nocivos que podem

ser descartados por meio da queima com auxílio de incineradores ou endurecimento e soldagem de peças com equipamentos que são compostos por uma série de tochas de plasmas térmicos [1,5].

Por alguns sistemas de tratamento análogos, o material têxtil pode ter sua superfície modificada com o objetivo de atender demandas industriais como efeito de impermeabilidade de tecidos a certos tipos de líquidos, proteção contra contaminantes e síntese de nanopartículas a partir da exposição do plasma não-térmico para deposição, remoção ou reestruturação do material em sua superfície [5]. Os principais efeitos relacionados com a tecnologia de plasma em áreas de estudo e industriais estão apresentados no diagrama da Figura 1. Uma das áreas destacadas foi a agrícola na qual a tecnologia de plasma pode ser utilizada para ocasionar certos aprimoramentos no solo ou substrato (remediação) em que a semente é plantada até o estágio de colheita da safra no final de seu desenvolvimento [6]. Tais efeitos podem ser obtidos por meio de tratamentos direto e indireto à plasma que podem aprimorar a germinação de sementes e crescimento da planta [6-9].

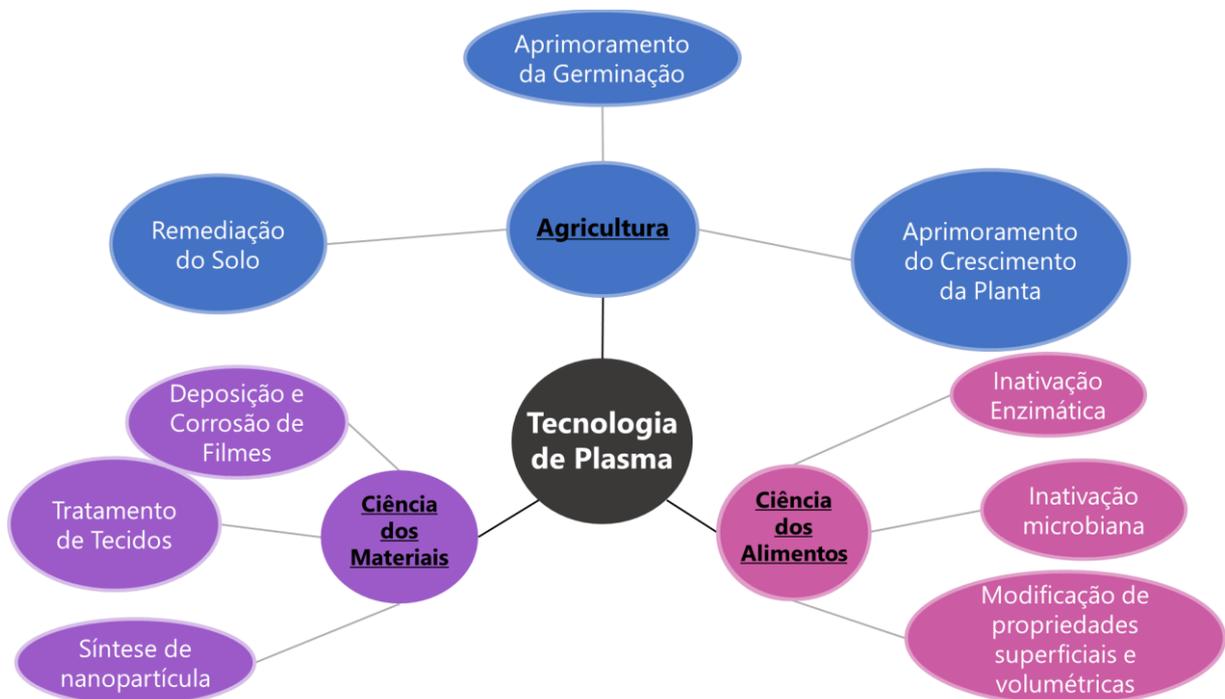


Figura 1. Diagrama dos principais efeitos relacionados com a tecnologia de plasma em áreas de estudo e industriais. (Traduzido e Adaptado de [2]).

Como é possível notar na Figura 2, o número elevado de publicações científicas, entre os anos de 2013 e 2023, pode indicar uma tendência de que este tipo de estudo está sendo cada vez mais requisitado pelo mercado dado os efeitos de aprimoramento no desenvolvimento do plantio devido à potencialização na geração de nutrientes em plantações com efeito fertilizante por meio de alguns tratamentos associados com plasma não-térmico sobre as sementes, plantas e a safra. No setor de pesquisa e desenvolvimento industrial, o centro de pesquisa científica holandês conceituado, que foi intitulado de VitalFluid B.V., desenvolve tecnologias de plasma para aplicações nas áreas da saúde e, principalmente, agricultura. Nesta última área, os tratamentos da semente e plantas por ação do plasma de forma direta (tratamento de superfície) e indireta (PAW) são mais demandados à nível de pesquisa industrial pelo setor do agronegócio pelo seu caráter sustentável [86].

A partir disso, a motivação principal deste trabalho de pesquisa, corroborada pela demanda gerada pelo setor agrícola, foi de aprimorar o estudo da PATW e sua aplicação tecnológica como tratamento indireto em sementes por meio de um reator particular à pressão atmosférica para avaliar o processo de germinação de sementes leguminosas, como as lentilhas, e crescimento inicial de suas respectivas plântulas.

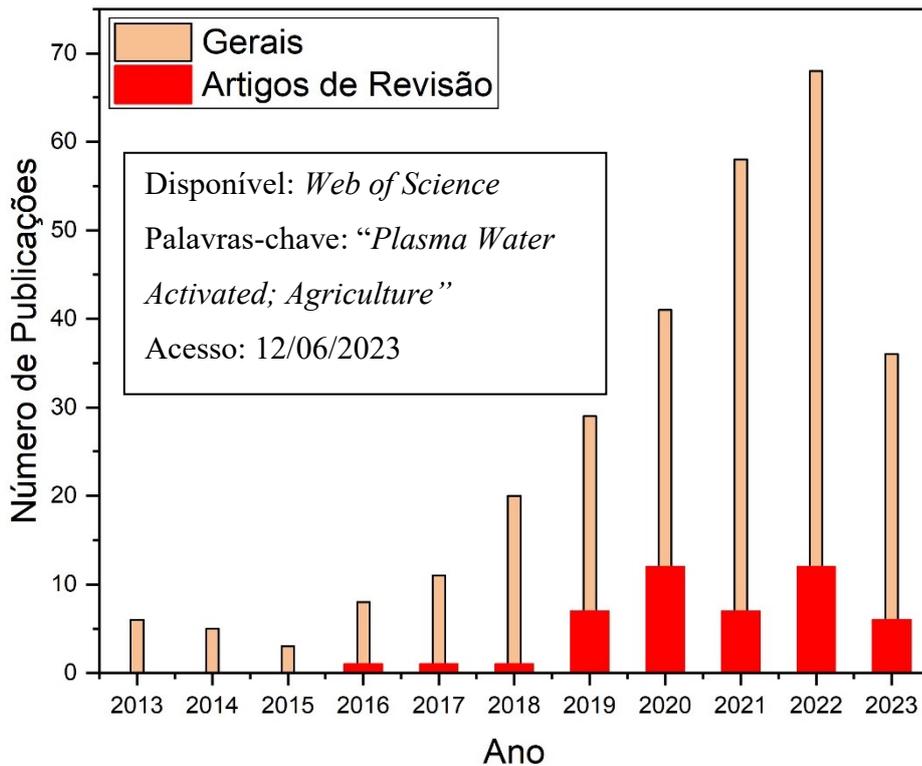


Figura 2. Demanda de publicações gerais e artigos de revisão sobre água ativada por plasma na agricultura entre os anos de 2013 e 2023.

Neste contexto, os objetivos principais e específicos (Seç. 1.2) foram estabelecidos para guiar o estudo realizado neste trabalho, utilizando tecnologia de plasma de arco deslizante para poder aprimorar o estágio de germinação das sementes de lentilhas e do crescimento de suas plântulas a partir do estado da arte deste tema de pesquisa (Cap. 2).

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos estão destacados a partir da apresentação das etapas gerais e específicas relativas à metodologia e resultados esperados, desde a análise e preparação dos materiais necessários para o estudo da água ativada por plasma de arco deslizante até a avaliação da aplicação tecnológica da PATW no desenvolvimento inicial de sementes de lentilha.

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem por objetivo geral em avaliar a aplicação tecnológica de plasma não-térmico de arco deslizante atmosférico por meio do estudo da água ativada e o seu efeito no processo de germinação de sementes e no crescimento de suas plântulas relativo ao desenvolvimento inicial.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

Para alcançar o objetivo geral, certos detalhes precisam ser especificados. A partir do processo de ativação feito em um reator previamente montado, pretendeu-se aquisitar as características físico-químicas da água de torneira antes e depois da ativação por meio da aferição de parâmetros como pH, TDS, ORP, condutividade elétrica e temperatura, bem como realizar uma análise espectrofotométrica de absorbância para obter os valores relacionadas às concentrações absolutas estimadas das RONS de volumes amostrais retiradas em níveis diferentes.

Intermediariamente, fazer a caracterização morfológica e de composição química superficial das cascas destas sementes de lentilha, antes e após serem submetidas à embebição sob diferentes condições de água ativada por plasma, através da análise por MEV/EDS e FTIR.

Para a realização do estudo principal da aplicação tecnológica da PATW sobre as lentilhas, foi pretendido avaliar certas métricas relativas ao estágio de desenvolvimento inicial da lentilha, como a taxa de sucesso da germinação e crescimento das plântulas (aferindo o comprimento do caule e raiz). Tais parâmetros foram medidos e analisados estatisticamente para justificar certos mecanismos metabólicos da lentilha em função do processo do tratamento indireto por plasma em um período de desenvolvimento inicial nos primeiros 7 dias.

Por fim, tal estudo precisou ser realizado em uma estufa *indoor* na qual alguns módulos de sensores de temperatura e umidade relativa do ar (DHT11) e certos atuadores para manter um ambiente propício para a plena germinação das amostras com a manutenção de parâmetros físicos do ambiente por meio de um microcontrolador da plataforma Arduino.

## 2. REFERENCIAL TÉORICO

O plasma é conhecido, popularmente, como quarto estado físico da matéria por anteceder os estados bem estabelecidos como o gasoso, líquido e sólido pela ordem decrescente de transferência de energia para transformação do estado físico da matéria. Todavia, o plasma ainda não é considerado novo estado da matéria, pois ainda apresenta características de um gás. Por definição básica, o plasma é considerado um gás condutor sendo total ou parcialmente ionizado (o estabelecimento de partículas carregadas devido ao desprendimento de certos elétrons da camada de valência) a partir da chamada ruptura dielétrica do gás. Com isso, o plasma apresenta um comportamento coletivo entre partículas carregadas e neutras por meio de processos colisionais mantendo assim sua neutralidade macroscópica [9;10].

A ruptura dielétrica é considerada uma rápida queda da resistência elétrica do gás de trabalho por meio da aplicação de uma tensão de ruptura estabelecida por um campo elétrico suficiente, iniciando uma descarga elétrica na qual deve provocar os chamados processos de dissociações moleculares e, principalmente, ionizações sucessivas para ser considerado plasma [1]. A partir disso, este estado distinto passa de isolante para condutor, além de apresentar a geração de campos magnéticos ao seu redor. O plasma também pode emitir luz a partir de

processos de excitação e relaxação dos elétrons presentes nesse estado energético em átomos metaestáveis. O estado de excitação do átomo a partir do momento em que certos elétrons são energizados em sua respectiva camada de valência por transferência de energia, por meio de campos elétricos e/ou magnéticos externos ou colisões com outras partículas, absorvem energia e são impulsionados para níveis energético mais elevados na eletrosfera, e a relaxação seria o processo de estabilização energética no qual o elétron retorna para sua camada de valência e emitindo energia em forma de radiação luminosa. Por fim, a sua neutralidade macroscópica é justificada pelo comportamento coletivo das cargas negativas e positivas fazendo com que haja uma equivalência de suas respectivas densidades [1;4;10].

## **2.1 Principais Tipos de Descargas Elétricas e Plasmas para Tratamentos de Materiais**

A origem ou ignição do comportamento inicial do plasma se dá a partir da ruptura dielétrica do gás relativo à redução rápida de sua resistência elétrica por meio da aplicação de uma tensão de ruptura que possibilite a formação da descarga elétrica característica do sistema. A partir da tensão de ruptura e a geração de elétrons secundários acelerados, ocorre um aumento na densidade de corrente o que dá origem às descargas elétricas do tipo luminescente e prosseguidas da formação em arco as quais são consideradas autossustentada [10]. A evolução qualitativa dos diferentes tipos de descargas elétricas, em função dos valores de tensão e corrente, das quais podem originar a condição de plasma está demonstrada no gráfico presente na Figura 3.

É importante ressaltar que, logo após a ruptura dielétrica, ocorrem certos processos colisionais que provocam as ionizações, dissociações, excitações e relaxações sobre partículas neutras e carregadas dentre diversos tipos de recombinações. Estes processos colisionais ocasionam certas trocas ou transferências de energia dentro do sistema de plasma, principalmente, o impacto eletrônico direto sobre partículas neutras em efeito de avalanche no qual diz respeito ao choque dos elétrons livres sobre estas partículas que, dependendo de  $T_e$  com energia suficiente, provocam ionizações sucessivas as quais gera a chamada multiplicação de elétrons no sistema de plasma (Figura 4), que são acelerados no sentido contrário ao campo elétrico, com espécies neutras (metaestáveis ( $A^*$ )) o que pode gerar a formação de radicais livres, outros íons, dentre outros componentes físico-químicos.

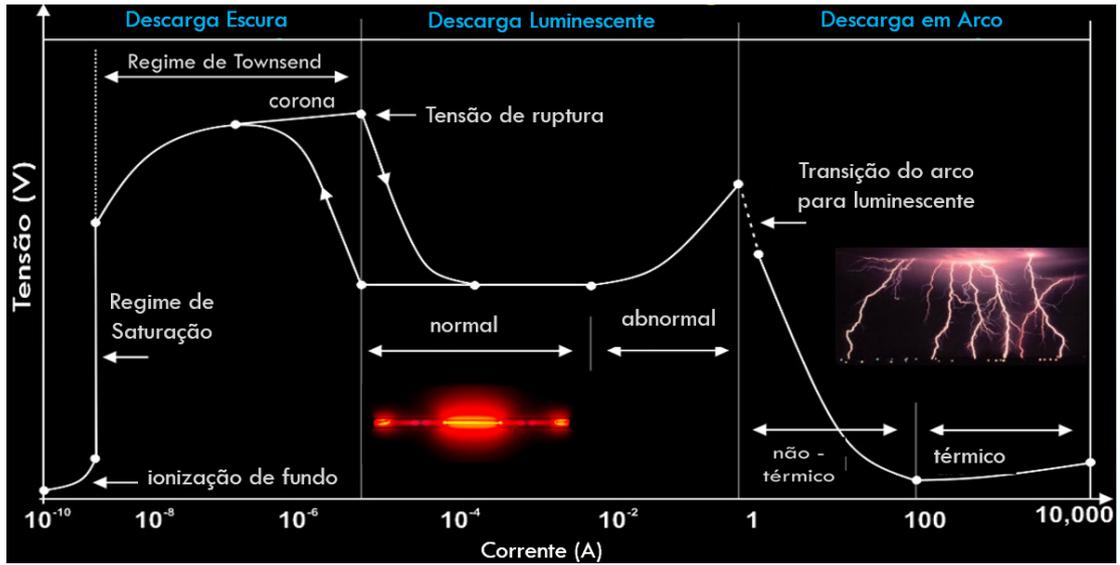


Figura 3. Curva de tensão em função da corrente para classificar, qualitativamente, os diferentes regimes de descarga elétrica. (Reproduzido por [11]).

De acordo com os regimes presentes na Figura 3, há vários tipos de descargas elétricas que podem gerar plasma nas quais contém suas características específicas. Para tratamentos de superfície, os principais tipos de plasmas não-térmicos em descargas são do tipo corona, descarga de barreira dielétrica (DBD) e arco deslizante [10].

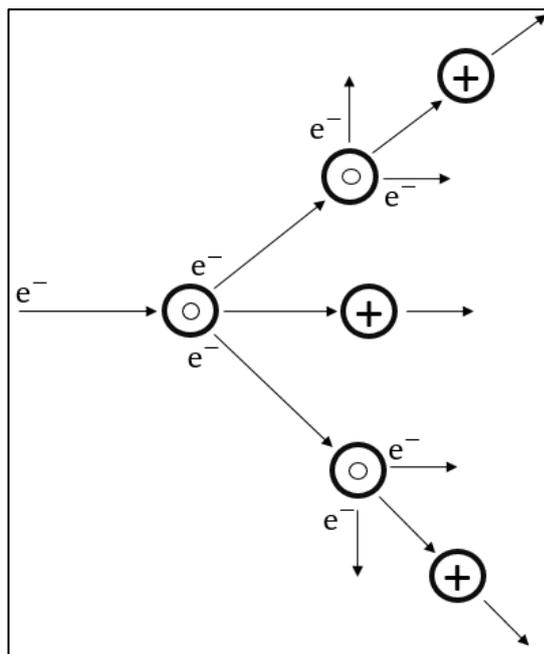


Figura 4. Ilustração simples de ionizações sucessivas e multiplicação de elétrons pelo processo do impacto eletrônico direto provocado pelo choque dos elétrons livres acelerados sobre as demais partículas neutras. (Elaborado por [12]).

O plasma não-térmico apresenta um desequilíbrio termodinâmico local no qual a  $T_e$  média tende a ser mais alta em relação aos íons ( $T_i$ ) em determinada região da descarga, conferindo uma alta seletividade química e obtendo uma maior geração de espécies químicas reativas geradas a partir deste regime de operação.

Com isso, a tecnologia de plasma não-térmico possibilita certos tratamentos de superfície de materiais como, na indústria microeletrônica, a ocorrência de processos de corrosão e deposição energética sobre o substrato semicondutor por ação das espécies reativas gerada pelo plasma à baixa pressão em reator com eletrodos com diferentes geometrias para construção de dispositivos semicondutores como processadores de alto desempenho [13].

Entretanto, certas amostras aquosas são inadequadas como substrato ou alvo em tratamentos à plasma em sistemas submetidos à vácuo, pois a interação das moléculas e íons entre plasma e substrato/alvo tende a ser baixa. Em sistemas atmosféricos, a transferência de energia do plasma tende a ser maior para as moléculas e íons presentes na solução, resultando em um processo de tratamento mais eficiente [13,14]. Por isso, certos tratamentos de substratos aquosos são realizados à pressão atmosférica, gerando assim um ótimo custo-benefício em relação ao material que compõem o reator ou aplicador a plasma, dado que os equipamentos de alto custo como sensores e bombas de vácuo não se fazem necessários.

Para alguns tratamentos de materiais biológicos e/ou aquosos, o regime de operação de plasma não-térmico à pressão atmosférica é mais utilizado devido à seletividade química alta que propicia uma maior geração de espécies reativas do sistema gás/vapor/plasma. Desta forma, o plasma não-térmico oriundo de descargas do tipo corona, DBD e arco deslizante se apresentam como alternativas viáveis para tratamentos de certos materiais à pressão atmosférica [15,16].

### **2.1.1 Arco Deslizante (Gliding Arc)**

A formação da descarga em arco deslizante à pressão atmosférica se dá pelo processo de ruptura do gás por meio da aplicação de um campo elétrico suficiente entre dois eletrodos postos de forma divergente entre si. Para que este tipo de arco se forme, os eletrodos precisam estar com uma distância mínima entre si, geralmente entre 1 mm e 2 mm, e obter um valor mínimo de campo elétrico (3 kV/mm) para que ocorra a ruptura dielétrica do gás e formação do arco no regime de operação em equilíbrio termodinâmico local ( $T_e$  média aproximadamente

igual à  $T_i$  em determinada região ou ponto da descarga próximo a ruptura dielétrica) [17]. O arco deslizante pode ser formado a partir da aplicação de um fluxo de gás de trabalho entre os eletrodos divergentes, forçando a elevação da resistência da descarga, aumentando seu comprimento linear e causando um efeito de deslizamento entre os eletrodos até o arco atingir seu regime não-térmico em desequilíbrio termodinâmico local (em determinada região ou ponto da descarga aproxima-se da extinção). Quando a potência dissipada pela descarga se equipara com a fornecida pelo gerador de alta tensão, ela se extinguirá no regime de operação em desequilíbrio termodinâmico local do plasma, fazendo com que a descarga se resfrie e reinicie o processo de ruptura dielétrica na menor distância entre os eletrodos divergentes [5,18]. Existem duas vertentes de descarga em arco deslizante quanto à configuração/geometria de eletrodos e o sentido do fluxo de gás. Na primeira vertente, o fluxo de gás é realizado da direção axial entre os eletrodos conhecido com arco deslizante tradicional ou planar e, na segunda, tangencial denominado de vórtice. Estas vertentes estão ilustradas na Figura 5.

A formação da descarga em arco deslizante tende a dissipar 80 % da potência no regime de operação em desequilíbrio termodinâmico local no plasma não-térmico o qual favorece a seletividade química alta ao sistema [17-20]. Por isso, este regime de operação de plasma não-térmico tem sido utilizado em aplicações tecnológicas associadas aos tratamentos de superfície ou interface de amostras biológicas sólidas ou líquidas em larga escala para gerar aprimoramento destes materiais associados a certos ramos industriais como o agronegócio [21, 22]. Neste ramo, a promoção de tratamentos direto e indireto em sementes tem sido alvo de estudo devido à ação da temperatura, campo elétrico e reações químicas realizadas pelas espécies reativas geradas pelo plasma não-térmicos em desequilíbrio termodinâmico local [23, 24]. A partir disso, o plasma não-térmico de descarga em arco deslizante (*gliding arc*) foi utilizado como ferramenta para o tratamento indireto na semente de lentilha neste trabalho de pesquisa. Este tratamento está retratado com mais detalhes na Seç. 2.2.

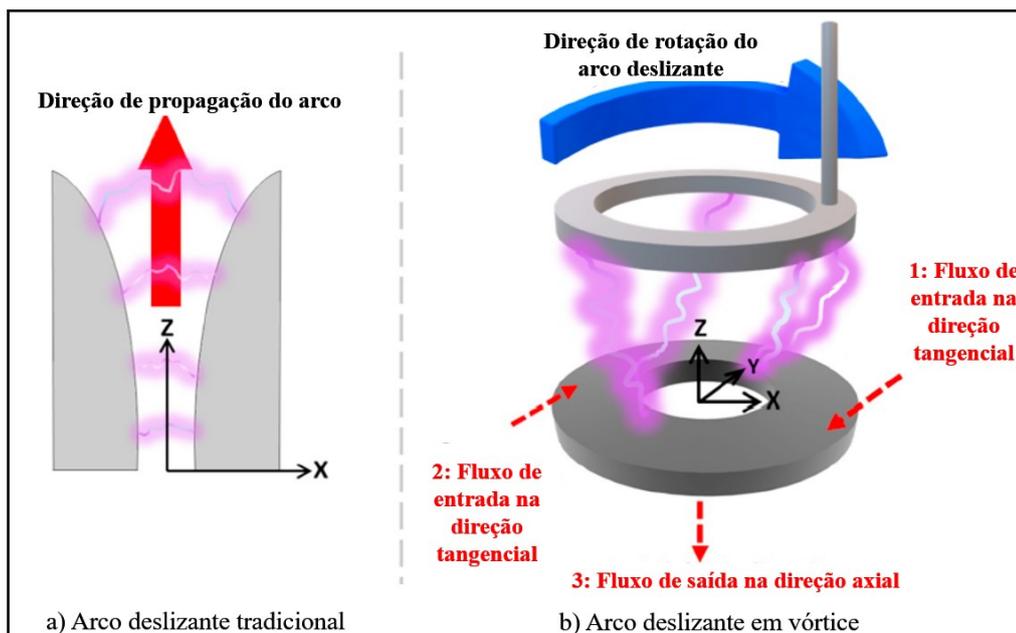


Figura 5. Ilustração das vertentes de descarga em arco deslizante tradicional (a) e em vórtice (b). (Traduzido de [19]).

## 2.2 Aplicações Tecnológicas de Plasma Não-Térmico em Sementes

O plasma não-térmico atmosférico é considerada uma tecnologia emergente e sustentável a qual pode melhorar a germinação e a produtividade das plantas. A partir desta tecnologia, as espécies reativas do plasma não-térmico podem realizar processos de desinfecção das sementes, eliminando micro-organismos patogênicos que estejam presentes em sua superfície ou volume, evitando assim doenças por infecções bacterianas ou fúngicas sobre as plantas. Com isso, a tecnologia de plasma não-térmico pode garantir um desenvolvimento inicial pleno e promover o aumento da produtividade e qualidade ao estimular a germinação das sementes e crescimento do caule e raízes que pode ocasionar um aumento da concentração de nutrientes do grão ou fruto obtido na safra final [24-27]. Estes aprimoramentos podem ser obtidos durante o estágio de desenvolvimento inicial das sementes e plântulas por meio do efeito sinérgico do plasma em contato com a superfície da semente através de tratamentos realizados de forma direta ou indireta por meio da ação físico-química das espécies reativas oxigenadas e nitrogenadas (RONS), campo eletromagnético oferecido pela radiação UV e temperatura da fase gás/plasma [28]. A ilustração simplificada dos tratamentos à plasma sobre as sementes está na Figura 6. Estes tipos de tratamentos em semente a plasma podem ser feitos

por reatores de descarga corona, DBD e jatos atmosféricos como o arco deslizante tradicional ou do tipo vórtice. Tais reatores estão ilustrados nas Figuras 7 e 8.

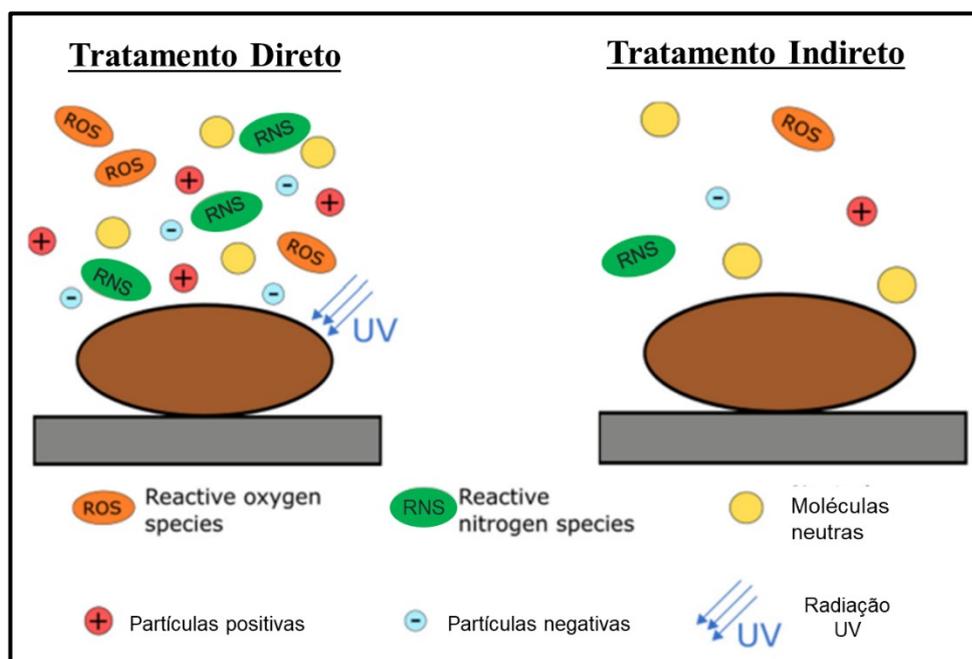


Figura 6. Representação simplificada dos tratamentos direto e indireto de sementes à plasma não-térmico. (Traduzido e adaptado de [29]).

### 2.2.1 Tratamento Direto da Semente por Plasma

O tratamento direto da semente por plasma refere-se à técnica de tratamento de superfície de sementes quando são expostas diretamente a região de plasma gerado a partir de um gás de trabalho, como o oxigênio, nitrogênio, argônio ou, simplesmente, o ar atmosférico. Esta vertente da aplicação tecnológica do plasma em sementes demonstra-se promissora para melhorar a germinação e o vigor das sementes, bem como a produtividade das plantas [30,31]. A superfície das sementes de feijão (*Vigna radiata*) tratada por micro plasma de hélio de descarga corona afetou positivamente a atividade enzimática de várias enzimas o que gerou aumento significativo na taxa de germinação em comparação com método convencional a pressão atmosférica [32]. Além disso, foi observado que sementes de trigo (*Triticum aestivum*) aprimoraram sua taxa de absorção de água após serem tratadas com plasma DBD de ar atmosférico antes da semeadura em condições de estresse hídrico [33]. Em outro experimento, as sementes de trigo (*Triticum aestivum*) que foram expostas ao plasma atmosférico DBD

tiveram a taxa de germinação de 97%, enquanto as sementes não tratadas foram de apenas 65% [34]. Com isso, as alterações da morfologia e o aumento das atividades enzimáticas em sementes tratadas podem ser justificadas pela ação físico-química das RONS, campo eletromagnético oferecido pela radiação UV e temperatura da fase gás/plasma sobre a superfície das sementes dependendo da distância entre o substrato e o plasma [29]. Este tratamento pode ser feito com auxílio de reatores de DBD e jato de plasma atmosféricos como está representado na Figura 7.

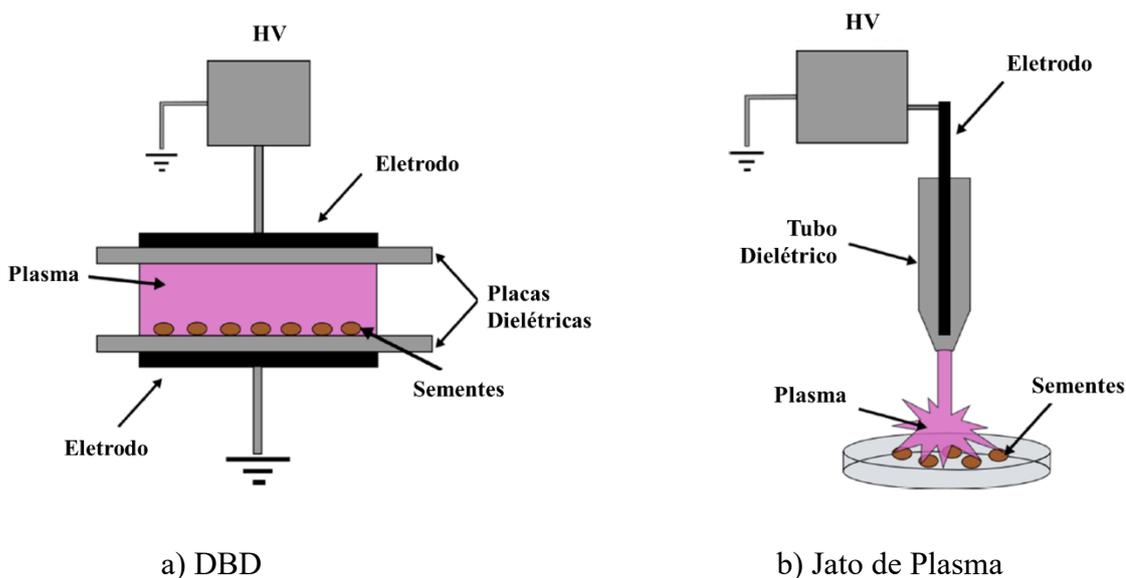


Figura 7. Reator para tratamento direto de semente à plasma de DBD (a) e jato atmosférico (b). (Traduzido e adaptado de [29]).

### 2.2.2 Tratamento Indireto da Semente por Meio da Água Ativada por Plasma Não-Térmico

Analogamente ao tratamento direto, alguns estudos sugerem que a água ativada por plasma pode ser utilizada para melhorar o crescimento das plantas, aumentando a germinação das sementes e a produtividade das culturas [35-38]. Para realizar este processo de ativação, os reatores de plasma mais comumente utilizados podem ser representados na Figura 8.

Certos componentes presentes em fertilizantes sintéticos produzidos pelo processo Haber-Bosh [22] podem ser parcialmente replicados por processos físico-químicos nos tratamentos a plasma e bioquímicos na natureza. O ciclo do nitrogênio se insere nestes

processos bioquímicos, dado que nele ocorre a síntese de íons e moléculas nitrogenadas, presentes em fertilizantes, por meio da ação de bactérias fixadoras as quais são responsáveis por capturar o gás nitrogênio ( $N_2$ ), advindo da atmosfera e certas rotas de decomposição orgânica, convertê-lo em  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$  até transformá-los em amônia ( $NH_3$ ) para ser absorvido pelas raízes das plantas [7,40].

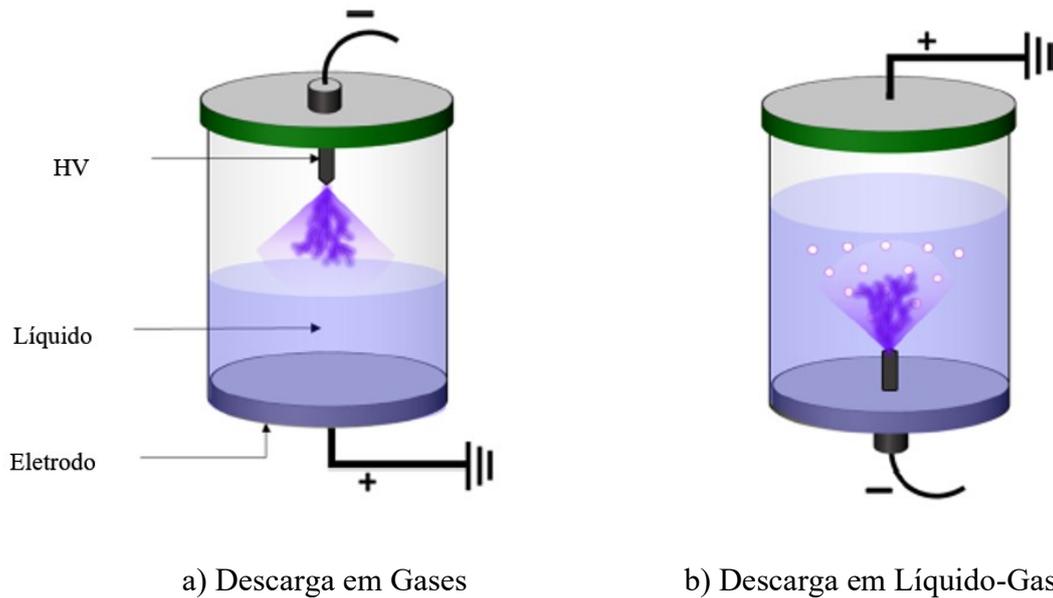


Figura 8. Reator de ativação de líquido por meio de sistema de descarga elétrica em gases (a) e híbrido em líquido-gases. (Traduzido e Adaptado de [39]).

Em sementes do tipo leguminosas, as bactérias fixadoras de nitrogênio (*Rhizobium* e *Bradyrhizobium*) associadas a raízes deste tipo de planta tende a ocorrer com frequência e são essenciais para a rotação de cultura (deixar o solo mais rico em nutrientes nitrogenados, como nitrato e nitrito, para safras posteriores não leguminosas) [41]. O balanço hormonal de algumas sementes e de plantas pode ter o equilíbrio bioquímico alterado pela ação enzimática causada pela maior oferta de certos elementos químicos como potássio (K), fósforo (P) e nitrogênio [42,43]. O elemento químico N recebe o destaque para a interação das RONS de vida longa, devido sua presença na composição dos íons nitrato e nitrito, com a superfície e volume da semente pode alterar o metabolismo enzimático das células no início do desenvolvimento das sementes ao inibir a ação do hormônio ABA (que tem a função básica por atrasar a quebra da dormência para germinação, fechamento os estômatos com intuito de proteção a climas desfavoráveis e contra o estresse hídrico do solo) e promover a ação do foto hormônio GA (ele estimula a germinação e crescimento de caule e floração da planta dado aumento de

concentração dos íons como  $\text{NO}_3^-$  além da radiação luminosa absorvida) [2,6-8,35]. Pela maior oferta destas RONS ( $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$ ), o aumento dos componentes principais da plântula como raiz e caule pode ser favorecido pela maior interação dos íons nitrato e nitrito sobre o mecanismo metabólico da semente que pode aprimorar o processo de síntese proteica das plântulas em seu estágio inicial de desenvolvimento. As principais interações das RONS da água ativada associadas aos processos metabólicos que promovem a quebra de dormência das sementes e crescimento das plântulas estão ilustradas na Figura 9.

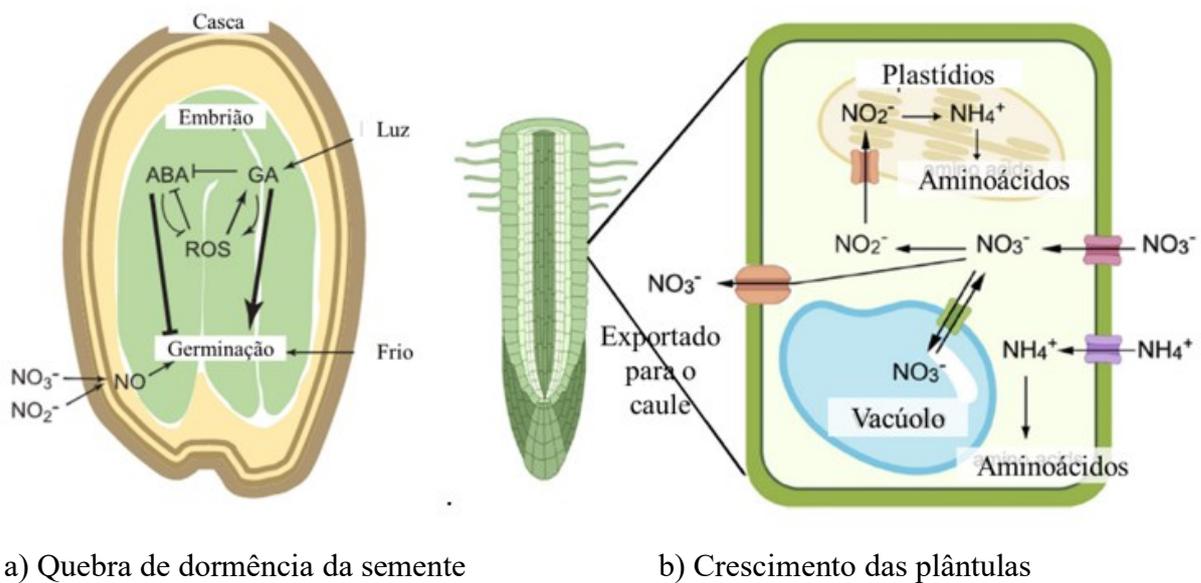


Figura 9. Principais interações das RONS secundárias de interesse ( $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ) na água ativada por plasma que influenciam nos mecanismos metabólicos relacionados com a quebra de dormência das sementes (a) e crescimento de plântulas (b). (Traduzido e Adaptado de [29, 30]).

O estudo do tratamento indireto por meio da água ativada indica que o sistema de descarga de arco deslizante pode ser usado para produzir soluções líquidas altamente oxidantes, que têm aplicações potenciais em vários campos, como tratamento de água e esterilização [44]. Na área agrícola, a aplicação da água destilada ativada por plasma DBD (com fonte de potência com 24 kV/1,5kHz) foi utilizada para imersão de sementes de alface (*Lactuca sativa L*), resultando em taxa de germinação, após 3 dias, e comprimento, 7 dias, significativamente maiores em relação as amostras que foram embebidas em água de controle [45]. Em sementes de trigo sarraceno (*Fagopyrum tataricum*), o tratamento indireto com água ativada (20 min de ativação), por meio de plasma de arco deslizante tradicional (450 W), pode ter provocado o

aumento da taxa de germinação, caule e raiz em relação ao grupo de controle [46]. Certas sementes de beringela (*Solanum melangena L.*) tratadas com água ativada por plasma DBD (10kV/8kHz) por até 8 min obtiveram maiores taxas de germinação em relação às amostras não tratadas [47].

### 2.2.2.1 Água Ativada por Plasma Não-Térmico

A água ativada por plasma é um tipo de processo realizado com plasma não-térmico no qual ocorrem uma série de alterações físico-químicas na água. As RONS podem interagir com a água, causando mudanças em sua estrutura, como a quebra de ligações de hidrogênio e a formação de novas ligações, resultando em mudanças nas propriedades físicas e químicas da água [38,48]. A representação da água ativada por plasma (PAW), em diferentes fases, contendo os principais processos físico-químicos está apresentada na Figura 10.

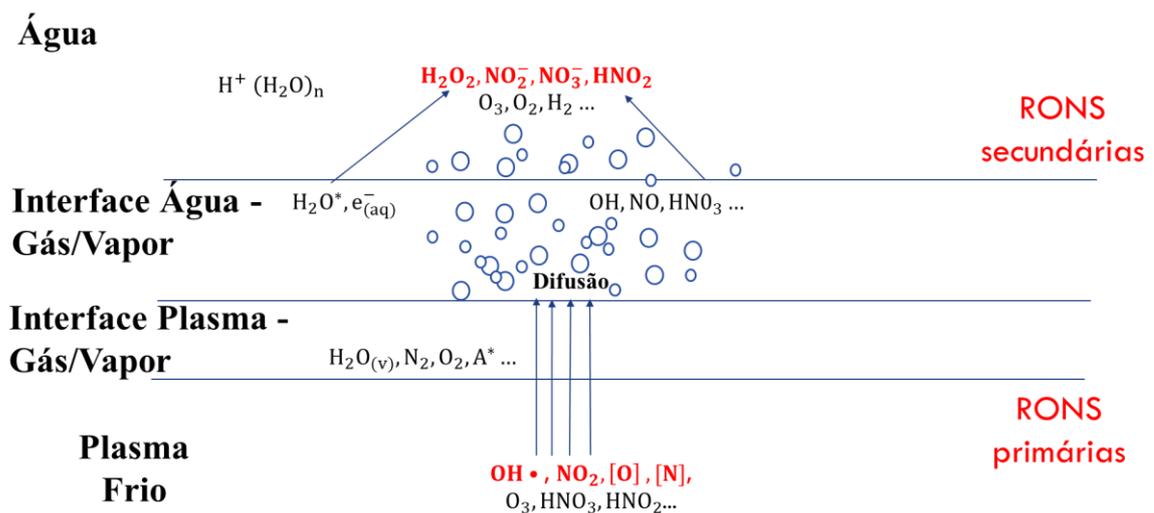


Figura 10. Representação da PAW e principais processos físico-químicos em diferentes fases. (Adaptado de [49]).

A partir da aplicação tecnológica de plasma no tratamento indireto sobre a semente, o estudo relativo aos processos químicos entre o plasma e água ativada (Tabela 1) é de fundamental importância para a compreensão da influência do tratamento indireto em sementes através do uso da PAW.

A Tabela 1 apresenta as reações físico-químicas mais recorrentes no processo de ativação de água por plasma. As reações 1 e 2 são relacionadas a dissociação das moléculas de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) em as espécies de vida curta como os radicais hidroxilas ( $\text{OH}\cdot$ ) devido ao impacto eletrônico direto. Nas reações 3 a 8, os elétrons e radicais  $\text{OH}\cdot$  tendem a realizar reações rápidas com as quais ocorre a formação de espécies mais estáveis como  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$  e superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) e ocasionando um aumento gradativo dos valores de ORP da solução. Os radicais hidroxila apresentam caráter oxidante extremamente alto seguido da espécie de oxigênio reativo ( $\text{O}\cdot$ ) e  $\text{O}_3$  [39], todavia são espécies muito instáveis em líquidos com pouca matéria orgânica e dependentes dos valores de pH para sua estabilidade química na água ativada. Além disso, a espécie de  $\text{O}_3$  tende a reagir com a hidroxila em ambiente de vapor de água e, por isso, certas amostras de PAW indicam que a determinação de  $\text{O}_3$  é pouco significativa dado que sua concentração tende a ficar abaixo do limite de detecção [50]. Enquanto isso, a molécula de  $\text{H}_2\text{O}_2$  apresenta-se como uma primeira espécie de vida longa dado a instabilidade do radical hidroxila. Pelo seu caráter oxidante, o peróxido de hidrogênio promove um efeito antimicrobiano no volume de água ativada por plasma [51].

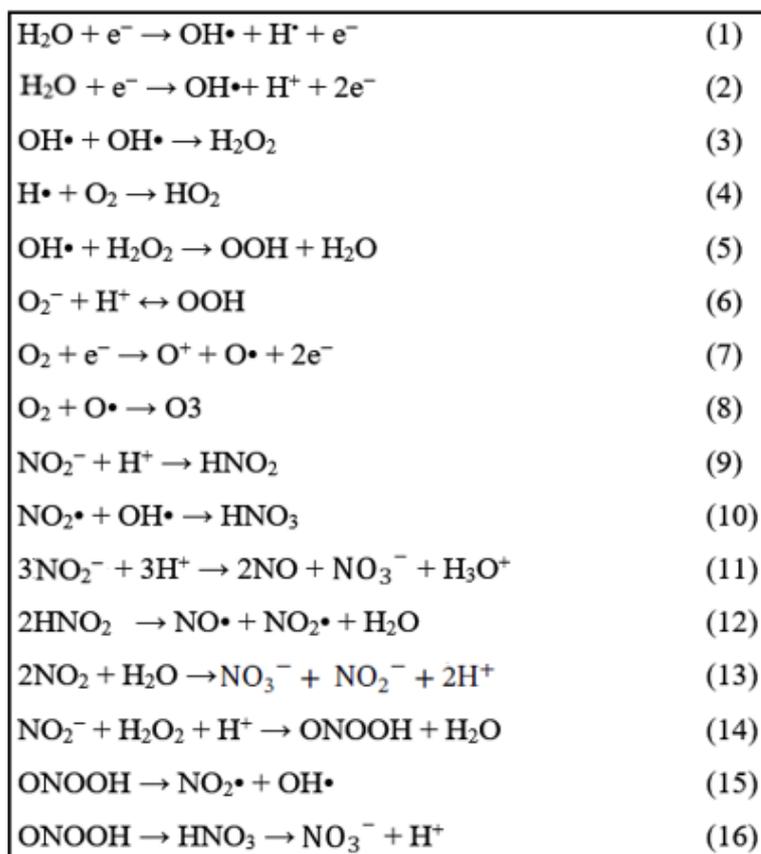


Tabela 1. Principais reações físico-químicas em ativação de água por plasma. (Adaptado de [51]).

A partir da dissociação e ionização do nitrogênio e oxigênio na fase gás/plasma, ocorre a formação de óxido de nitrogênio (NO) em radicais e íons e, quando se difunde na água, forma os ácidos nítrico (HNO<sub>3</sub>) e nitroso demonstrados nas equações 9 e 10 [51,52]. O nitrito é formado a partir tanto da oxidação do NO quanto a captura de elétrons pelo dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) promovido pelo decaimento de pH e, conseqüentemente, gera um aumento da acidez da solução. Já o NO<sub>3</sub><sup>-</sup> pode ser formado por meio de três rotas químicas: primeira rota diz respeito com a reação do íon nitrito com H<sup>+</sup>, a segunda, a dissociação dos ácidos HNO<sub>2</sub> e HNO<sub>3</sub> e, a terceira está relacionada com o aumento da concentração do íon H<sup>+</sup> o que corresponde à queda abrupta do valor de pH da água como pode ser visto nas equações químicas 11, 13 e 16, respectivamente. Este aumento das concentrações dos íons de RONS pode ser indicado pelo acréscimo de condutividade da água durante o processo de ativação a plasma [50,51,53]. Tanto o nitrito quanto o nitrato também são consideradas espécies reativas de vida longa na água ativada por plasma [54].

A formação do ácido peroxinitroso (ONOOH) se dá pela degradação oxidativa do íon NO<sub>2</sub><sup>-</sup> reagindo com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e o H<sup>+</sup> dada pela equação 14. Este tipo de RONS ionizado (ONOO<sup>-</sup>) apresenta um tempo de vida menor do que 1 s e, por isso, é considerado uma espécie de vida curta, fazendo com que o equilíbrio químico das equações 15 e 16 seja deslocado para a formação de espécies mais estáveis como radicais NO<sub>2</sub>• e OH• [16,28]. Estes radicais e o íon NO<sub>3</sub><sup>-</sup> apresentam os maiores valores de ORP [39]. A partir desta cinética química de partículas carregadas e as demais, os parâmetros físico-químicos relativos à condutividade elétrica e TDS tende a aumentar no volume de água ativada por plasma [39, 55]. Dentre as espécies reativas oxidativas, o ONOO<sup>-</sup> apresenta altas propriedades para eliminação de seres patogênicos que ocorre a partir da degradação da parede celular de algumas bactérias e certos fungos dependendo da acidez da PAW [51,56].

Estas alterações físico-químicas do volume da água podem promover um caráter mais eficiente para inativação de micro-organismos patogênicos e remover contaminantes químicos. Certos estudos demonstram uma eficácia do sistema de plasma de nitrogênio e oxigênio do tipo arco deslizante a pressão atmosférica [57,58,59] na geração de espécies oxidantes tanto na fase gasosa quanto na fase líquida, incluindo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, nitrito, nitrato e ozônio [50,60].

### 2.2.2.2 Transferência de Massa por meio de Bolhas em um Reator à Plasma

O plasma não-térmico gera espécies químicas reativas as quais são transferidas para a água e promovem sua ativação. Todavia, essa transferência de espécies reativas na interface gás-líquido tende a ser baixa sem qualquer assistência por agitação e borbulhamento. Por isso, a presença de bolhas microscópicas facilita tal transferência de espécies para o volume de água de forma altamente eficiente, devido à sua alta relação superfície-volume, longo tempo de residência na água, alta pressão interna e agitação induzida pelo seu rápido colapso. Caso o reator seja composto por um arranjo que proporcione essas bolhas, gerará um aumento na área de superfície o que aumentará a probabilidade de reação das espécies reativas de vida curta para a formação efetiva das RONS de vida longa sobre o volume de água ativada por plasma [61]. Na Figura 11, são ilustrados os diferentes tipos de transferência de espécies reativas por meio de bolhas.

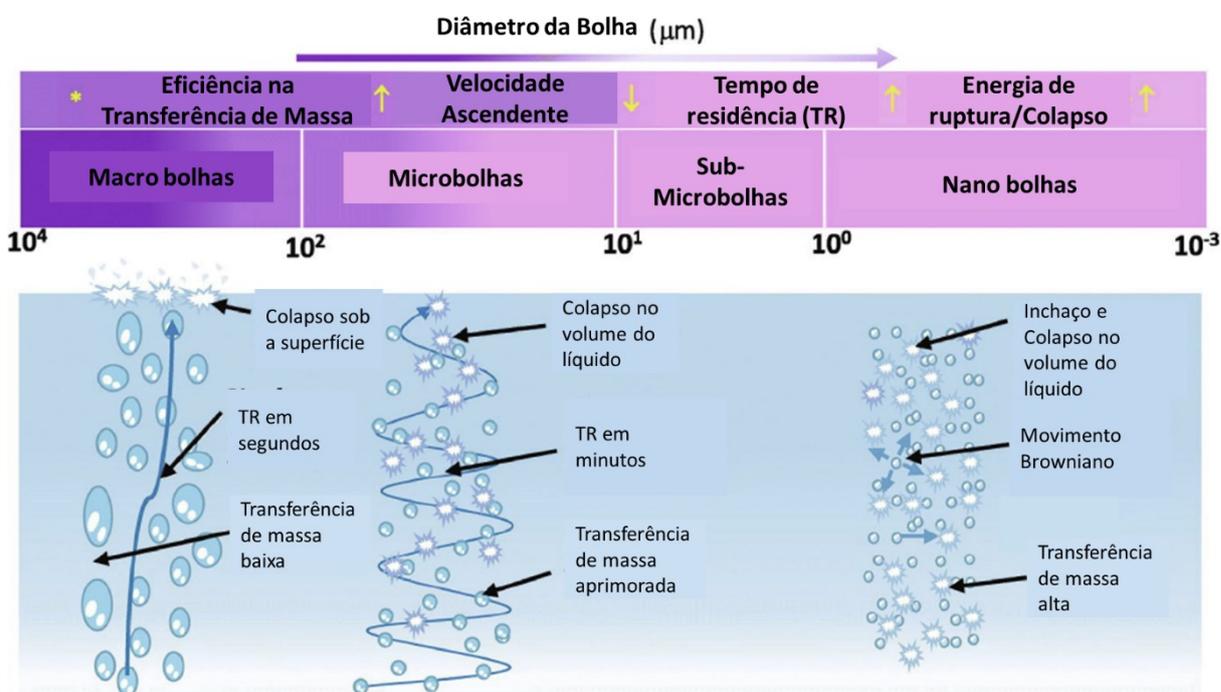


Figura 11. Representação do sistema de transferência das RONS para a interface e volume de água ativada. (Traduzido e Adaptado de [61]).

O movimento e o colapso das bolhas, por meio da agitação externa, podem contribuir para a dispersão das espécies reativas através da interface gás-líquido. Estudos demonstraram

que a presença de bolhas, em estado dinâmico, aumenta a transferência de espécies reativas do plasma para a água [83], resultando em maior eficiência de tratamento indireto das sementes, podendo gerar o aprimoramento da germinação e crescimento de plântulas. Na literatura, a eficiência energética foi de  $1,06 \cdot 10^{-1}$  e  $6,69 \cdot 10^{-2}$  mol/kWh relacionada às RONS ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{O}_3$ ) geradas em 2 L de água ativada por um sistema híbrido de plasma em bolhas formadas por diferentes dimensões de orifícios em 30 min de processo o que indicou maior concentração de espécies oxidantes como o nitrato e nitrito com maior eficiência para inativação de colônias de *Escherichia coli* [62].

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A aplicação de plasma não-térmico no setor agrícola exige um estudo mais apurado em relação à caracterização dos componentes utilizados para o tratamento indireto das sementes de lentilhas à plasma não-térmico atmosférico e o acompanhamento do crescimento das plantas ao longo do tempo em um sistema controlado. O diagrama de blocos elucidada as principais etapas da metodologia deste trabalho na Figura 12.

Primeiramente, esta metodologia inicia-se pela aplicação tecnológica de plasma por meio da análise elétrica primária da descarga em arco deslizante, seguida da caracterização do processo de ativação da água de torneira e avaliar seu efeito inicial de absorção de água ativada por plasma pelas sementes em relação ao controle. As sementes de lentilhas são de um mesmo lote principal de 500 g oriundo do estado brasileiro de Minas Gerais. Intermediariamente, foi realizada a avaliação de possíveis modificações físico-químicas na superfície da casca destas sementes em diferentes condições de tratamento por embebição. Por fim, o estágio de desenvolvimento inicial da lentilha foi observado e analisado, começando pelo preparativo das sementes por embebição em água ativada e controle; seguido do plantio e cultivo de cada grupo amostral que recebeu a sua respectiva água de rega e, com isso, os dados referentes à taxa de sucesso da germinação das sementes e o crescimento de caule e raiz das plântulas foram avaliados após um período de 7 dias.

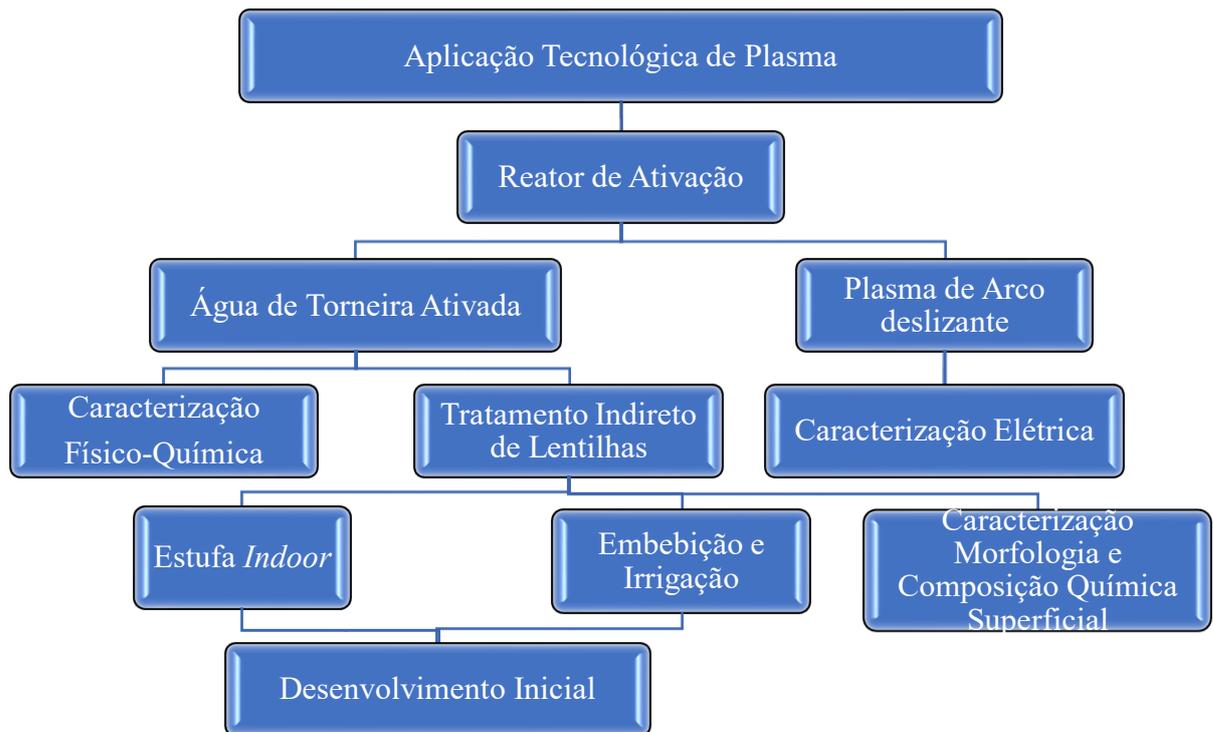


Figura 12. Diagrama das principais etapas envolvidas na metodologia deste trabalho.

Para manter um sistema minimamente controlado, uma estufa *indoor* foi adquirida e equipada com alguns sensores, atuadores e um sistema de controle e aquisição de dados.

### 3.1 Gerador de Alta Tensão

Para a ruptura dielétrica dos gases e a formação do plasma de descarga em arco deslizante à pressão atmosférica, fez necessário a utilização de uma fonte de alta tensão elétrica construída previamente [12] e adaptada. Para isso, foi esquematizado um circuito elétrico relativo ao gerador de alta tensão (Figura 13) que compõe este trabalho. Os testes de continuidade e demais medições elétricas em baixa potência como capacitância, resistência e tensão foram realizados com auxílio de multímetro (ETA, 2082C).

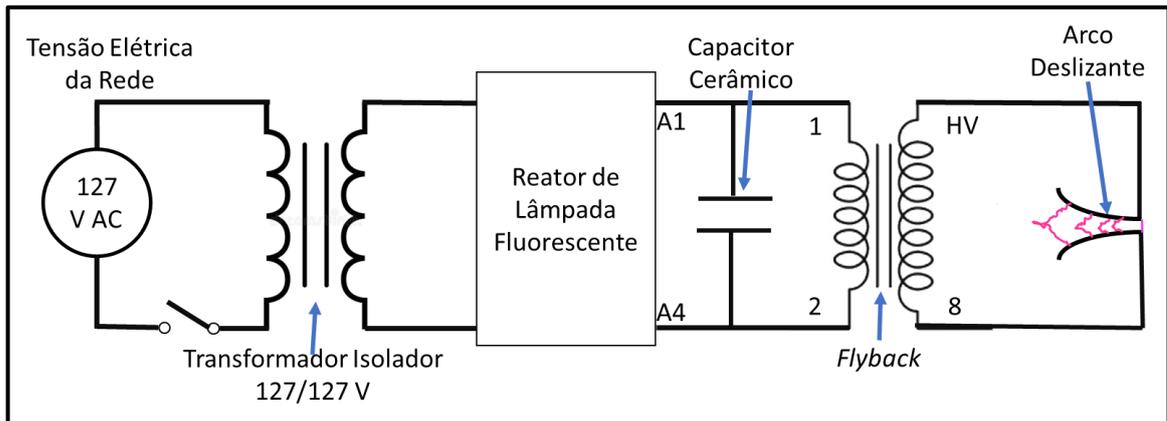


Figura 13. Desenho esquemático do circuito elétrico básico do gerador de alta tensão.

Os elementos que constituem o gerador de alta tensão foram os seguintes: um transformador isolador (127 V/127 V) com a função de atenuar ruídos promovidos pela rede elétrica; um reator de lâmpada fluorescente de 127 V / 30 W (o desenho esquemático simplificado está demonstrado na Figura A.1, vide Apêndice A) o qual trabalhou como uma fonte de potência que, conectado um capacitor cerâmico de  $(3,70 + 0,37)$  nF em paralelo, forneceu a potência para o primário de um conversor *flyback* que foi retirado de um monitor CRT. Este *flyback* pode atuar como um conversor AC/DC e promover a geração de alta tensão nos pinos HV e 8 [63]. As informações das conexões entre os pinos do primário e secundário deste conversor estão presentes no *datasheet* da Figura B.1, vide Anexo - B. Os eletrodos, para formação do arco deslizante, são feitos de cobre e conectados ao secundário do *flyback*. Este conjunto compõe o gerador de alta tensão para obtenção do campo elétrico mínimo entre os eletrodos divergentes e ocasionar a ruptura dielétrica e, mediante o fluxo de ar atmosférico, a formação do plasma de arco deslizante.

### 3.1.1 Caracterização Elétrica da Descarga em Arco Deslizante

A caracterização elétrica da descarga em arco deslizante foi feita com auxílio de um osciloscópio (*InfiniiVision, Keysight*) com taxa de aquisição de 2 G/s e com ponta de prova de alta tensão (Tektronix, P6015A) conforme está indicado nos circuitos para aquisição de dados relativos às tensões e correntes elétricas da Figura 14.

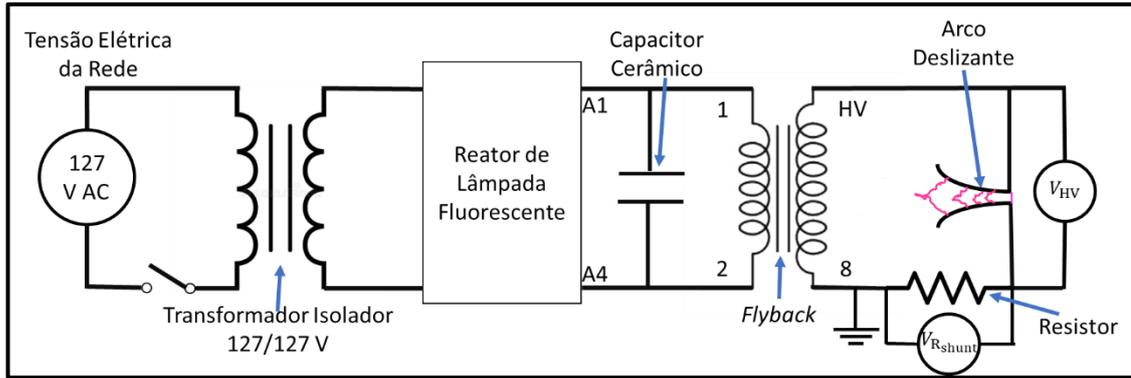


Figura 14. Circuito elétrico para aquisição de dados de potência referentes a descarga em arco deslizante.

Os valores relativos às curvas de alta tensão da descarga em arco deslizante foram aferidos com a ponta de prova em paralelo ( $V_{HV}$ ) e a sua respectiva corrente em série por meio da medida da queda de potencial elétrico ( $V_{Rshunt}$ ) sobre um resistor com seu valor de resistência baixa ( $10 \pm 0,5 \Omega$ ) aplicando a lei de Ohms.

O cálculo de potência dissipada (Eq.1) pela descarga em arco deslizante foi feito a partir dos parâmetros de frequência e as curvas de tensão e corrente em função do tempo.

$$\overline{P}_{dis.} = \frac{f_{descarga}}{n_T} \cdot \int_{t_i}^{t_f} V(t) \cdot I(t) dt \quad (1)$$

Onde:

$\overline{P}_{dis.}$ : Potência dissipada média pela descarga elétrica (W);

$V(t)$ : Tensão elétrica em função do tempo (V);

$i(t)$ : Corrente elétrica em função do tempo (A);

$f_{descarga}$ : Frequência da descarga elétrica (Hz);

$n_T$ : Número de períodos da descarga elétrica;

### 3.2 Reator de Ativação da Água de Torneira

O reator para ativação da água de torneira foi baseado em uma estrutura quase híbrida que se assemelha a certos arranjos experimentais presentes na literatura [39]. Entretanto, este reator, construído previamente [12], apresenta um diferencial ao conter eletrodos fixados na

parte inferior do volume de água ativada e isolados com uma tampa plástica com 12 perfurações de diâmetro de  $(0,85 \pm 0,03)$  mm em cada orifício para a geração de bolhas, sem agitação, com intuito de aumentar a probabilidade de reação das espécies reativas de vida curta. O volume de água de torneira é oriundo do Laboratório de Plasma e Processos em São José dos Campos ( $23^{\circ} 12' 10,51''$  S e  $45^{\circ} 51' 57,57''$  O).

O sistema de ativação foi composto por um plasma de arco deslizante fixado em um tubo de ensaio posto abaixo de um recipiente de vidro, que comportou o volume de 250 ml de água de torneira. A descarga em arco deslizante foi formada entre dois eletrodos divergentes compostos de cobre, uma bomba pequena de aquário que representa o compressor de ar, uma mangueira de silicone a qual conduzia o fluxo de ar atmosférico e um gerador de alta tensão. Estes componentes e o plasma de arco deslizante estão demonstrados na Figura 15.

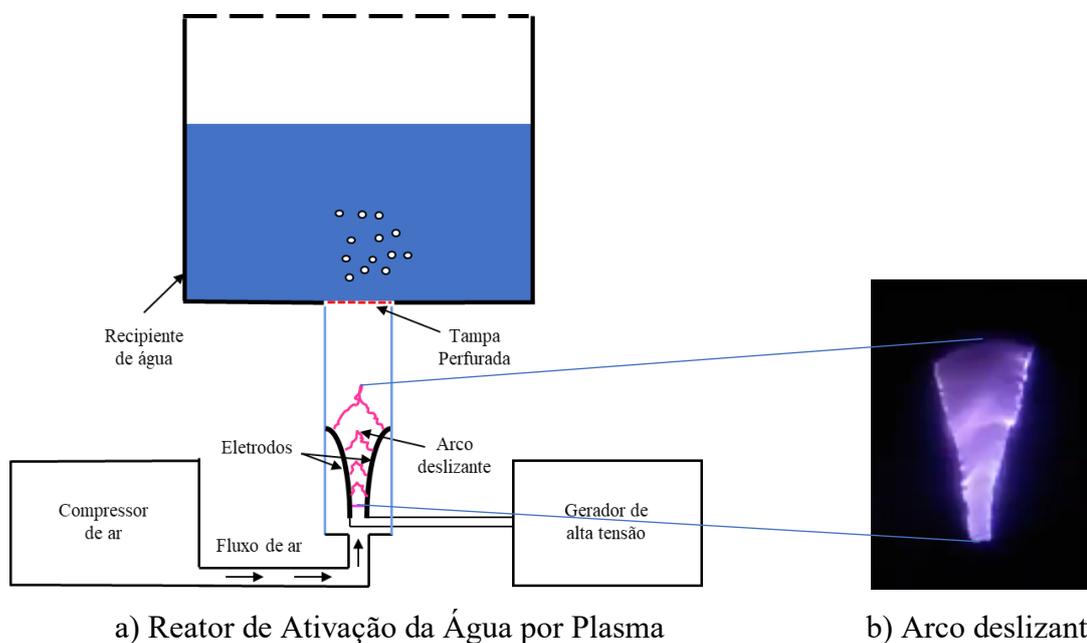


Figura 15. Representação do arranjo experimental para a ativação da água de torneira (a) por plasma de arco deslizante (b). (Adaptado de [12]).

### 3.2.1 Caracterização do Processo de Ativação da Água de Torneira por Plasma

Os métodos de caracterização da água de torneira por plasma foram realizados sob determinadas condições de processo. Em cada período de análise, foi ativado um volume total de água de  $(250,0 \pm 6,3)$  ml; tempo de ativação foi de 180 min; fluxo de ar: 3,2 L/min; distância

entre os eletrodos de 1 a 2 mm e entre a ruptura dielétrica até o recipiente de água,  $(135,45 \pm 0,03)$  mm.

Os volumes amostrais foram coletados do topo e fundo do reator de ativação (Figura 16) com auxílio de seringas de plásticos e colocados em béqueres de vidro borossilicato graduado para serem analisados nos intervalos de tempo de 0 (sem ativação), 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 150 e 180 min de ativação.

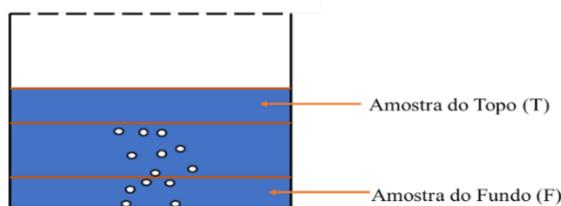


Figura 16. Níveis do topo (T) e fundo (F) do volume total de água ativada (250 ml) relativos às regiões de retirada das amostras para análise.

Com as amostras de  $(50,0 \pm 0,5)$  ml (T e F), os valores do pH, TDS, condutividade elétrica e temperatura da água foram medidos antes e após a ativação por plasma utilizando um equipamento portátil (Combo -5, ASKO) e um instrumento de bancada (PHmetro de Bancada pH 0-14 – K39-1014B, KASVI), ORP.

Para a análise de concentração absoluta relativas às espécies reativas de vida longa no volume de água, foi realizada com auxílio de um espectrofotômetro UV-vis (*Evolution 220, Thermo Scientific<sup>TM</sup>*) com resolução de 1 nm em um volume amostral de  $2,50 \pm 0,01$  ml inserido em um porta-amostra na forma de uma cubeta de quartzo o qual contém caminho óptico padrão de 10 mm.

A partir da concentração absoluta estimada das RONS, é possível obter o parâmetro de eficiência energética do processo de ativação da água de torneira, em mol/kWh [62], conforme é descrito na Eq. 2.

$$\eta_{PATW}(t) = \frac{V_{TW} \cdot n_{RONS}}{M_{RONS} \cdot P_{dis} \cdot t} \quad (2)$$

Onde:

$\eta_{PATW}(t)$ : Eficiência energética estimada das RONS no processo de ativação da água de torneira (mol/kWh);

$V_{TW}$ : Volume de TW (L);

$M_{\text{RONS}}$ : Massa molar total das RONS de vida longa (g/mol);

$n_{\text{RONS}}$ : Concentração absoluta estimada total das RONS de vida longa (mg/L);

$\overline{P}_{\text{dis}}$ : Potência dissipada média pela descarga elétrica (kW);

t: Tempo de ativação (h);

### 3.3 Caracterização da Morfologia e Composição Química Superficial da Semente

A modificação da morfologia e composição química de superfície da casca das sementes de lentilhas foram analisadas por meio das técnicas de MEV/EDS e FTIR das amostras secas (STRA), retiradas de lotes de sementes de lentilhas os quais foram mergulhados em água de torneira (CONT) e ativada (PATW) em 180 min de ativação.

Para as análises por MEV/EDS, as amostras precisaram ser recobertas por uma fina camada de ouro em um processo de deposição por pulverização catódica pelo período de 120 s por meio de uma metalizadora (Quorum, q150R ES). Com as amostras preparadas, foi possível realizar as caracterizações qualitativas de morfologia e composição química superficial através de análises como MEV (Tescan, Vega3) e EDS/EDX (Oxford, X-act) respectivamente, submetendo uma diferença de potencial de 5 kV e com ampliações de 2000x e 10000x. O tratamento de dados resultantes foi feito pelos softwares VegaTC para MEV e AZtec, EDS. Para obter um padrão de morfologia, foram analisadas sementes dentro do lote inicial que não sofreram processo de embebedimento (STRA). Utilizando a metodologia de preparação e análise semelhante ao trabalho realizado na literatura para verificar a estrutura superficial de ervilhas mergulhadas em água deionizada com e sem ativação a plasma [64], após 24 horas de embebedimento. A partir disso, 6 lotes contendo 15 sementes de lentilhas em cada (3 lotes com PATW-180 min e 3, CONT) foram secos, previamente, com papel toalha e, em seguida, colocados no interior de uma estufa de secagem e esterilização à 55 °C por 72 horas e, em seguida, resfriados à 25°C durante 1 dia com o intuito de evaporar o excesso de umidade adsorvida na superfície da casca de sementes dos diferentes grupos amostrais.

Para corroborar os dados obtidos por EDS, as análises de FTIR-ATR foram realizadas com auxílio de um espectrômetro infravermelho (Perkin Elmer, Frontier MIR+SP10 STD), no modo MIR, com resolução de 4 cm<sup>-1</sup> e 32 varreduras/amostra utilizando o programa Spectrum 10. Inicialmente, 6 lotes de sementes (3 de CONT e 3, PATW-180 min) foram preparados de

forma análoga à análise por MEV/EDS e secadas parcialmente com papel toalha e, definitivamente, 55°C por 3 dias e 25 °C em 24 h. Em seguida, outros 6 lotes foram secados sob a temperatura de 27 °C por 1 dia. Com auxílio do acessório ATR, certas amostras de STRA, CONT e PATW foram posicionadas na região central e fixadas com a pressão suficiente para atenuar o efeito de reflexão da radiação infravermelho.

### **3.3.1 Taxa de Absorção de Água pelas Sementes**

A investigação sobre a taxa de absorção de água pela superfície da casca de sementes de lentilha ocorreu a partir de 5 lotes, com 15 sementes cada um, foram mergulhados em volumes de água em diferentes valores de pH após o processo da ativação por plasma. A massa inicial média dos grupos foi de  $(0,07 \pm 0,01)$  g mensurada em uma balança analítica (Mettler Toledo, AB204). Cada lote foi submerso em um porta-amostra com volume de água na razão 10:1 (relação em massa de água por cada lote de semente). Com isso, os lotes foram submersos por 219 min acumulados sendo a determinação do ganho de massa realizada a cada 3 min no intervalo entre 0 e 30 min, a cada 6 min entre 30 min a 54 min, a cada 10 min entre 54 e 84 min, a 15 min entre 84 e 99 min, a cada 30 min entre 99 e 159 min e, finalmente, a 60 min entre 159 e 219 min. Em cada período acumulado, a medida de diferença da massa final (conjunto água e lote de sementes) pela massa inicial do lote seco foi obtida para determinar a massa de água absorvida pelas sementes. Os detalhes do ajuste de curva de porcentagem de água absorvida pelas sementes para obter os índices relativos a esta taxa estão descritos na Seç. 4.2.

### **3.4 Tratamento Indireto das Sementes de Lentilha**

O volume total de PATW (250 ml), citado na Seç. 3.2, foi escolhido devido ao alto número de amostras de lentilhas em cada grupo amostral separado em períodos semanais distintos. O diagrama (Figura 17) elucida as métricas como taxa de sucesso da germinação das sementes e comprimento dos componentes principais da plântula os quais possibilitam avaliar o processo de tratamento indireto das lentilhas por água de torneira ativada por plasma de arco deslizando aplicado deste trabalho.

Os grupos amostrais iniciavam-se após a embebição das sementes e plantados no Dia 0. Em grupos semanais qualitativos (testes) como o LS1 e LS2, foi planejado, inicialmente, a utilização de  $(5,0 \pm 0,1)$  ml de rega por dia (LS1) e intercalados (LS2), sendo este volume amostral coletado e mensurado com auxílio de seringas de plásticos descartáveis para a rega de 44 amostras regadas com PATW e 44, CONT, totalizando 88 amostras por grupo semanal.

A partir do último grupo qualitativo LS3, as amostras foram plantadas na terra dentro de tubos de ensaio de vidro (40 amostras sendo 20 tratadas com PATW-180 min e 20, TW) e bandejas de plástico com divisórias contendo 3 em cada divisão (total de 48 amostras nas quais 24 de PATW e 24, CONT), e os grupos definitivos LS4 e LS6 com o controle de massa de terra depositada em cada divisão dos respectivos porta-amostras com a mesma distribuição de amostras de sementes. Maior detalhamento sobre substrato e porta-amostras está descrito no Apêndice B e C.

Cabe ressaltar que cada grupo amostral semanal qualitativo e definitivo foi composto por 6 lotes de 15 sementes que sofreram um preparativo para o embebição de 3 lotes em PATW por 180 min de ativação e 3 lotes, CONT com razão em massa 10:1 (massa de água por massa do lote de 15 sementes) por 24 horas antes de serem plantadas. /

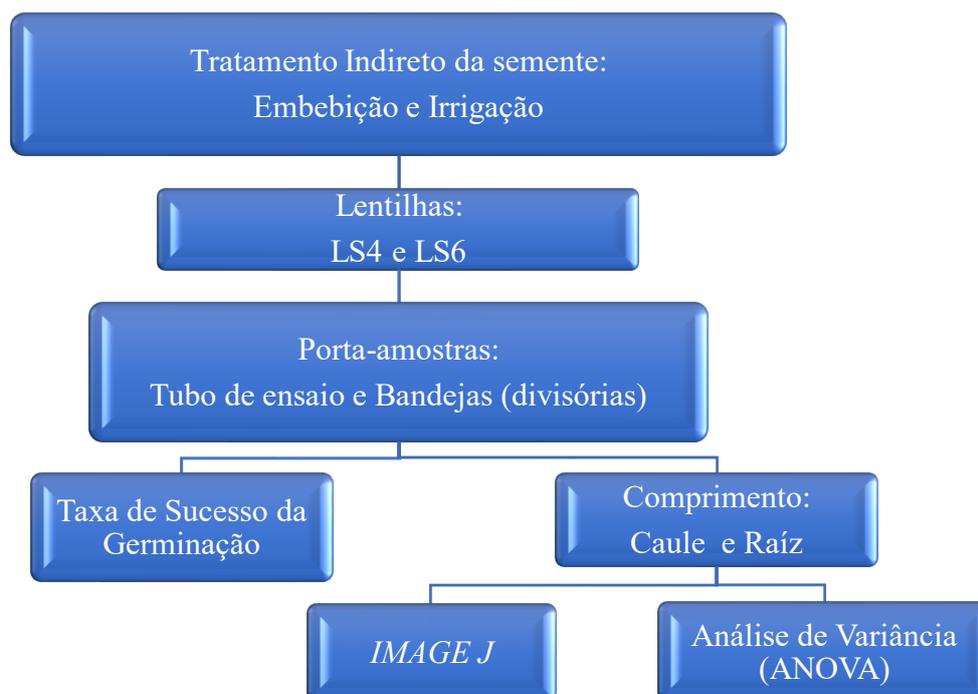


Figura 17. Tratamento indireto das sementes de lentilha e suas métricas (taxa de sucesso de germinação e comprimento de caule e raiz) para avaliar o processo de desenvolvimento inicial desta espécie.

### 3.4.1 Sistema de Desenvolvimento Inicial das Sementes

O desenvolvimento inicial das plântulas por tratamento indireto da semente a plasma não-térmico pode ser avaliado por duas métricas como: comprimento de caule e raiz, além da aferição da taxa de sucesso da germinação ( $\%T_{germ}$ ). Além da métrica primária relativa à germinação, idealizou-se quantificar a razão de comprimento ( $R_{P/C}$ ) entre pares dos grupos de semente (CONT e PATW) para os grupos semanais definitivos sem considerar os de teste. Com isso, os cálculos para as métricas primária e secundária estão descritas nas Eq. 3 à 5:

$$\%T_{Germ_p} = (N_p) * 100\% / N_{T_p} \quad (3)$$

$$\%T_{Germ_c} = (N_c) * 100\% / N_{T_c} \quad (4)$$

$$R_{P/C} = Comp_p / Comp_c \quad (5)$$

Onde:

$Comp_p$ : Comprimento de caules ou raízes referentes às plântulas tratadas com PATW (mm);

$Comp_c$ : Comprimento de caules ou raízes referentes às plântulas tratadas com TW (mm);

$N_p$ : Número de amostras referentes às plântulas tratadas com PATW;

$N_c$ : Número de amostras referentes às plântulas tratadas com TW;

$N_{T_c}$ : Número total de amostras tratadas com TW;

$N_{T_p}$ : Número total de amostras tratadas com PATW;

$\%T_{germ}$ : Taxa de sucesso da germinação das amostras;

$R_{P/C}$ : Razão entre os comprimentos de caules ou raízes das plântulas germinadas em diferentes condições de tratamento com água (PATW e TW);

Quando o  $R_{P/C}$  for maior que 1, o comprimento das amostras tratadas com PATW é maior e com  $R_{P/C} < 1$ , TW.

Para obter uma análise estatística, foi planejado grupos amostrais semanais com o maior número de semente possível em cada grupo. Posto isso, a taxa de sucesso de germinação e comprimento do caule e raiz foram medidos de cada plântula após 7 dias. A partir da métrica  $R_{P/C}$ , foi realizado uma contagem de qual tipo de amostra de semente (PATW ou TW) obteve

os maiores valores em relação aos respectivos pares. Nos tubos de ensaio, esta contagem foi feita com os respectivos pares como P1 e C1 por exemplo, já nas bandejas de plástico, o subgrupo de três sementes em cada repartição foi ordenado de forma crescente em relação ao comprimento e comparados com as respectivas amostras de cada subgrupo adjacente.

A aferição do comprimento de caules e raízes foi realizada com auxílio de um programa chamado de *IMAGE J* no qual, ao se inserir uma escala de  $(20,00 \pm 0,03)$  mm estabelecida por meio de um paquímetro analógico, é possível obter os valores de comprimentos por meio de traçados feitos no modo “Linha à Mão Livre” (“*Freehand Line*”) oferecido pelo este *software*. A análise estatística e plotagem de dados, juntamente com outros parâmetros do sistema de desenvolvimento da lentilha, está descrita e detalhada no Apêndice C.

Antes da medição do comprimento de caule e raiz, um registro diário foi realizado em relação ao desenvolvimento inicial das plântulas por meio de fotos tiradas com uma câmera simples de celular e com auxílio de um suporte adaptável. Este suporte é composto por um tripé de celular ajustável que foi colocado a uma distância de  $(33,00 \pm 0,05)$  cm, com altura 1  $(29,00 \pm 0,05)$ , para fotos de vistas frontais das amostras nos tubos de ensaio e altura 2  $(27,00 \pm 0,05)$  vista frontal e altura 3  $(34,00 \pm 0,05)$  isométrica das amostras de plântulas nas bandejas. O detalhamento de confecção da estufa indoor com as amostras, atuadores, sensores e microcontrolador está descrito no Apêndice C.

## 4. TEORIA METODOLÓGICA

Este capítulo tem por objetivo a descrição das teorias essenciais e outros detalhamentos para justificar ou embasar os processos e análises presentes no Cap. 3.

### 4.1 Análise por Espectrofotometria UV-vis

As bandas das RONS de vida longa como  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$  se sobressaem na contribuição no grau de absorbância dentro do espectro ultravioleta e parte do começo do visível (190 ao 340 nm) [54]. Com intuito de caracterizar componentes químicos que afetam o processo de germinação de sementes, esta análise priorizou a verificação da possível geração de

moléculas de maior influência na água ativada como  $H_2O_2$ , íons  $NO_3^-$  e  $NO_2^-$  as quais apresentam bandas de absorção concentradas na região entre 200 nm e 250 nm e o ácido  $HNO_2$ , 280 nm a 460 nm [15,25-27,65] e observar a evolução de suas concentrações absolutas ao longo do tempo de ativação.

Este processo de verificação e evolução das espécies reativas geradas no volume de água ativada foi realizado através do método proposto por [66]. Nesta metodologia, é proposto um modelo matemático para estimar o aumento de concentração de certas moléculas e radicais livres em solução aquosa, em mg/L, em função do valor de intensidade de absorbância nos comprimentos de onda 230, 235 e 250 nm para as espécies de íons  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  e  $H_2O_2$  respectivamente. É esperado que este método possa reduzir os erros absolutos entre os valores experimentais e calculados [66]. Para obter os valores de concentração das espécies reativas, foram utilizados os cálculos presentes nas seguintes equações.

$$A_\lambda = \alpha[NO_3^-] + \beta [NO_2^-] + \varepsilon[H_2O_2] \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} [NO_3^-] \\ [NO_2^-] \\ [H_2O_2] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha(\lambda_1) & \beta(\lambda_1) & \varepsilon(\lambda_1) \\ \alpha(\lambda_2) & \beta(\lambda_2) & \varepsilon(\lambda_2) \\ \alpha(\lambda_3) & \beta(\lambda_3) & \varepsilon(\lambda_3) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A_{\lambda_1} \\ A_{\lambda_2} \\ A_{\lambda_3} \end{pmatrix} / l \quad (7)$$

Onde:

$\alpha$ ,  $\beta$  e  $\varepsilon$ : Coeficientes de absortividade molar;

$l$ : Comprimento do caminho óptico (m);

$A_\lambda$ : Intensidade de absorbância em relação ao comprimento de onda específico (u.a);

$\lambda$ : Comprimento de onda (nm);

A partir das Eq. 6 e 7, os valores estimados de concentração absoluta das RONS puderam ser obtidos em relação à intensidade de absorbância nos comprimentos de onda citados.

A concentração do ácido  $HNO_2$  e  $NO_2^-$  está relacionada com o valor de pH e  $pK_a$  da primeira espécie, sendo que a constante citada possui o valor de 3,38, aproximadamente, à temperatura ambiente [52]. Em conjunto com as Eq. 5 e 6, o cálculo para obter o valor da concentração absoluta de  $HNO_2$  é descrito na Eq. 8.

$$[HNO_2] = [NO_2^-] / 10^{(pH - pK_a)} \quad (8)$$

Complementando a informação sobre esta espécie de caráter ácido, a indicação da presença de HNO<sub>2</sub> pode ser realizada à medida em que a curva espectrofotométrica adquire um aspecto ruidoso ou estrepitoso na região entre final da faixa do ultravioleta e o início do visível (280 a 460 nm) [52,53].

#### 4.1.1 Análise da Taxa de Absorção

A taxa de absorção de água é um dos índices primários que podem influenciar no processo de germinação de sementes. Na literatura, observou-se que a temperatura da água é um dos parâmetros físicos que pode afetar a capacidade de absorção de água [67], além dos tratamentos de superfície utilizando ozônio [68] e jato de plasma [33] podem aprimorar tal efeito de absorção.

Com isso, o processo de embebedimento de água pelas sementes foi observado a partir da separação de dois grupos: o primeiro grupo composto por lotes de lentilhas mergulhadas em volume de água de pH 6,68, o segundo, 5,27 e o terceiro, 4,00. A análise primária da taxa de absorção da água em função do tempo acumulado de embebedimento (%M<sub>t</sub>), realizada neste trabalho, foi análoga a metodologia apresentada no periódico publicado na literatura [68]. A partir desta referência, cada grupo amostral foi separado em 5 lotes contendo 15 amostras de sementes de lentilhas em cada lote. Antes de serem mergulhadas, cada lote teve sua massa inicial (m<sub>i</sub>) mensurada em uma balança analítica (Mettler Toledo, AB204). Para isso, as sementes foram mergulhadas em porta-amostras contendo seus respectivos tipos de água de torneira na razão (com e sem ativação) de 10:1 em massa. O porta-amostra específico está demonstrado na Figura 18 no qual contém certos lotes de sementes embebidas. Em diferentes períodos de embebedimento, cada lote de semente foi retirado e seco, parcialmente, com auxílio de uma porção de papel toalha para aferição da sua massa final (m<sub>f</sub>) ao final de cada tempo de embebedimento acumulado descrito na Seç. 3.3.1. Com isso, foi possível realizar, primeiramente, o cálculo de porcentagem de água absorvida (%M<sub>t</sub>), em g/g, o qual é demonstrado na Eq. 9.

$$\%M(t) = \left( \frac{m_f - m_i}{m_i} \right) \times 100 \% \quad (9)$$

Onde:

%M(t): Porcentagem de água absorvida por cada lote de lentilhas (g/g);

$m_i$ : Massa inicial do lote de lentilhas (g);

$m_f$ : Massa final do conjunto água absorvida e lote de lentilhas (g);

$t$ : Tempo de embeбimento acumulado (min);

A partir dos dados de porcentagem de água absorvida pelos lotes de sementes, a taxa de absorção de água foi obtida a partir de um ajuste de curva de porcentagem de água absorvida em função do tempo utilizando a equação do modelo Mitscherlich descrita na Eq. 10 [67].

$$\%M(t) = \alpha (1 - \beta^t) \quad (10)$$

Onde:

$\%M(t)$ : Porcentagem da massa de água absorvida pelos lotes de sementes (g/g);

$\alpha$ : Porcentual máximo de água absorvida;

$\beta$ : Taxa de absorção de água;

A curva de porcentagem de água absorvida e seus respectivos índices associados ao porcentual máximo e à taxa de absorção de água pelo lote de sementes foram calculados para cada grupo contendo água com valores diferentes de pH.



Figura 18. Lotes de sementes mergulhados em água em um porta-amostra específico.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo, os resultados relacionados à caracterização da descarga em arco deslizante, análise dos parâmetros físico-químicos da água ativada e fatores que podem ter influenciado na germinação das sementes estão discutidos e passíveis de comparação com dados presentes na literatura e descritos ao longo dos Cap. 2, 3 e 4.

### 5.1 Caracterização Elétrica

Com intuito de caracterizar a descarga em arco deslizante a partir dos seus valores de tensão e corrente em função do tempo (Figura A.2, vide Apêndice A), foi feita a aquisição de dados relativo à potência dissipada pela descarga de acordo com o esquema elétrico representado na Figura 14.

#### 5.1.1 Descarga em Arco Deslizante Tradicional

A descarga em arco deslizante tradicional foi caracterizada à nível de potência sendo sua curva plotada no gráfico na Figura 19. O estabelecimento do fluxo de ar de 3,2 L/min favoreceu o aumento do comprimento da descarga desde a ruptura dielétrica até atingir o regime não-térmico em desequilíbrio termodinâmico local.

A partir do gráfico contido na Figura 19 e o cálculo contido na Eq. 1, a potência dissipada pela descarga em arco deslizante foi calculada:

$$\begin{aligned}\overline{P}_{\text{dis.}} &= \frac{f_{\text{descarga}}}{n_T} \cdot \int_{-0,5}^{0,5} V(t) \cdot i(t) dt \\ \overline{P}_{\text{dis.}} &= \frac{36,6 \cdot 10^3}{31} \cdot 26,20 \cdot 10^{-3} \\ \overline{P}_{\text{dis.}} &= 30,93 \text{ W}\end{aligned}$$

De acordo com a teoria e os trabalhos experimentais explicitados na Seç 2.1.1, a descarga em arco deslizante tende a dissipar cerca de 80 % de sua potência no regime de plasma não-térmico e, com isso, foi possível quantificar a eficiência energética estimada do processo de ativação da água de torneira (Seç. 5.2.1.2).

Ao aumentar a escala do gráfico relativo à potência do arco deslizante entre o período de -0,30 ms e 0 ms (Figura 20), pode-se notar que a evolução da potência tende a manter os valores de picos próximos à 50 W após uma queda abrupta no primeiro período de descarga em função do tempo.

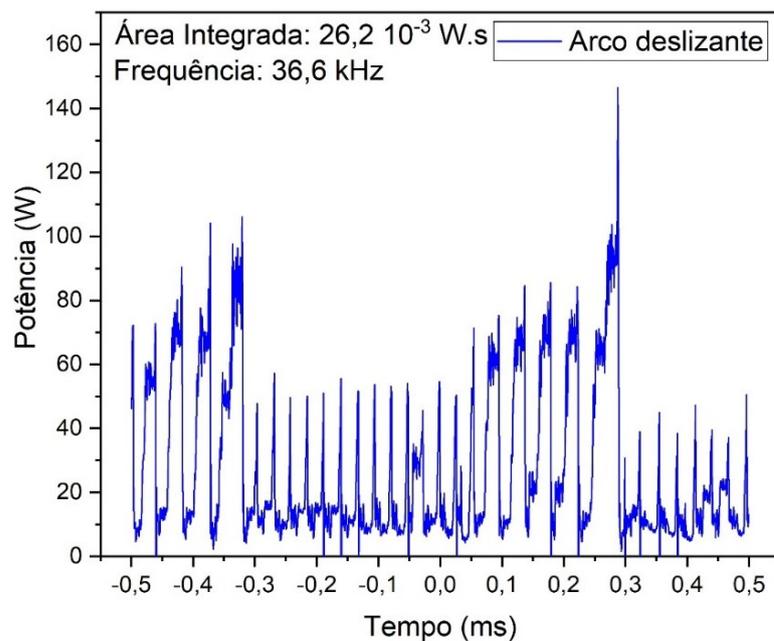


Figura 19. Potência elétrica relativa à descarga em arco deslizante tradicional em função do tempo.

Ao deslocar o eixo do tempo entre 0 ms e 0,35 ms (Figura 21), é observado que a potência tende a aumentar gradativamente, apresentando um comportamento com uma coerência qualitativa ao regime de arco não-térmico (Figura 3).

Este incremento gradativo de potência pode ser justificado pelo aumento do comprimento da descarga desde a ruptura dielétrica até atingir o regime não-térmico. Este comportamento da potência do plasma de arco deslizante tradicional possui certa semelhança aos dados observados em estudos na literatura [69-73].

Vale ressaltar que tal descarga em arco não-térmico dá origem ao um plasma em desequilíbrio termodinâmico local. Com isso, é possível propor, qualitativamente, que haja uma

seletividade química alta para a geração das RONS primárias, fazendo com que apresentem maiores concentrações destas espécies na região de plasma e as RONS intermediárias entre as fases gás/vapor.

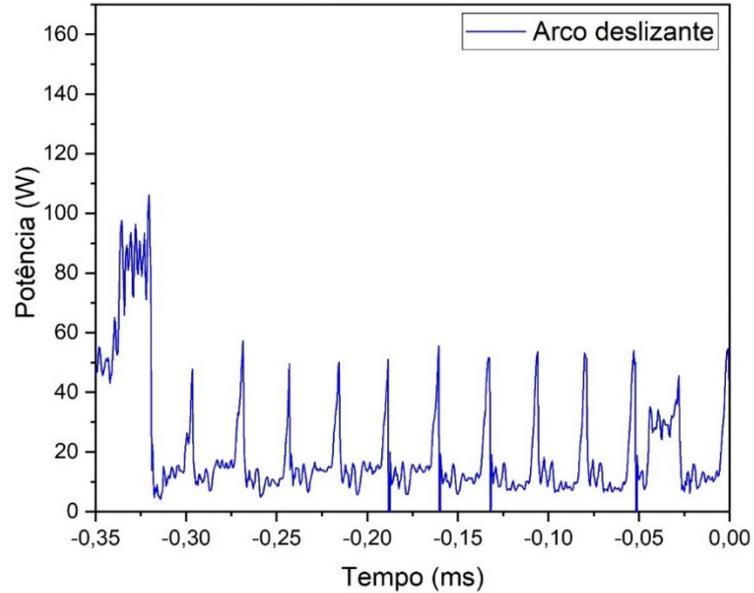


Figura 20. A evolução da potência absoluta com pico próximo à 50 W a partir de -0,30 até 0 ms.

Este tipo de plasma pode ser usado como uma tecnologia para realizar o processo de ativação da água de torneira a qual foi aplicada no tratamento indireto em sementes de lentilha proposto neste trabalho e seus resultados apresentados a partir da Seç. 5.2.

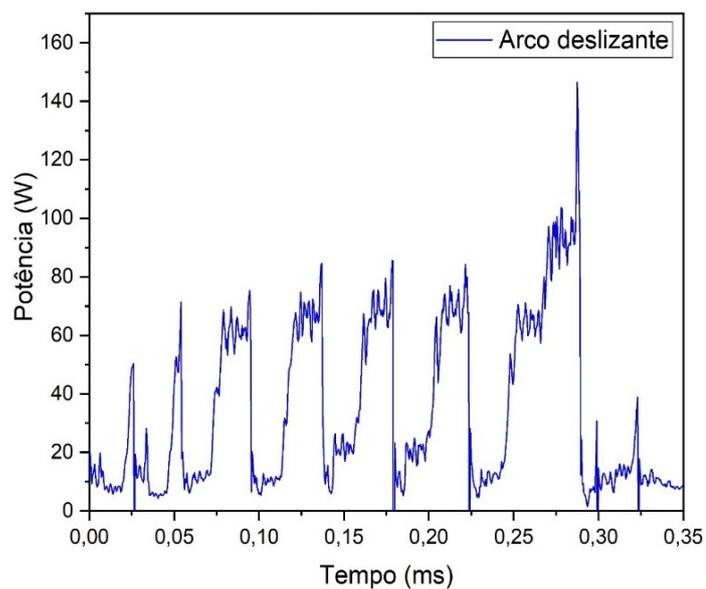


Figura 21. Potência que pode ser relacionada com o aumento de potência dissipada pelo plasma de arco não-térmico do *gliding arc*.

## 5.2 Aplicação da Água Ativada por Plasma de Arco Deslizante

A água ativada por plasma não-térmico foi avaliada em relação aos seus parâmetros físico-químicos e concentrações absolutas das espécies reativas de vida longa durante o processo de ativação por plasma de arco deslizante com a potência dissipada média pela descarga de 30,93 W.

### 5.2.1 Caracterização da PATW

A caracterização da água de torneira ativada foi feita a partir da variação dos valores de pH, condutividade elétrica, ORP, TDS e temperatura mensurados com volumes amostrais em diferentes períodos e dois níveis de altura (Topo e Fundo), sendo estes valores presentes na Tabela C.3, vide Apêndice C. O intuito de medir em dois níveis de altura foi para observar se há diferença significativa entre os valores destes parâmetros físico-químicos ao longo do volume de água. Para ter comparações e discussões mais objetivas, os dados foram plotados em gráficos com características complementares. Além disso, a evolução de concentração absoluta estimada das RONS juntamente com a eficiência energética da PATW foram avaliadas em função do tempo de ativação.

### 5.2.2 Alteração de pH, Condutividade Elétrica, ORP, TDS e Temperatura

A água de torneira ativada por plasma de arco deslizante apresentou valores iniciais de pH e condutividade de  $(6,77 \pm 0,02)$  e  $(0,099 \pm 0,004)$  mS/cm, respectivamente, e os demais dados relativos a estes parâmetros em função do tempo de ativação estão plotados no gráfico da Figura 22. Nos 75 min iniciais, o pH aumentou em relação ao valor inicial e tendeu a permanecer em grau de homeostase próximo do valor de 7,50, adquirindo um caráter básico baixo e, a condutividade elétrica, tendência de acréscimo linear. A partir de 90 min, a curva de condutividade elétrica continuou a aumentar, linearmente, até o final dos 180 min de ativação e o pH tendeu a decair abruptamente, de forma logarítmica, até atingir 120 min de ativação em

que a curva tendeu a uma certa estabilidade próximo do pH 3,70. Dado comportamento pode ser justificado pela formação de íons como  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{H}^+$  dissociados no volume da água, de acordo com a cinética química descrita na Seç. 2.2.2.1 e, com isso, o valor final de condutividade elétrica da PATW dobrou em relação ao tempo inicial aproximadamente.

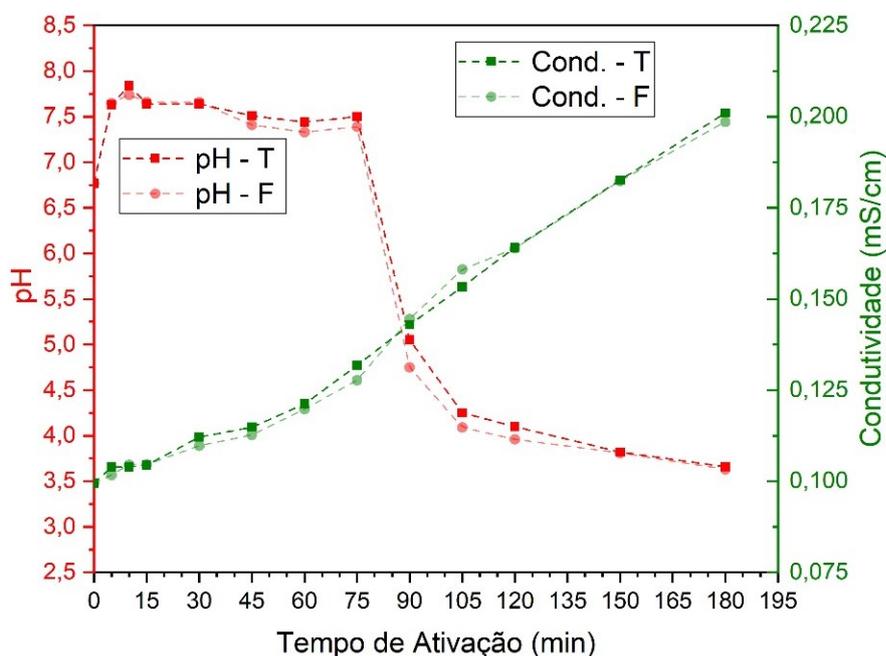


Figura 22. Variação de pH e Condutividade elétrica dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante.

Na Figura 23, é possível analisar que os valores de ORP tendem a evoluir de forma semelhante aos de pH, porém de maneira invertida o que denota um comportamento complementar entre estes parâmetros físico-químicos durante o processo de ativação da água de torneira nos dois níveis (Topo e Fundo). Nos primeiros 75 min, o potencial de oxirredução tende a manter um patamar negativo, próximo à -50 mV, e começou a aumentar, repentinamente, após este período inicial. Tal aumento abrupto pode ser resultado da geração de RONS oxidantes mais estáveis como  $\text{H}_2\text{O}_2$ , sucedido de uma tendência a estabilidade dos valores de ORP a partir de 120 min. Esta estabilidade pode ser explicada devido a reação das espécies reativas menos estáveis como radicais  $\text{OH}\cdot$  e  $\text{NO}_2\cdot$  e um leve consumo de  $\text{H}_2\text{O}_2$  os quais participam da degradação oxidativa que é útil para a continuação da síntese de outras RONS de vida longa como os íons  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$ .

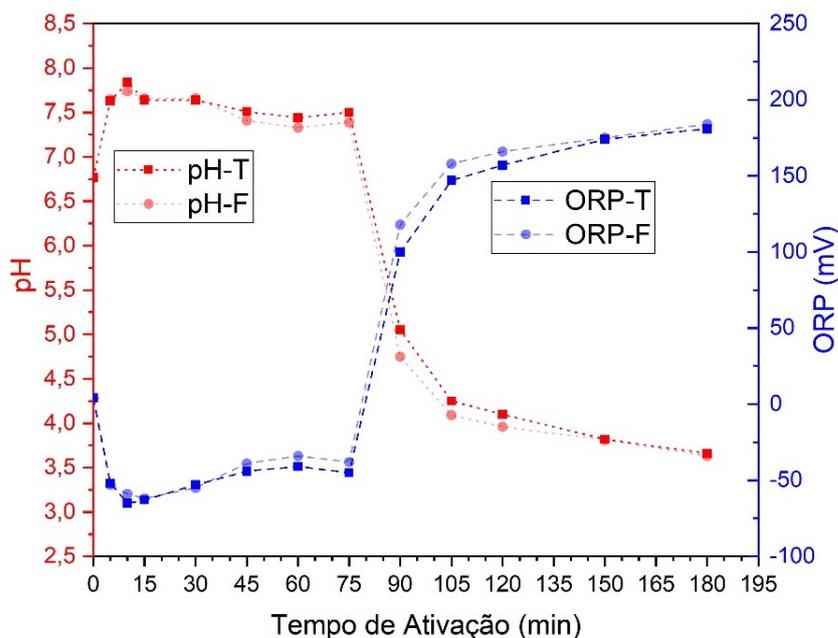


Figura 23. Variação de pH e ORP dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante.

Por fim, os dados de temperatura da água e TDS são apresentados na Figura 24. Pode-se notar que a temperatura da água sofreu um aumento de 5 a 4 °C em relação a temperatura antes da ativação, mas com uma evolução muito caótica diferentemente dos valores de TDS durante o processo de ativação. Esta consideração evidencia a irrelevância da temperatura em relação ao aumento do TDS dado que a temperatura da fase gás/plasma pode ter sofrido uma dissipação de calor maior ao longo do percurso dentro do tubo de ensaio, dado a distância maior que 100 mm em relação com a interface com a água, fazendo com o efeito sinérgico das RONS primárias com o volume de gás, levemente aquecido e arrastado pelo fluxo de ar. A partir deste fluxo e a geração de bolhas contendo as RONS primárias, podem ter ocorrido a formação das RONS secundárias por reação química, sem alta variação de temperatura e, conseqüentemente, aumentando a concentração de TDS.

Portanto, o aumento progressivo de TDS pode ser explicado pela geração das RONS, além da possível dissociação dos minerais, sais, metais e outros compostos presentes na TW e os quais podem ter reagido com as RONS secundárias. Há possibilidade da presença de íons cobre pulverizados do metal que constituem os eletrodos, tendendo a aquecer e volatilizar devido à possível oxidação dos eletrodos ao aquecerem e reagirem com o vapor de água em pressão atmosférica. Tal contaminante pode ter reagido também e, com isso, aumentando os valores TDS e os demais parâmetros na PATW de forma pouco significativa.

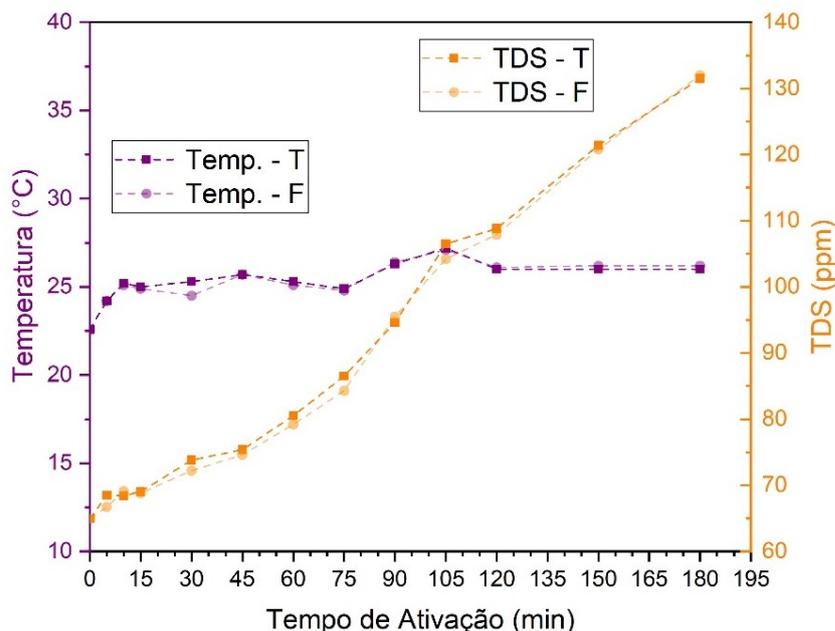


Figura 24. Variação de Temperatura e TDS dos volumes amostrais do topo e fundo (50 ml em cada) retirados do volume total de 250 ml de PATW em função do tempo de ativação por plasma de arco deslizante.

Além da variação destes parâmetros físico-químicos em função do tempo de ativação, os volumes amostrais não obtiveram diferenças significativas em relação aos níveis do topo e fundo do volume total de 250 ml. Isso pode denotar uma boa homogeneidade da difusão das espécies reativas sobre o volume de água de torneira ativada devido ao efeito de borbulhamento. Entretanto, as variações dos valores de pH e ORP foram mais acentuados a partir de 90 min de ativação e isso pode ser justificado pela prevalência de bolhas com dimensões maiores (macro bolhas) e seu rompimento ao nível do topo do volume sem agitação mecânica, gerando um menor tempo de residência das espécies reativas de vida curta e diminuindo a probabilidade de reação e formação das RONS de vida longa em um tempo de ativação menor.

Na literatura, foi possível observar um processo de ativação da água de torneira no qual o volume de 250 ml de TW foi exposto ao plasma de arco deslizante do tipo vórtice, distanciado à 5 mm da superfície e dado processo de ativação realizado com e sem agitação magnética [55]. A partir disso, notou-se que os parâmetros como de pH e ORP tenderam a homeostase em 30 min de ativação sem agitação magnética e uma variação abrupta nos primeiros 25 minutos com agitação magnética. Com isso, a agitação pode ter favorecido o aumento da probabilidade de reação e formação das RONS de vida longa no volume de água de torneira ativada em um tempo menor. Na Seç. 5.2.1.2, esta discussão foi retomada com mais

dados relativos à concentração absoluta estimada das RONS e sua eficiência energética no processo de ativação da TW.

### 5.2.2.1 Concentração Absoluta Estimada das RONS e sua Eficiência Energética

Devido as curvas relativas aos parâmetros físico-químicos em níveis de altura (Topo e Fundo) não tenham demonstrado diferenças significativas entre si, a análise de espectrofotometria da PATW foi restrita apenas para volumes amostrais coletados do Topo do volume total de 250 ml tratado em relação ao controle (TW) determinado como o *baseline* desta análise. A partir disso, as curvas espectrais foram adquiridas nos diferentes períodos de ativação na faixa do ultravioleta e visível (Figura 25).

Na Figura 25, foi possível visualizar a evolução do grau de absorbância das curvas espectrais à medida em que o tempo de ativação aumenta. Dentro da faixa UV, há um aumento progressivo de convolução da curva com aspecto de uma gaussiana e entre à UV e visível, uma outra curva com aspecto mais estrepitoso.

O aumento de intensidade de absorbância, dentro da faixa UV, pode indicar a geração das RONS de vida longa oriundas da ação sinérgica das fases plasma/gás e gás/vapor com interface e volume de água de torneira ativada. A partir de 90 min, é possível notar o alto grau de absorbância das curvas resultantes das quais pode ser consequência da convolução das curvas espectrais de absorbância parciais relativas às espécies reativas de vida longa como  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$  ao longo do período de ativação da água de torneira conforme a explicação realizada nas Seç. 2.2.2.1 e 4.2. Estas curvas de intensidade de absorbância (Figura 25.a), que são resultantes da convolução das curvas parciais relativas às RONS de vida longa, auxiliaram no cálculo para obter os valores de concentrações absolutas estimados destas espécies na solução.

A indicação da presença da espécie ácida  $\text{HNO}_2$  é mais provável de ser detectada dado que este ácido apresenta uma estabilidade química melhor do que  $\text{HNO}_3$  que se dissocia facilmente em  $\text{H}^+$  e  $\text{NO}_3^-$  [74] e tem mais relevância a partir dos 120 min de ativação da água, já que a curva de absorbância tende a obter um aspecto estrepitoso na curva presente no gráfico da Figura 25.b. A partir da relação entre o valor de pKa e concentração de  $\text{NO}_2^-$ , a espécie ácida  $\text{HNO}_2$  pode ter o valor de concentração absoluta estimada em função do tempo de ativação da água plotado no gráfico presente na Figura 26 e os demais dados precedidos nas Eq. 6 à 8, contidos na Tabela 2.

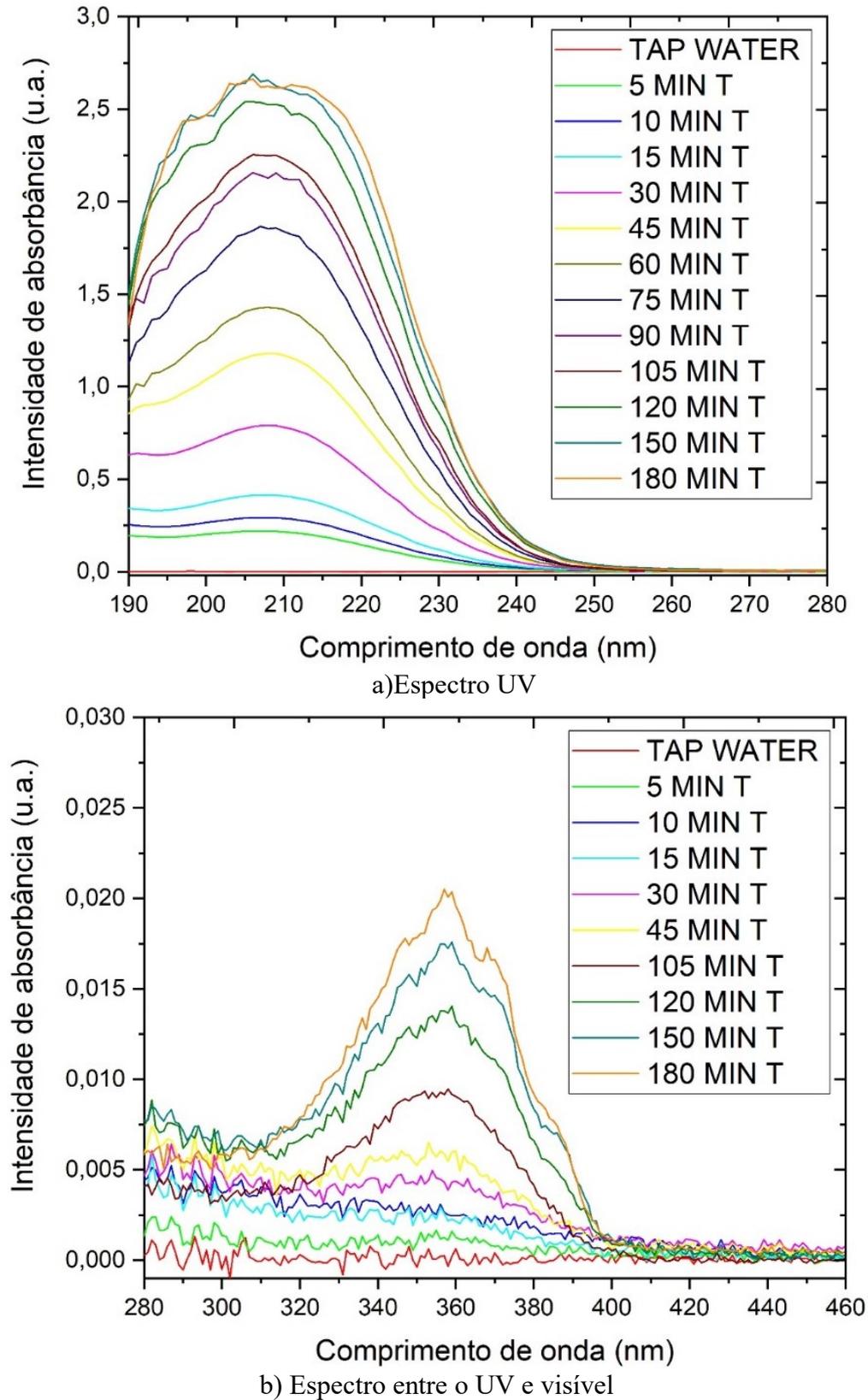


Figura 25. Espectrofotometria de absorvância na faixa do UV (a) e entre UV e visível (b) das amostras retiradas do topo do volume de 250 ml de água ativada por plasma de arco deslizando.

Segundo informações fornecidas pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) [87], as concentrações iniciais de íons  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$  são de 0,05 mg/L e 0,01 mg/L, respectivamente, contidas na água de torneira e obtidas através das análises por espectrofotometria e colorimétrica respectivamente. Até 75 min de ativação (Figura 26), pode-se observar que as concentrações de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$  aumentaram e a espécie  $\text{HNO}_2$  tendeu a zero.

Este resultado foi coerente já que se pode aferir um aumento da condutividade dada a possível presença destes íons dissolvidos e a estabilização do pH da água em torno de 7,50. Entre 75 min e 105 min, a concentração de peróxido de hidrogênio começou a ficar estável e houve um aumento na concentração do ácido nitroso. Esta ocorrência pode ser explicada pelo aumento da degradação oxidativa do íon nitrito ao reagir com  $\text{H}_2\text{O}_2$ , descrita na Seç. 2.2.2.1, fazendo com que ocorra a formação mais evidente do ácido  $\text{HNO}_2$  no volume de água ativada e uma queda abrupta do pH devido a dissociações de espécies de vida curta, como o  $\text{HNO}_3$ , que liberam íons  $\text{H}^+$  na solução. A partir de 105 min, pode-se notar que a espécie  $\text{H}_2\text{O}_2$  obtém concentrações mais altas em relação as demais e, com isso, pode favorecer a ação de desinfecção da água de alguns micro-organismos presentes, além do deslocamento de equilíbrio de algumas reações que formam o íon  $\text{NO}_3^-$ .

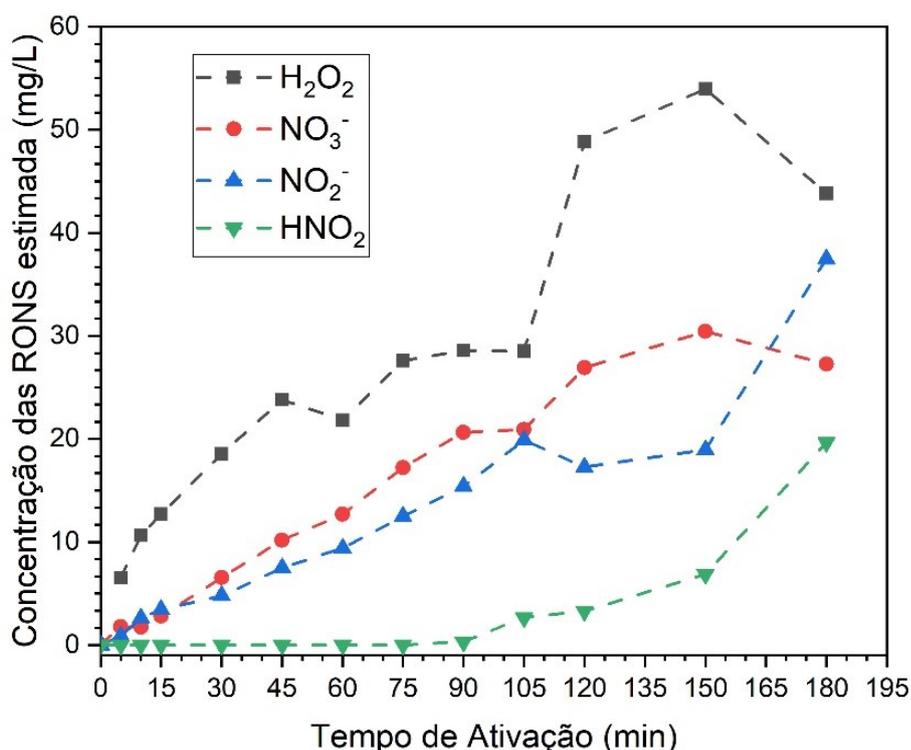


Figura 26. Concentração absoluta estimada das RONS dissolvidas de amostras do topo (2,5 ml) no volume de 250 ml em função do tempo de ativação a plasma por análise espectrofotométrica.

Até o final do período de ativação, as concentrações absolutas estimadas de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HNO}_2$  sofreram algumas oscilações, atingindo os valores 43,81, 37,47 e 27,26 mg/L em amostras de 2 ml retiradas do topo do volume total de 250 ml de PATW durante 180 min de ativação. O aumento de concentração destas RONS pode justificar certos processos de modificação de superfície das sementes ao receber o tratamento indireto pela PATW em 180 min de ativação por plasma. Priorizando o melhor efeito, o período de 180 min de ativação foi escolhido para realização do tratamento indireto das sementes de lentilha, pois obteve o maior valor de concentração total das RONS secundárias dissolvidas no volume de água de torneira como está indicado no gráfico presente na Figura 27.

A partir da Eq. 2, pôde-se obter os valores da eficiência energética das RONS (EERONS) deste processo de ativação em função do tempo ( $\eta_{\text{PATW}}(t)$ ) a qual está descrita no gráfico da Figura 27. É possível notar que a eficiência energética estimada tende a decair, de forma logarítmica, até  $7,98 \cdot 10^{-3}$  mol/kWh com 3 horas de processo enquanto a concentração total ([RONS]) aumenta linearmente. Tal eficiência não se demonstrou tão significativa em relação a dados contidos na literatura [62] e descrito no final da Seç. 2.2.2.2, indicando que a transferência de massa das RONS intermediárias para o volume de 250 ml de TW não foi tão eficiente. Tal consideração pode ser corroborada pela dimensão das bolhas (macro bolhas) e ausência de agitação delas, o que evitou seu colapso e, conseqüentemente, a ruptura no interior do volume de água proveniente da torneira no reator de ativação como foi discutido no final da Seç. 5.2.1.1. Isso pode reforçar a importância da agitação das bolhas dado que tal procedimento tende a aumentar o tempo de residência das RONS intermediárias e, conseqüentemente, gerar uma maior eficiência energética do processo de ativação da TW.

		Concentração (mg/L)			
		$\text{H}_2\text{O}_2$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{HNO}_2$
Tempo de Ativação (min)	0	- - -	0,05	0,01	4,07E-06
	5	6,52	1,79	0,86	4,84E-05
	10	10,63	1,76	2,64	9,16E-05
	15	12,70	2,82	3,45	1,89E-04
	30	18,56	6,53	4,80	2,64E-04
	45	23,83	10,19	7,49	5,55E-04
	60	21,81	12,69	9,40	8,19E-04
	75	27,60	17,21	12,50	9,48E-04
	90	28,58	20,64	15,40	3,29E-01
	105	28,51	20,92	19,88	2,68
	120	48,84	26,91	17,28	3,29
	150	53,95	30,44	18,93	6,87
	180	43,81	27,26	37,47	19,66

Tabela 2. Concentração absoluta estimada das RONS da PATW em função do tempo.

Após a caracterização físico-química, o volume de água ativada foi aplicado nas sementes e seu efeito analisado em duas situações principais. A primeira diz respeito ao preparativo das sementes ao imergir em água ativada e mensurar sua taxa de absorção e possíveis modificações na morfologia e composição química superficial. A segunda situação corresponde a aplicação desta água ativada na irrigação das sementes sobre porta-amostras distintos e avaliar o processo de germinação e crescimento delas após 7 dias de desenvolvimento inicial dentro de uma estufa com sistema de controle do ambiente minimamente estável.

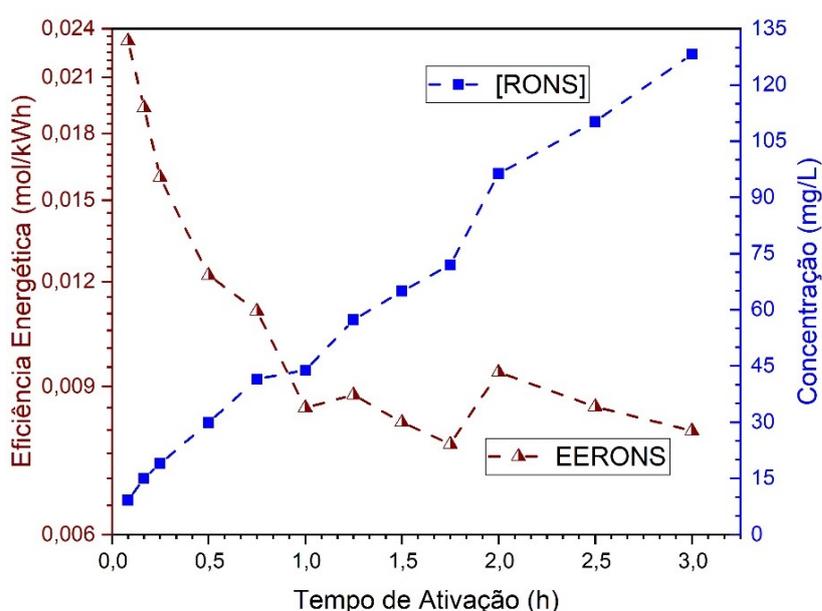


Figura 27. Eficiência energética e concentração total estimadas relativas às RONS formadas no volume de 250 ml de TW até 3 horas de processo de ativação por plasma não-térmico de arco deslizante (30,93 W).

### 5.2.3 Análise da Morfologia Superficial das Sementes de Lentilha por MEV

Seguindo a metodologia descrita na Seç. 3.3, foram aquisitadas as imagens por MEV da superfície de casca das amostras de lentilhas não mergulhadas em água de torneira (STRA), mergulhadas em água de torneira (CONT) e ativada por 180 min (PATW), presentes na Figura 28; sendo que 3 amostras de cada grupo foram selecionadas para verificar, de forma qualitativa, se há diferença em suas morfologias em diferentes condições.

A partir da análise qualitativa destas imagens por MEV da Figura 28, é possível notar que as amostras STRA apresenta uma morfologia de superfície granular com grãos pequenos e

pouco evidentes, denotando uma superfície de celulose pouco rugosa e mais lisa. Já as amostras CONT e PATW evidenciam a formação destes grãos de celulose, obtendo um relevo mais rugoso suas respectivas cascas. Todavia, o espaçamento entre os grãos tende a ser maior nas amostras PATW em relação às CONT, o que pode oferecer uma maior superfície de contato para sementes preparadas em água de torneira ativada. Tal avaliação qualitativa pode ser justificada pela ação dos RONS sobre a membrana celular da casca de celulose o que pode ter alterado a topografia das amostras pelo tratamento indireto com a PATW.

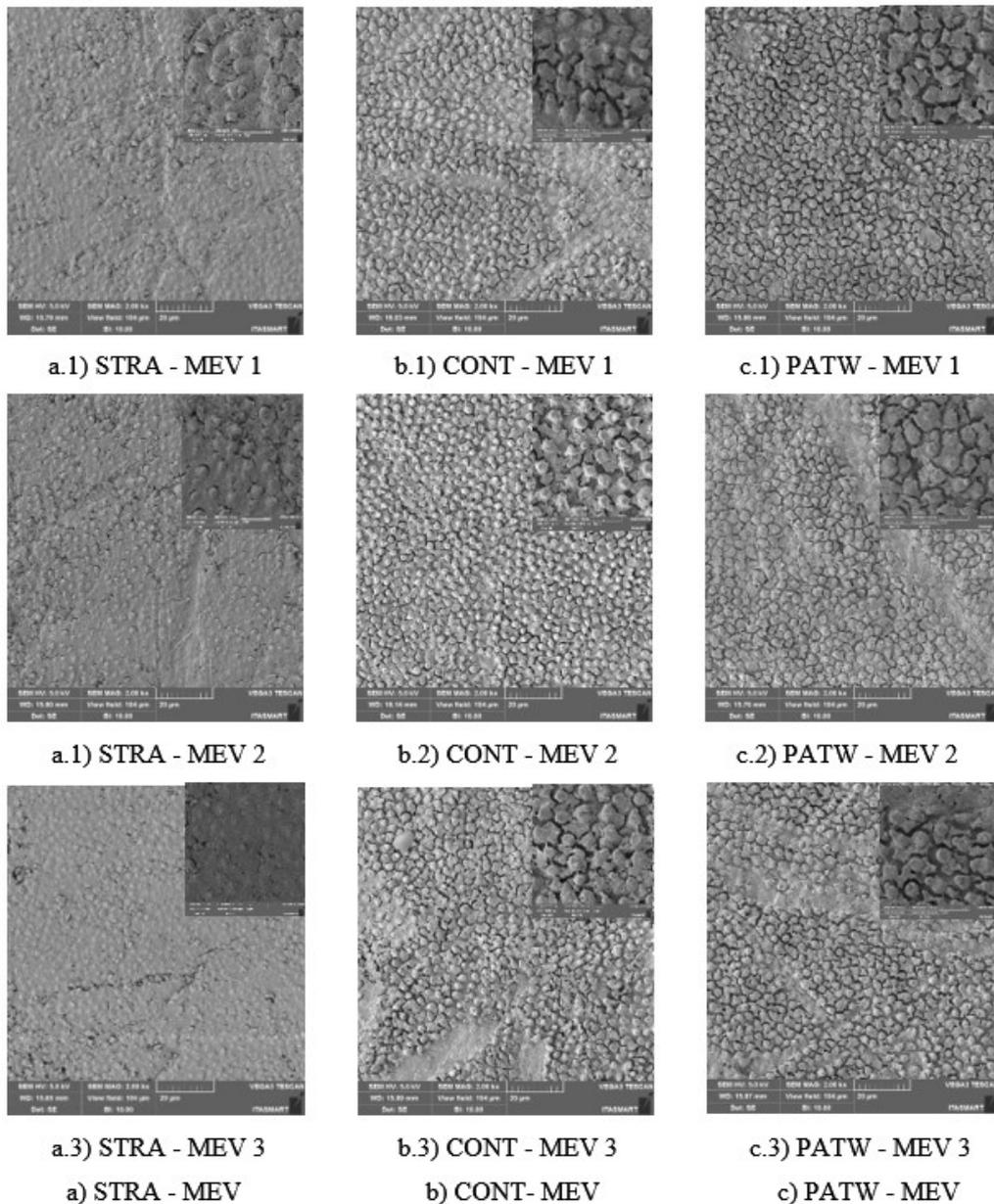


Figura 28. Morfologia da casca da semente de lentilha realizado por MEV em diferentes condições: sem embebedimento em água (a), com embebedimento em água de controle (b) e ativada (c), com magnificações de 2000x (imagem principal) e 10000x (imagem secundária no canto superior direito).

## 5.2.4 Composição Química Superficial da Casca das Sementes

Neste Capítulo, os resultados de composição química superficial da casca de amostras de sementes de lentilhas foram analisados e obtidos a partir das análises por EDS e FTIR.

### 5.2.4.1 Análise por EDS

Analogamente à análise por MEV, a composição química da casca das sementes foi analisada em relação ao espectro de energia dispersiva em raio-X para obter a resposta em um mapa químico dos elementos como C, O, N, Si, Ca e Mg sobre a casca das lentilha em magnificação de 2000x para a legenda colorimétrica na Figura D.1, vide Anexo D e as porcentagens (Wt%) em massa no espectro em magnificações de 100x e 2000x presentes na Tabela 3.

Elementos Químicos	Porcentagem em massa (Wt%)					
	2kx			100 x		
	STRA	CONT	PATW	STRA	CONT	PATW
C	61,8 ± 0,5	61,9 ± 2,2	61,1 ± 0,7	56,3 ± 0,5	57,8 ± 1,5	57,9 ± 1,6
O	34,0 ± 0,6	35,0 ± 2,8	34,4 ± 0,6	38,7 ± 0,7	38,9 ± 1,6	38,3 ± 1,3
N	0,5 ± 0,6	0,7 ± 0,8	2,8 ± 0,3	1,6 ± 1,1	1,4 ± 1,2	2,1 ± 0,7
Si	1,5 ± 0,5	0,9 ± 0,5	0,7 ± 0,3	1,4 ± 0,2	0,8 ± 0,4	0,9 ± 0,3
Ca	1,4 ± 0,4	1,0 ± 0,2	0,7 ± 0,1	1,3 ± 0,4	0,9 ± 0,4	0,5 ± 0,1
Mg	0,9 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,4 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,3 ± 0,2	0,4 ± 0,1

Tabela 3. Porcentagem em massa (Wt%) dos elementos químicos presentes na superfície das amostras de lentilhas detectados via análise por EDS/EDX.

Na Figura 29, o mapa das amostras STRA, CONT e PATW (180 min de ativação) mostraram uma certa desuniformidade da disposição dos elementos químicos sobre a superfície da casca da sementes com topografia correspondentes às imagens obtidas pelo MEV na Seç. 5.2.2, além de não apresentar uma diferença significativa das porcentagens em massa em menor magnificação (100x) para os elementos C, O, Si e a obtenção de alguns valores nulos de porcentagens em massa para o nitrogênio em algumas amostras em ambas ampliações nas amostras STRA (1,6 ± 1,1) e CONT (1,4 ± 1,2), apesar de indicar um aumento da porcentagem de N nas amostras tratadas com PATW (2,1 ± 0,7). Isso pode ser justificado pelo limite de

detecção do equipamento para detectar certos elementos como N e Si principalmente. Contudo, pode-se verificar uma degradação de Ca ao embeber as sementes em TW e PATW em relação as amostras STRA. Além disso, houve uma diferença significativa (valor- $p < 0,05$ ) da porcentagem em massa de N e Ca entre as amostras CONT e PATW, o que pode indicar um alteração mais significativa nas cascas das amostras de lentilha embebidas em PATW em relação às amostras de CONT.

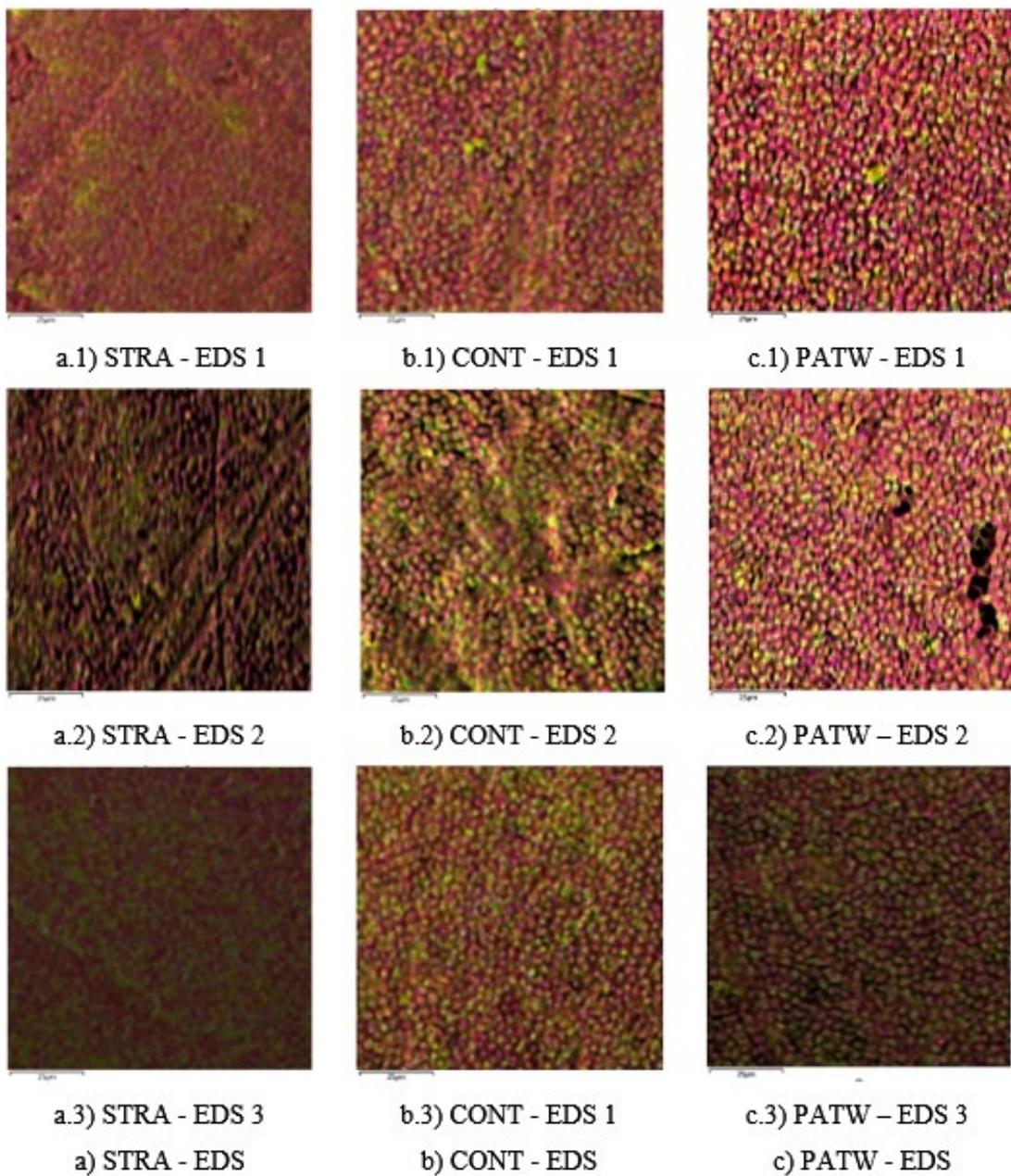


Figura 29. Mapa de composição química da casca da semente de lentilha obtido por EDX em diferentes condições: sem embeбimento em água (a), com embeбimento em água de controle (b) e ativada (c).

Devido ao limite de detecção oferecido pelo equipamento de análise por EDX para elementos como N, C e O, se fez necessário realizar uma caracterização química superficial mais precisa da casca das sementes de lentilha como a análise por FTIR para detectar a energia de vibração ou estiramento das ligações em moléculas que contém estes elementos e corroborar com o possível aumento do elemento químico N observado na porcentagem em massa nas amostras tratadas com PATW em relação às CONT e STRA.

#### 5.2.4.2 Análise por FTIR

A partir da análise por FTIR das sementes, pôde-se fazer a comparação da possível presença de alguns grupos funcionais na superfície de lentilhas através dos espectros amostrais médios em relação às amostras não embebidas como referência (Figura 30); embebidas (CONT e PATW) e devidamente preparadas para esta técnica para uma análise semiquantitativa. Com isso, os espectros amostrais médios foram adquiridos e os picos característicos da energia de ligação foram obtidos através do *software* Origin Graphing&Analysis.

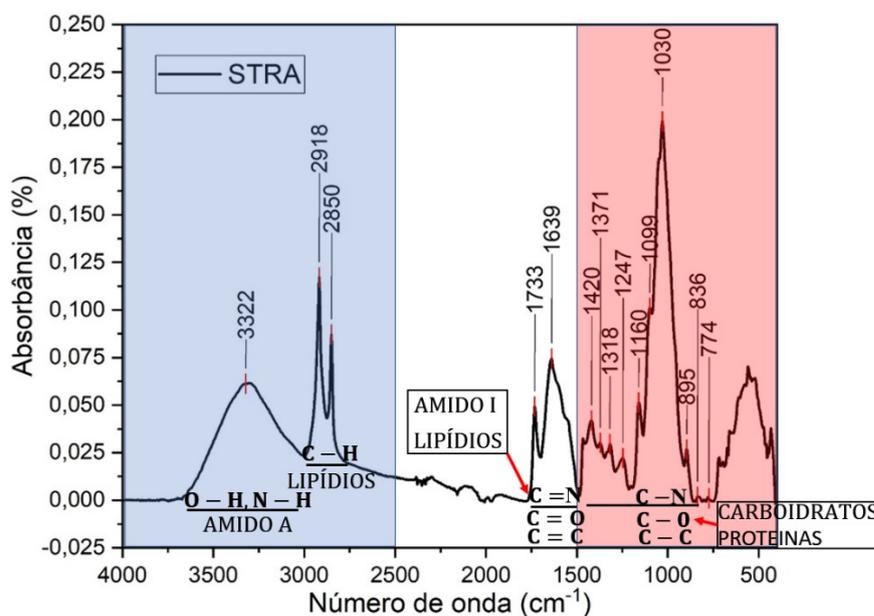


Figura 30. Espectro FTIR médio relativo às 5 amostras de sementes de lentilhas não embebidas (STRA) contendo os picos encontrados através do *software* Origin Graphing&Analysis, além do destaque à região de estiramento de ligação relacionados aos grupos metil, hidroxila, amina e amidas (azul) e a região característica (*fingerprint*-vermelha) relacionados aos macronutrientes sobre a amostra de lentilha analisada por FTIR (MIR).

O pico em  $3323\text{ cm}^{-1}$  está relacionado à vibração de estiramento do elemento hidrogênio ligado ao nitrogênio ou oxigênio ( $-\text{NH}$  ou  $-\text{OH}$ ) presente em grupos funcionais como amina, amida e álcoois [75].

Na Figura 31.a, as curvas espectrais médias de PATW e CONT obtiveram algumas diferenças de absorvância em relação STRA nas regiões azul e vermelha, apesar desta diferenciação ter sido pouco significativa em graus de absorvância entre  $3750$  e  $2500$ ;  $1750$  e  $895\text{ cm}^{-1}$ . É possível considerar que as ligações presentes em grupos carbonilas ( $\text{C}=\text{O}$ ), metila ( $\text{C}-\text{H}$ ) e amina ( $\text{N}-\text{H}$ ) [76] podem ter sofrido um processo de degradação ou reestruturação molecular devido ação de algumas espécies oxidativas ainda presentes em TW e, com maior concentração de RONS, PATW como foi diagnosticado e analisado na Seç. 5.2.1. Entretanto, este processo de degradação ou reestruturação molecular pode ter ocorrido por ação do gradiente de temperatura submetido pela preparação de secagem das amostras dentro da estufa de secagem e esterilização, sendo análoga à realizada na análise por MEV/EDX, podendo indicar uma forte influência da variação de temperatura sobre energia de estiramento das ligações das moléculas presentes nas amostras.

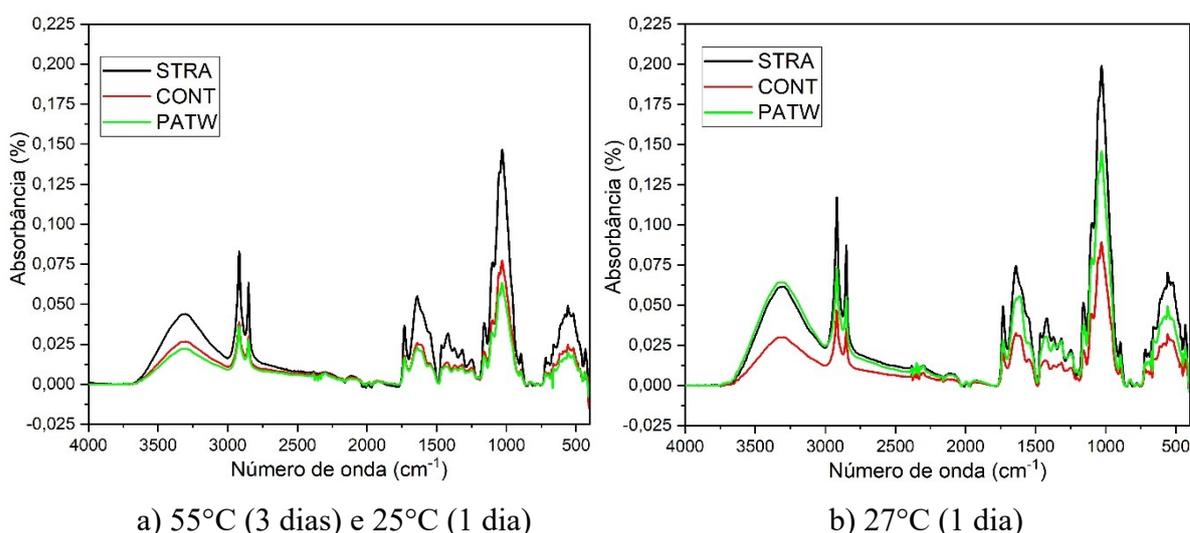


Figura 31. Comparação dos espectros FTIR médios da amostra referencial (STRA) com as demais (CONT e PATW) as quais foram secas com papel toalha, inicialmente, e submetidas a  $55^{\circ}\text{C}$  por 3 dias e  $25^{\circ}\text{C}$ , 1 dia (a); e  $27^{\circ}$  por 24 h (b) para secagem semidefinitiva dentro de uma estufa de secagem e esterilização.

Como a análise por FTIR é considerada não-destrutiva, optou-se também por submeter as amostras à  $27^{\circ}\text{C}$  por 1 dia na estufa de secagem com o intuito de evaporar parte da umidade

de forma menos abrupta da superfície das amostras. A partir disso, observou-se que o formato dos espectros se manteve constante em todas as amostras, todavia pode-se notar certas diferenciações como uma certa elevação gradual no pico de  $3323\text{ cm}^{-1}$  e o decréscimo discreto nos picos  $2918$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  em amostras PATW em relação às STRA inicialmente.

Na Figura 31.b em  $3323\text{ cm}^{-1}$ , o incremento discreto do grau de absorvância nesse pico está relacionado à vibração de estiramento em ligações contendo hidrogênio ligado a nitrogênio (amina) ou oxigênio (hidroxila) [75;76] e tendem a estabelecer fortes ligações de hidrogênio com o aumento de espécies reativas polares de PATW como íons  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e radical  $\text{OH}\cdot$  (derivativo de  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Estas ligações de hidrogênio também podem justificar o possível aumento de porcentagem em massa elementar do nitrogênio sobre certas amostras analisadas por EDS, além do decaimento de absorvância em picos como  $2918\text{ cm}^{-1}$  e  $2850\text{ cm}^{-1}$  nos quais são relacionados às vibrações de estiramento simétrico e assimétrico do grupo metila ( $-\text{CH}_3$ ) que estão presentes em lipídios que possuem caráter hidrofóbico principalmente [75].

Entre  $1750\text{ cm}^{-1}$  e  $1600\text{ cm}^{-1}$ , pode-se observar que os picos de absorvâncias associados às ligações duplas entre carbono-oxigênio que compõem o grupo carbonila ( $\text{C}=\text{O}$ ) como cetonas, aldeídos, ésteres e ácidos carboxílicos ( $1733\text{ cm}^{-1}$ ); além do grupo amida ( $1639\text{ cm}^{-1}$ ) sendo que alguns destes grupos funcionais estão presentes em lipídios e amido I [75], respectivamente, podem ter sido mais degradadas em amostras PATW e CONT em relação às STRA.

Dentro da região vermelha até  $1000\text{ cm}^{-1}$ , pode-se notar o decréscimo de absorvância em certos picos como  $1420\text{ cm}^{-1}$ ,  $1099\text{ cm}^{-1}$  (relacionados aos polissacarídeos presentes na estrutura de celulose) e  $1371\text{ cm}^{-1}$  (grupos aminas) nas amostras embebidas em CONT e PATW o que pode indicar o efeito conjunto de degradação de certas estruturas moleculares em relação ao padrão STRA. Ainda é possível verificar que os picos de  $1318\text{ cm}^{-1}$  (amida III) e  $1247\text{ cm}^{-1}$  (grupos glicosídeos e fosfato I) [75] se mantiveram iguais nas amostras de PATW e STRA e com níveis de absorvância menor em CONT. Para as amostras PATW, o decaimento menor no pico de  $1371\text{ cm}^{-1}$  e a manutenção no  $1318\text{ cm}^{-1}$  pode indicar a permanência maior de compostos que tem forte relação com proteínas e certos carboidratos devido a ação das espécies reativas sobre a estrutura das sementes de lentilha em relação às amostras CONT o que pode corroborar nos dados de EDS e discutidos na Seç. 5.2.3.1.

### 5.2.5 Taxa de Absorção de Água

A taxa de absorção de água pode ser observada a partir da embebição das sementes em água de torneira em diferentes condições de pH. Para controle da análise, o conjunto de 5 lotes de 15 sementes em cada lote os quais foram mergulhados em 3 grupos de água de torneira sendo o primeiro grupo embebido em água sem ativação (Controle) com valor de pH nivelado em  $(6,68 \pm 0,02)$ , o segundo e o terceiro, PATW de pH  $(5,27 \pm 0,02)$  e o  $(4,00 \pm 0,02)$  respectivamente. As curvas relativas à porcentagem de água absorvida foram plotadas no gráfico da Figura 32, os índices obtidos pelo ajuste estão explicitados na Seç. 4.2 e transcritos na Tabela 4. Precedidas das Eq. 9 e 10, pode-se notar que o maior valor relativo ao porcentual máximo de água absorvida pelos lotes de semente foi promovido pelo segundo grupo PATW ( $\alpha = 101,447$ ), antecedido pelo primeiro grupo correspondente ao controle com pH  $(6,68 \pm 0,02)$  e o terceiro de volume de água, pH  $(4,00 \pm 0,02)$ , sendo que todas as curvas obtiveram coeficiente de correlação (R-quadrado) maior do que 0,99. Já o índice  $\beta$ , relacionado à taxa de absorção, indicou um aumento gradual para o segundo e terceiro grupo em comparação ao primeiro no qual tiveram os lotes de sementes embebidos em água de torneira com pH quase neutro. A justificativa para estes resultados pode ser feita em três fatores: o primeiro diz respeito a temperatura da água a qual pode ser um dos parâmetros que influencia diretamente no índice  $\alpha$  [67]. Todavia, a temperatura da PATW obteve uma diferença pouco significativa em relação a TW (Controle), segundo as medidas de temperatura de amostras do Topo e Fundo, estabelecendo uma temperatura ambiente em certa faixa ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como pode ser vista na Figura 24, e, por isso, este fator pode ser pouco significativo na taxa de absorção de água pelas sementes de lentilha neste trabalho.

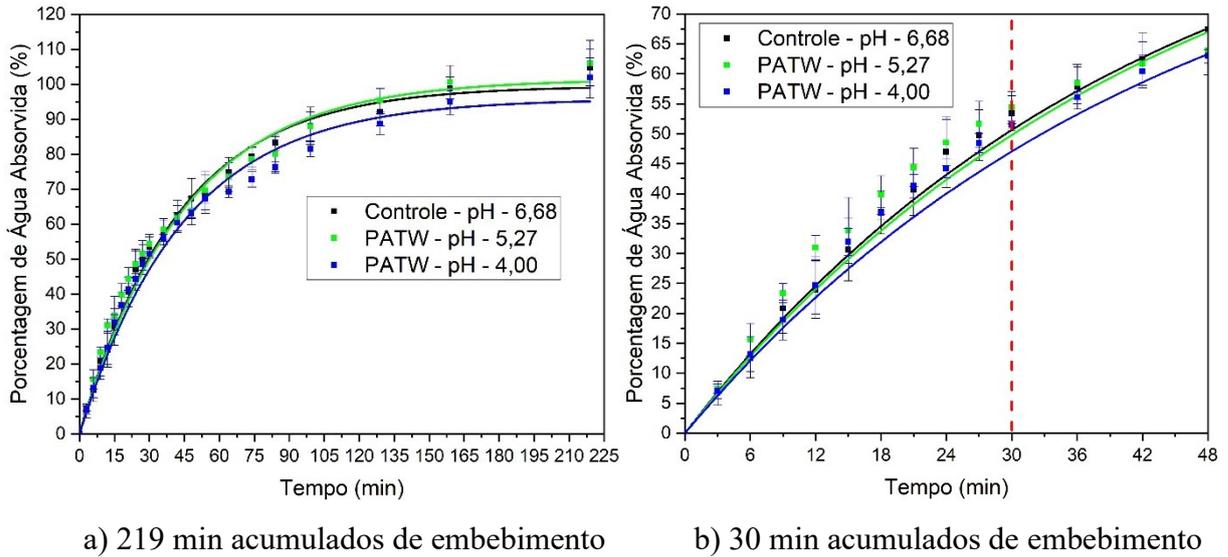


Figura 32. Porcentuais de massa de água absorvida plotados em curvas de ajuste para obter os índices relativos à taxa de absorção e porcentual máximo de água absorvida em diferentes valores de pH pelos lotes de lentilhas em função do tempo total acumulado de embeбimento (a) e nos primeiros 30 min acumulados (b).

O segundo fator está relacionado ao  $\Psi_p$  que representa o efeito de dissolução de solutos na água. A água de torneira tende a ter um  $\Psi_p$  negativo muito baixo ou quase nulo dependendo de seu tratamento prévio e a água DI, tende a zero [24]. Portanto, a taxa de absorção está relacionada com o processo de difusão da água o qual é diretamente proporcional ao  $\Psi_p$  e, por isso a água de torneira tende a ser menos absorvida pela semente em relação à DI.

Contudo, o terceiro fator está relacionado ao decaimento do pH e o aumento do ORP da PATW, dado que estes parâmetros físico-químicos têm relação direta com aumento da concentração de RONS que pode ter alterado a morfologia e composição química superficial da semente de lentilha, como indicaram os resultados e discussões realizados nas Seç. 5.2.1 (caracterização da PATW), 5.2.2 e 5.2.3 (superfície da casca de lentilha) o que pode ter acarretado o aumento gradual da taxa de absorção em comparação ao Controle.

	$\alpha$	$\beta$	R-quadrado
Controle - pH - 6,68	99,543	0,977	0,993
PATW - pH - 5,27	101,443	0,978	0,998
PATW - pH - 4,00	95,815	0,978	0,998

Tabela 4. Dados relativos à absorção de água pelo lote de sementes embeбido em diferentes condições de pH.

## 5.2.6 Efeito da PATW no Desenvolvimento Inicial de Lentilhas

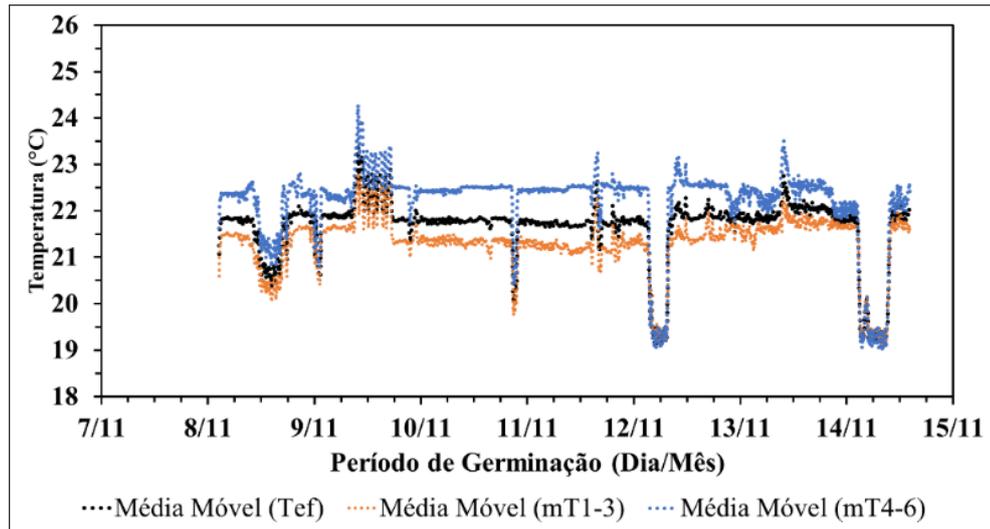
Antes de analisar o desenvolvimento das plântulas de lentilhas, coube avaliar os parâmetros como temperatura e umidade relativa dos grupos amostrais definitivos de lentilha.

### 5.2.6.1 Parâmetros Físicos do Ambiente Interno da Estufa *indoor*

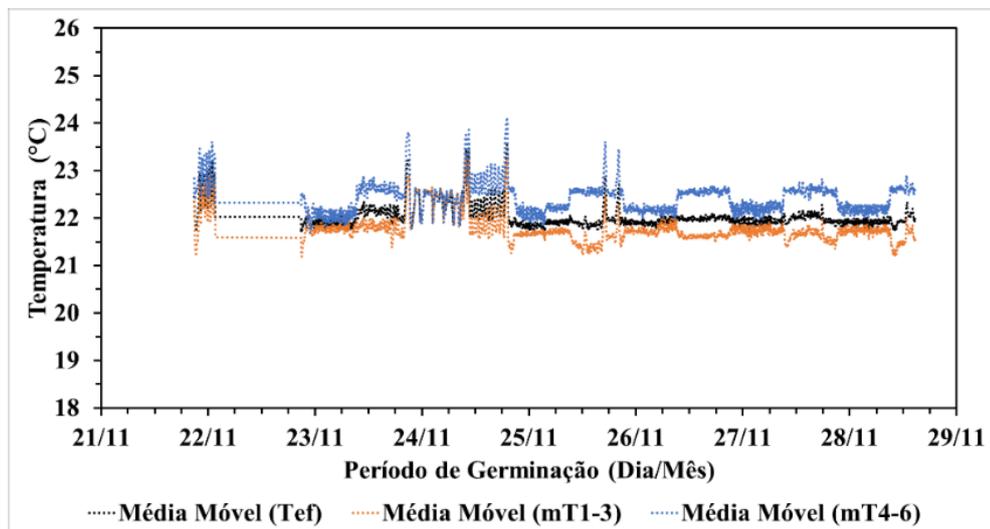
A partir dos testes sem e com atuadores, os parâmetros de temperatura e umidade relativa do ar efetivos precisariam estar em 22°C e na faixa entre 70 e 80 % [77], respectivamente, para garantir um ambiente mais favorável à germinação das sementes de lentilha e o crescimento das plântulas para os grupos amostrais semanais LS4 e LS6. Este controle foi realizado pelo microcontrolador Arduino e as curvas de temperatura e umidade relativa em relação à média móvel dos dados estão plotadas nos gráficos presentes nas Figuras 33 e 34 respectivamente.

Na Figura 33.a, é passível de notar que as temperaturas mT1-3 e mT4-6 obtiveram uma diferença próxima de 1 °C, sendo que as temperaturas mais baixas correspondentes ao nível inferior da estufa *indoor* relativa a mT1-3 oscilaram entre 21 °C e 21,5 °C e no nível superior para mT4-6 entre 22 °C e 22,5 °C, mantendo a Tef mais próxima à mT1-3 durante a maior parte do período entre os Dias 1 e 5 de germinação. Entre os Dias 2 e 3, as temperaturas mT1-3 e mT4-6 apresentaram algumas oscilações as quais podem ser justificadas pelo possível início do estágio de emergência dos caules no qual eles começam a brotar e crescer nos dias subsequentes.

Na primeira metade do Dia 5, foi observado uma queda abrupta que pode ser decorrente de alguma falha no acionamento do aquecedor ou falha no balanceamento com os valores de umidade relativa do ar, voltando ao grau de estabilidade logo em seguida. No Dia 7, houve uma queda nos valores de temperatura que pode ser explicada devido à retirada das amostras para contagem das que foram germinadas e medição dos comprimentos de caule e raiz fora do substrato.



a)LS4

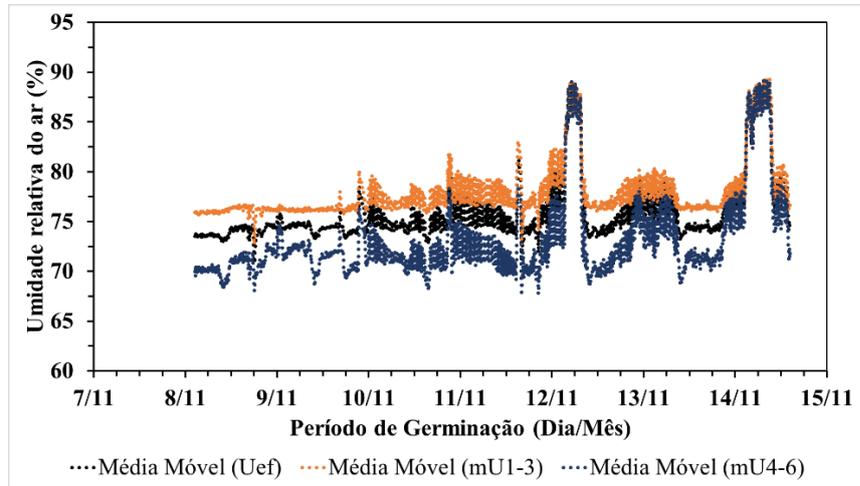


b)LS6

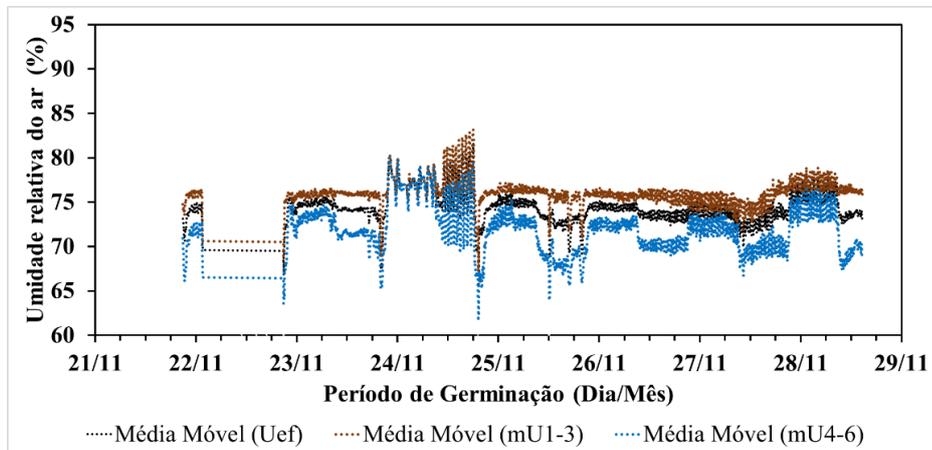
Figura 33. Temperatura em relação à média móvel dentro da estufa *indoor* para o grupo amostral LS4 (a) e LS6(b).

Em relação a umidade relativa do ar para o grupo LS4 (Figura 34.a), a diferença entre a mU1-3 e mU4-3 foi de 5%, mantendo um patamar acima dos 75 % na parte inferior da estufa e 70%, superior; além do valor relativo à Uef permanecer em um patamar acima dos 72,5 % nos primeiros 5 dias. Entre os Dias 3 e 5, certas oscilações na umidade relativa do ar foram registradas e podem ser justificadas pelo início da germinação das sementes ou, simplesmente, pela manutenção de umidade relativa do ar no nível superior da estufa *indoor*. Na primeira metade do Dia 5, os valores de umidade relativa do ar obtiveram um acréscimo súbito o que

pode ser justificado pelo mesmo motivo do decaimento repentino da temperatura até o final do período de 7 dias do experimento.



a)LS4



b)LS6

Figura 34. Umidade relativa do ar em relação à média móvel dentro da estufa para o grupo amostral LS4 (a) e LS6 (b).

Quanto ao grupo LS6, certas variações abruptas foram aquisitadas tanto para os níveis de mTef quanto mUef, entre os Dias 3 e 4, que pode ter relação com o estágio inicial de desenvolvimento das amostras biológicas sendo semelhante ao ocorrido no grupo LS4. A partir do 5º Dia, houve uma certa estabilidade dos valores de temperatura e umidade relativa do ar efetivas próximos de 22°C e 75 %, o que pode ser um dos fatores que propiciou um ambiente favorável para desenvolvimento inicial pleno das plântulas de lentilha.

Em resumo, o controle de temperatura e umidade relativa do ar foi satisfatório dado que a maioria das amostras germinaram nos grupos LS4 e LS6, permitindo que as respectivas métricas relativas à germinação e ao crescimento fossem obtidas e discutidas na Seç. 5.2.5.2.

### **5.2.6.2 Desenvolvimento Inicial das Sementes de Lentilhas**

Com o ambiente minimamente controlado em relação a temperatura e a umidade relativa do ar, o desenvolvimento inicial das sementes de lentilha pôde ser observado nos grupos amostrais semanais definitivos (LS4 e LS6).

#### **5.2.6.2.1 Registro de Crescimento e Taxa de Sucesso da Germinação das Lentilhas**

Os testes iniciais (LS1 e LS2) mostraram que o volume de irrigação de  $(5,0 \pm 0,1)$  ml era muito alto todos os dias, fazendo com que a água transbordasse ou que as sementes ficassem submersas. Por isso, optou-se por diminuir o volume de rega para  $(4,0 \pm 0,1)$  ml em dias intercalados e testado no grupo LS3, com 88 amostras plantadas em substrato de terra em tubos de ensaio e bandejas de plásticos com divisórias, no qual demonstrou mais êxito no quesito de germinação plena das sementes. Com isso, essa metodologia de rega foi mantida para os grupos LS4 e LS6 com o controle de massa de terra depositada em cada porta-amostra.

Os grupos definitivos, correspondentes a LS4 (Figuras 35 e 36) e LS6 (Figuras C.2 e C.3, vide Apêndice C), tiveram o registro fotográfico do desenvolvimento inicial das amostras feito ao longo do intervalo de tempo mínimo (Dia 1 a 7) para realizar uma análise qualitativa da germinação das sementes e emergência dos caules e quantitativa, do crescimento inicial das plântulas a partir da aferição da taxa de sucesso da germinação e comprimento de caule e raiz no Dia 7. O LS3 se mostrou o melhor grupo de teste dado que, no LS1 e LS2, os substratos de algodão e papel de germinação não ofereceram uma base de absorção de água e sustentação suficientes para as amostras, observando que o centro de gravidade de algumas amostras se alterava à medida em que o caule crescia, causando a inclinação da amostra e a perda de contato da raiz com o substrato umedecido e, por isso, causou prejuízo no registro fotográfico de germinação e a avaliação de crescimento destas amostras.

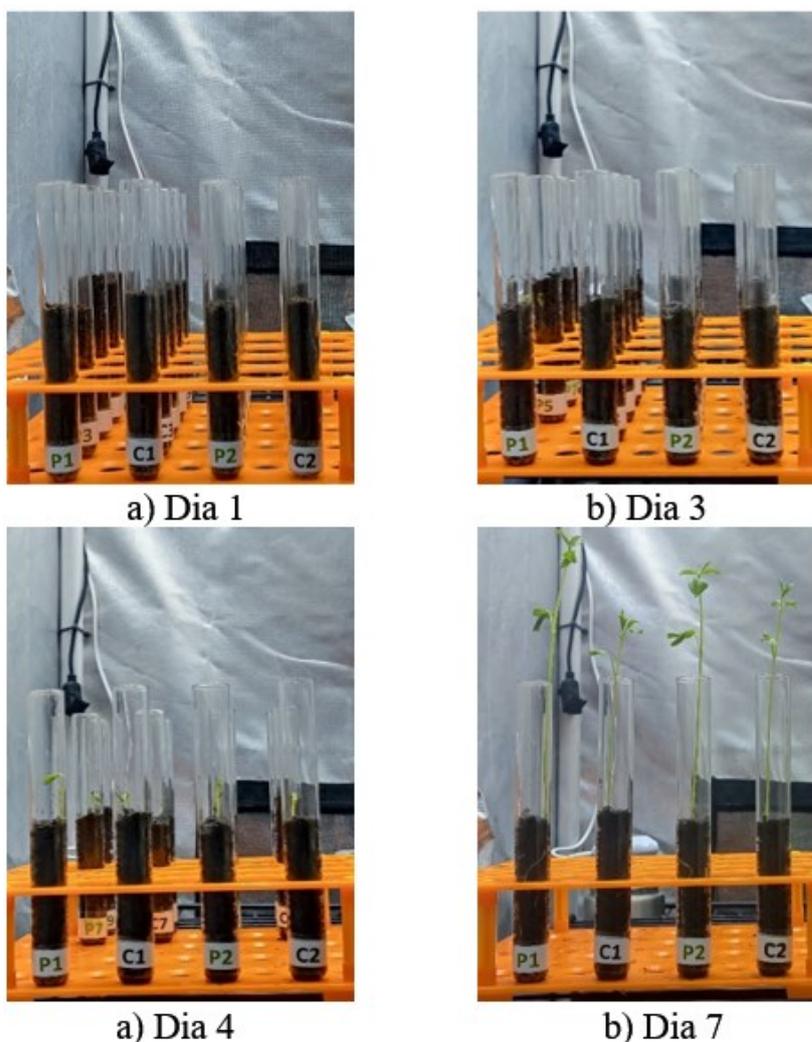


Figura 35. Germinação das sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos Dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) em 2 pares de tubos de ensaio do grupo LS4.

Para o grupo LS4, a taxa de sucesso da germinação de lentilhas tratadas com PATW com 180 min de ativação foi de 97,7% quanto as Control, 95,5%. Enquanto o grupo LS6 obteve 100% de germinação para o tratamento em PATW e 97,7%, Control. Pode-se notar que as taxas de germinação foram maiores que 90% para todos os grupos amostrais, sendo que os maiores valores relativos foram para sementes que sofreram o tratamento indireto por água ativada por plasma de arco deslizante tradicional. Este aumento pode ser associado pelos resultados contidos na Seç. 5.2.4 sobre a taxa de absorção de água pelas sementes. A discussão sobre o balanço hormonal que influencia na germinação das sementes e crescimento das plântulas está descrita na Seç. 5.2.5.2.2.

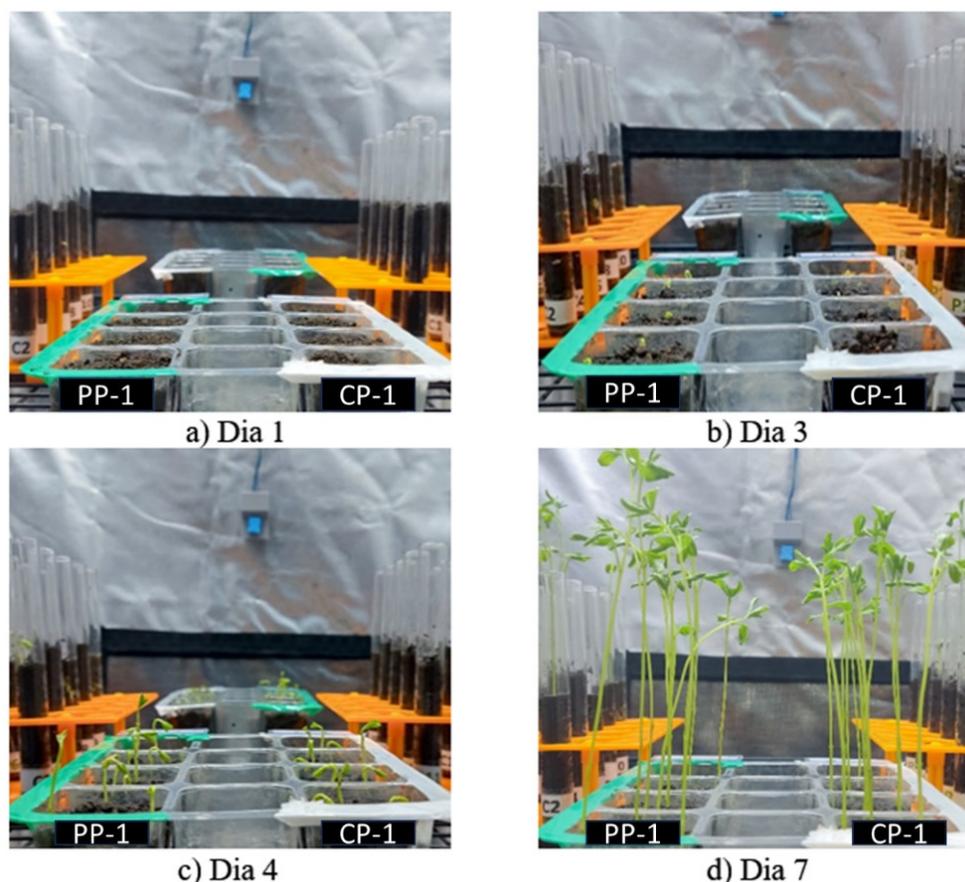


Figura 36. Germinação das sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos Dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) no primeiro conjunto de bandejas de plástico (PP-1: lado esquerdo e CP-1: lado direito) em primeiro plano do grupo LS4.

Nas Figuras 35 e 36, pode-se observar que a superfície do substrato apresentou um certo desnivelamento no interior dos porta-amostras no Dia 1. Contudo, a irrigação, em dias intercalados, nivelou o substrato a partir do Dia 2 e, entre os Dias 3 e 4, pode-se observar que o desenvolvimento inicial dos caules os quais obtiveram alturas maiores para as amostras que receberam o tratamento indireto com PATW em relação aos seus pares de controle, sendo mais notável em amostras plantadas nos porta-amostras de bandejas de plástico em relação às depositadas em tubos de ensaio (sem competição das raízes por água). Contudo, alguns dos demais pares amostrais não obtiveram o mesmo padrão de crescimento devido ao fator de competição das raízes pelo volume de água disponível na divisórias contendo 3 amostras de sementes de lentilha, denotando que somente esta avaliação qualitativa não seria o suficiente para obter as métricas principais como taxa de sucesso da germinação e comprimento de raiz e caule após 7 dias de desenvolvimento inicial das amostras de lentilha e, por isso, uma análise quantitativa foi realizada por meio da medida de comprimento dos componentes principais da plântula de lentilha a qual está discutida na Seç. 5.2.5.2.2.

### 5.2.6.2.2 Comprimento de Caules e Raízes da Lentilha

Inicialmente, a contagem de  $R_{P/C}$ , relativo ao total de amostras que tiveram sucesso na germinação em cada subgrupo (PATW e CONT) e puderam ser medidas nos grupos definitivos, está denotado na Tabela 5.

	Grupo Amostral	Contagem	Grupo Semanal
Raiz	Control	11	LS4
	PATW	26	
Caule	Control	9	
	PATW	32	
Raiz	Control	15	LS6
	PATW	21	
Caule	Control	16	
	PATW	27	

Tabela 5. Contagem das amostras que obtiveram maiores valores de comprimentos de caule e raiz

Estes resultados podem denotar que amostras de sementes tratadas com PATW obtiveram maiores valores de comprimento relativo tanto caule quanto raiz em relação aos seus pares preparados com TW. Para obter uma análise mais ampla deste desenvolvimento, a avaliação do comprimento dos componentes principais das plântulas (caule e raiz) dos grupos amostrais (LS4 e LS6) foi feita com intuito de aferir se há uma diferença estatística da massa de dados relativa às amostras tratadas com PATW em relação ao controle.

A partir disso, o comprimento de caule e raiz foram plotados em gráficos por análise não paramétrica no estilo *box-plot* (Figuras 37 à 39); filtrados com cartas de controle para selecionar, pelo menos, 50% das plântulas crescidas em diferentes porta-amostras e, por fim, a realização da análise de variância (ANOVA) e o teste F com os dados estatísticos do conjunto de porta-amostras em geral (tubos de ensaio (P1-C1 à P20-C20) juntamente com bandejas de plástico (PP1-CP1 à PP2-CP2) nas Tabelas 6 e 7 e específicos, Tabelas C.4 à C.7 vide Apêndice C.

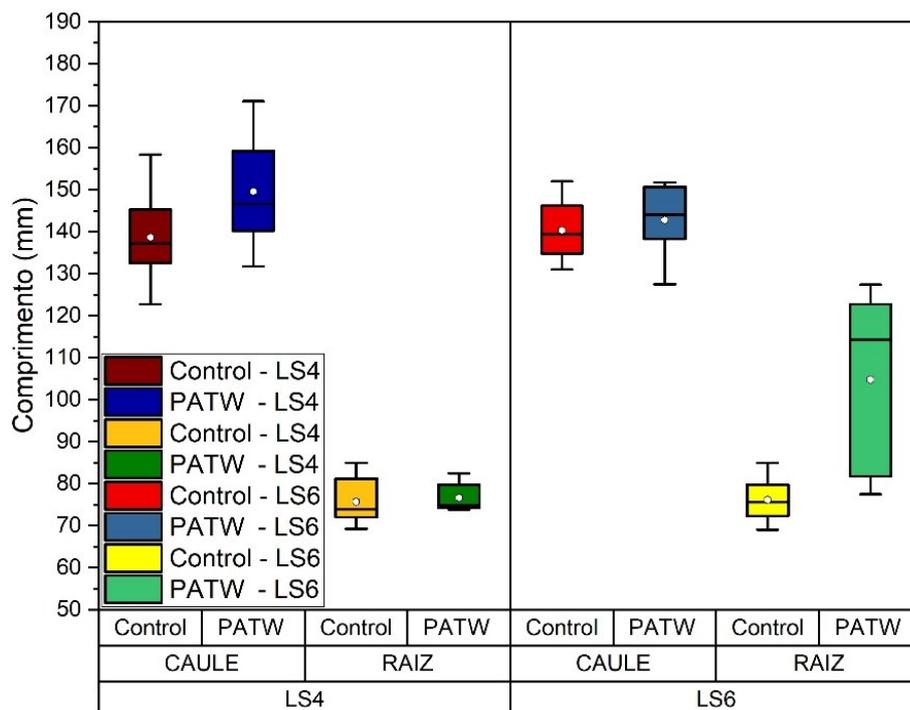


Figura 37. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica (*box-plot*) com 24 amostras (12 caules e 12 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).

Na Figura 37, as amostras apresentaram uma variabilidade maior da massa de dados relativos aos comprimentos do caule no grupo LS4 em relação ao LS6, enquanto as raízes obtiveram uma variabilidade alta nos comprimentos de raiz das amostras tratadas com PATW em relação as de Control no grupo LS6.

Em relação às diferenças entre os valores médios de caule e raiz, houve discrepâncias já que o comprimento médio dos caules de amostras tratadas com água de torneira ativada foi de  $(149,6 \pm 12,0)$  mm e de Control,  $(138,7 \pm 9,6)$  mm apresentando um valor  $-P$  próximo de 0,03 e descartando a  $H_0$ ; enquanto as raízes PATW obtiveram uma média de  $(76,7 \pm 3,0)$  mm e Control,  $(75,8 \pm 5,2)$  mm, com razão entre  $F$  e  $F_{crítico}$  menor do que 1, não obtendo assim uma diferença estatística significativa para o grupo LS4. Analogamente ao grupo LS6, ocorre uma diferença estatística do comprimento entre as raízes, sendo maior para o tratamento com PATW em relação a de Control, todavia isso não é registrado para o comprimento de caule.

Estas discrepâncias na variabilidade e diferença estatística das amostras podem indicar que a remoção do fator de competição pela demanda de água absorvida pelas sementes não afetou, significativamente, o crescimento dos caules e raízes já que apresentou um efeito

randômico em relação aos comprimentos destes componentes principais das amostras plantadas em porta-amostras constituídos por tubos de ensaio entre os grupos LS4 e LS6. Isso pode ser justificado pela diferença de volume e área de contato do substrato (terra) com as sementes nos diferentes porta-amostras.

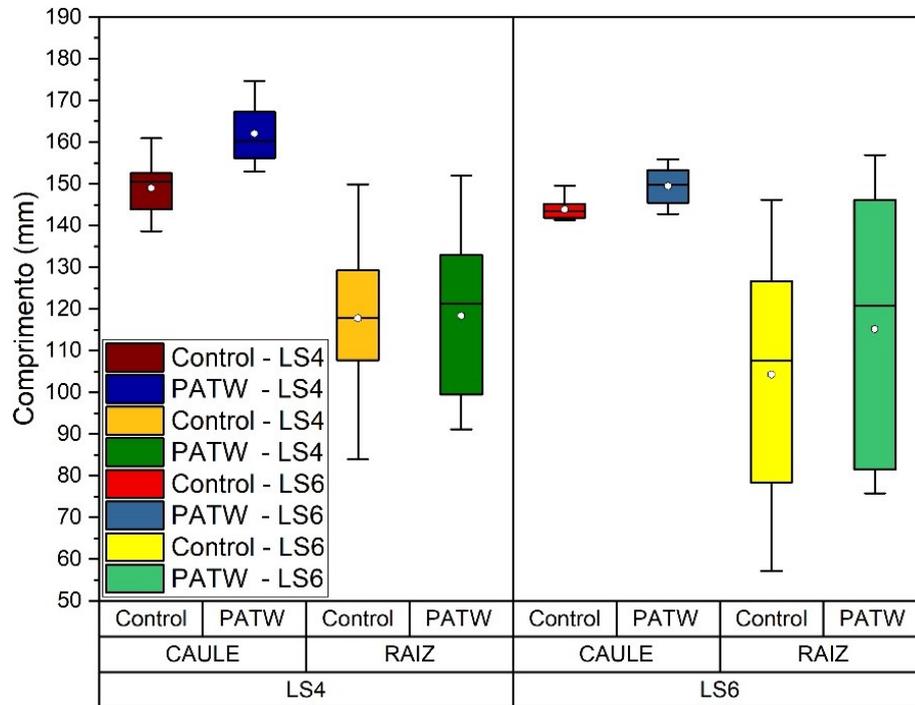


Figura 38. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica (*box-plot*) com 28 amostras (14 caules e 14 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).

Além disso, os furos para vazão do possível volume excedente de água, análogos aos orifícios contidos nas bandejas de plástico e explicitados no Apêndice C, pode ser um dos fatores que tenham randomizado o comprimento de caule e raiz nos grupos semanais definitivos.

Na Figura 38, a variabilidade alta da massa de dados em relação ao comprimento das raízes foi registrada, principalmente, nas amostras tratadas com PATW mesmo obtendo uma diferença estatística significativa das médias no grupo amostral LS4. Quanto aos comprimentos de caule, houve variabilidade menor com comprimento médio maior de amostras PATW – LS4 de  $(162,1 \pm 6,7)$  mm e LS6 de  $(151,0 \pm 5,5)$  mm em relação às Control,  $(149,0 \pm 6,4)$  mm e  $(145 \pm 3,3)$  respectivamente. A partir disso, pode-se avaliar que os comprimentos de caule obtiveram uma diferença estatística significativa, pois os valores-P foram menores do que 0,05

para os grupos LS4 e LS6. Em relação às raízes, o montante de dados apresentou uma variabilidade muito alta tanto para PATW quanto Control com diferença estatística significativa apenas para o grupo LS6. Este aumento na variabilidade das raízes é denotado pelos desvios-padrão contidos em amostras de PATW com valores de  $(124,5 \pm 23,5)$  mm para LS4 e  $(115,2 \pm 28,5)$  mm, LS6; e Control,  $(101,1 \pm 24,2)$  mm  $(104,3 \pm 27,5)$  mm para os dois grupos amostrais semanais respectivamente.

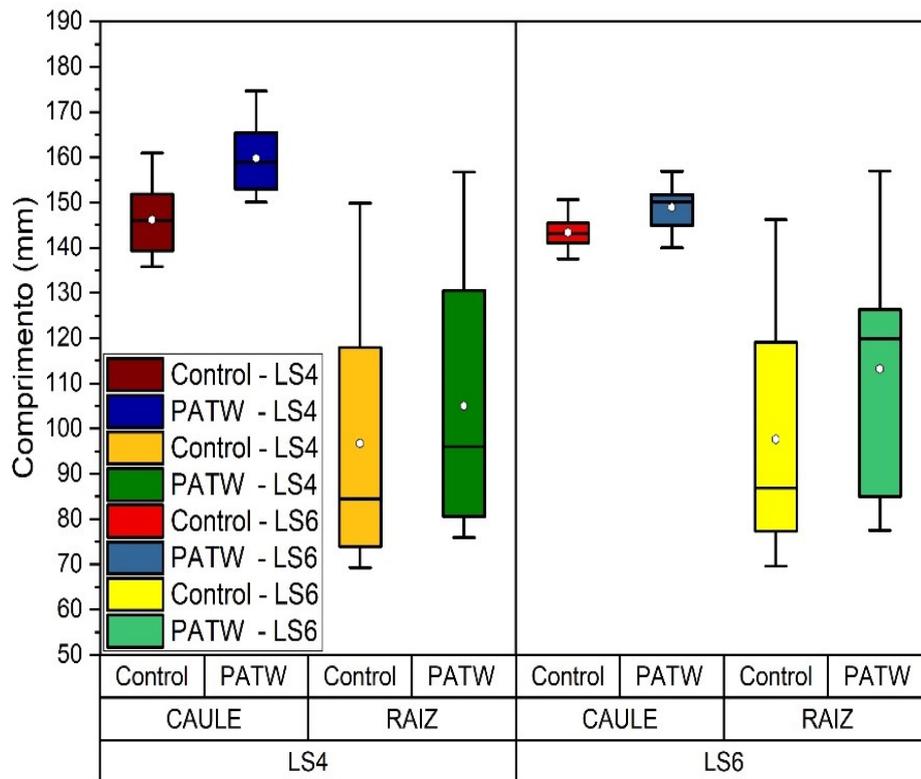


Figura 39. Dados referentes ao comprimento de caule e raiz em tubos de ensaio por análise não paramétrica (*box-plot*) com 48 amostras (24 caules e 24 raízes) em cada grupo (LS4 e LS6).

Para obter uma visão geral do crescimento das amostras de lentilha, 48 amostras foram retiradas e filtradas (Cartas de Controle) tanto do tubo de ensaio quanto as bandejas de plástico em cada grupo semanal (LS4 e LS6). É possível notar tanto o aumento da variabilidade dos comprimentos das raízes quanto a diminuição da variabilidade de caule os quais apresentam um comportamento semelhante às amostras cultivadas em bandejas de plástico. Com a diferença estatística não atestada no grupo LS4, pode indicar que o tratamento indireto com

PATW não afetou, significativamente, o crescimento parcial das raízes após 7 dias de desenvolvimento inicial da lentilha.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	24	2322,4	96,8	615,3	23,8	
PATW	24	2521,6	105,1	687,9	25,2	
Raiz ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	826,7	1,0	826,7	1,3	2,66E-01	4,1
Dentro dos grupos	29974,3	46,0	651,6			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	24	3509,3	146,2	58,2	7,5	
PATW	24	3834,5	159,8	57,9	7,4	
Caule ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	2202,7	1,0	2202,7	38,0	1,66E-07	4,1
Dentro dos grupos	2668,8	46,0	58,0			

Tabela 6. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em geral (tubo de ensaio e bandejas de plástico) no grupo LS4.

No entanto, o comprimento de caule de amostras tratadas com PATW com valores de  $(159,8 \pm 7,4)$  mm para LS4 e  $(148,2 \pm 5,1)$  mm, LS6 foram maiores do que às Control com valores de  $(146,2 \pm 7,5)$  mm e  $(142,9 \pm 3,4)$  mm, respectivamente e, com o valor-P menor do que 5%, denotando assim uma diferença estatística significativa entre os valores de comprimento. Com estes resultados, pode-se afirmar que o tratamento indireto da semente por rega com a PATW pode ter afetado o crescimento dos caules de forma positiva por ação das RONS relativas aos íons nitrato e nitrito como é descrito no mecanismo metabólico simplificado presente na Figura 9.b.

Dada diferença de crescimento dos caules pode ser associada pela ação das RONS sobre as sementes. Iniciando pelo processo de embebedimento das sementes em PATW que pode ter aumentado, de forma gradual, a taxa de absorção de água (Seç. 5.2.4) por consequência da possível alteração da topografia e composição química superficial da casca das sementes, discutidos nas Seç. 5.2.2 e 5.2.3, na qual pode estar relacionada com o aumento da presença de grupos nitrogenados diagnosticado em amostras embebidas em PATW (Seç. 5.2.3.1 e 5.2.3.2) e, com isso, absorvendo as RONS difundidas pelas cascas as quais podem afetar o balanço hormonal na estrutura celular ao inibir a produção do hormônio ABA e promover, GA, o que

estimula a quebra de dormência e o crescimento do caule, principalmente, pela ação das RONS como os íons  $\text{NO}_2^-$  e  $\text{NO}_3^-$  os quais são considerados como RONS essenciais no ciclo do nitrogênio e participam da síntese proteica e energética no metabolismo celular das plântulas.

A partir da metodologia aplicada neste trabalho, o tratamento indireto das amostras por PATW resultaram em um certo aprimoramento do desenvolvimento inicial dos caules das plântulas de lentilhas, além de promover uma taxa de sucesso na germinação relativamente maior em relação ao controle (TW). Tais resultados podem ser justificados pelo mecanismo de quebra da dormência devido à ação oxidativa das RONS sobre a superfície e volume da semente de lentilha. Dado aprimoramento pode resultar em uma safra mais produtiva e com maior qualidade dos grãos após a fase de floração sucedida pela colheita.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão		
Control	24	2344,2	97,7	636,9	24,2		
PATW	24	2717,8	113,2	662,5	24,7		
Raiz ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre grupos	2907,3	1,0	2907,3	4,5	3,98E-02	4,1	
Dentro dos grupos	29886,1	46,0	649,7				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão		
Control	24	3429,4	142,9	12,6	3,4		
PATW	24	3555,7	148,2	28,4	5,1		
Caule ANOVA							
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	
Entre grupos	331,9	1,0	331,9	16,2	2,13E-04	4,1	
Dentro dos grupos	943,9	46,0	20,5				

Tabela 7. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em geral (tubo de ensaio e bandejas de plástico) no grupo LS6.

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, o estudo da água ativada por plasma e sua aplicação tecnológica em sementes leguminosas representadas pelas lentilhas denotaram certos resultados relevantes.

Primeiramente, os resultados relativos à caracterização elétrica da descarga em arco deslizante indicaram uma potência dissipada média de 30,93 W. Além disso, pode-se notar um

aumento gradativo de potência em ciclos ao longo do tempo de aquisição da descarga que pode ser corroborado pelo aumento do comprimento linear da descarga desde a ruptura dielétrica até atingir o regime não-térmico ao longo dos eletrodos divergentes de acordo com certos estudos presentes na literatura. De forma qualitativa, é passível propor que uma seletividade química alta das RONS primárias no regime de operação em desequilíbrio termodinâmico local, característico de um plasma não-térmico, podendo promover a geração das espécies reativas na região de plasma entre as fases gás/vapor. Com isso, o plasma não-térmico oriundo da descarga em arco deslizante pode ser usado como uma ferramenta para promover a ativação da água de torneira e ser utilizada para o tratamento indireto das sementes de lentilha.

Após a caracterização elétrica da descarga em arco deslizante, o estudo da PATW realizado por meio da caracterização físico-química indicou a variação dos parâmetros como pH, ORP, condutividade elétrica e TDS ao longo do tempo de ativação, atingindo valores de 3,66, 181 mV, 0,201 mV e 131,5 ppm após 180 min de ativação. A partir de 90 min, foi possível notar maiores variações de pH e ORP que pode ser justificada pela formação e reação química das espécies oxidativas como radicais nitro e hidroxila, além da concentração de íons  $H^+$ . Esta variação corroborou os resultados obtidos por análise espectrofotométrica na qual foi possível estimar as concentrações das espécies reativas de vida longa no volume da PATW sendo que os íons nitrato (27,26 mg/L) e nitrito (37,47 mg/L), além da eficiência energética com as demais RONS que atingiu  $7,98 \cdot 10^{-3}$  mol/kWh com 180 min de processo. Todavia, tal eficiência energética do processo de ativação da água demonstrou-se baixa em relação aos dados contidos na literatura.

Com estes dados, a avaliação da aplicação tecnológica da PATW pôde ser feita, inicialmente, pela análise topográfica e composição química superficial de sementes embebidas. A partir da análise qualitativa por MEV, pôde-se observar a formação de granulações em amostras CONT e PATW, sendo que a última apresentou um certo espaçamento intergranular o que pode aferir uma rugosidade maior e, com isso, um possível estabelecimento de uma superfície de contato maior. Com análise por EDS e FTIR, a indicação da presença de grupos nitrogenados foi evidente em amostras embebidas em água de torneira ativada. Tal presença pode ser justificada devido ao aumento de concentração de RONS no volume de PATW. Em seguida, a taxa de absorção de água pela semente indicou que as sementes embebidas em PATW apresentaram valores gradualmente maiores (0,978) em relação às amostras embebidas em TW (0,977), podendo ser justificada pelas alterações na morfologia (superfície de contato maior) e composição química superficial (presença de grupos

nitrogenados com possíveis ligações de hidrogênio foi mais significativa na superfície da semente) da casca das sementes.

Por fim, o estabelecimento de um ambiente controlado apresentou certa estabilidade nos parâmetros de temperatura (22,5 °C) e umidade relativa do ar (70 % a 80 %) efetivas dentro da estufa *indoor* e, com isso, pôde-se realizar avaliação do desenvolvimento inicial da lentilha a partir da germinação das sementes e crescimento inicial das plântulas. As taxas de sucesso de germinação das sementes de lentilha foram acima de 90% em todos os grupos e atingindo 100 % nas amostras PATW do grupo LS6.

A partir da métrica  $R_{P/C}$ , pôde-se observar que as amostras PATW obtiveram comprimentos de caule e raiz maiores em relação aos pares antagônicos relativos ao CONT. Para uma análise estatística mais apurada e geral, o comprimento dos caules apresentou uma variabilidade baixa da massa principal de dados, além de apresentar uma diferença estatística significativa entre os valores médios, principalmente nas amostras cultivadas em porta-amostras do tipo bandeja de plástico.

Entretanto, notou-se que o comprimento das raízes apresentou uma variabilidade alta nos dois grupos amostrais definitivos, mesmo obtendo diferença estatística (valor- $p < 0,05$ ) entre os valores médios das amostras tratadas com PATW e TW. Esta variabilidade alta pode ser atribuída para as amostras de raízes cultivadas em porta-amostras de bandeja de plástico. A escolha de porta-amostra em tubos de ensaio para germinação das lentilhas mostrou uma diferença significativa menor em relação às amostras cultivadas em bandejas de plástico, podendo indicar que o primeiro porta-amostra é menos adequado para este tipo de substrato (terra).

Em suma, os resultados deste trabalho demonstraram que a interação de RONS de vida longa na PATW com a superfície e volume das lentilhas pode ter acarretado, primeiramente, a quebra de dormência de suas sementes, seguida de um aprimoramento no crescimento inicial dos caules em amostras cultivadas em porta-amostras de bandejas de plástico com terra (substrato) causando assim certas diferenças significativas em relação às amostras regadas com TW no estágio de desenvolvimento inicial com a germinação das sementes e crescimento primário dos caules das plântulas no período de 7 dias. Com isso, este tratamento indireto indica que a aplicação tecnológica da PATW em sementes de lentilha pode promover o aumento na produtividade e qualidade da safra de sementes leguminosas.

## 6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Nesta Seção, algumas sugestões de metodologias e diagnósticos foram descritas para a continuação e aprimoramento do estudo desta aplicação tecnológica em trabalhos futuros:

- Desenvolver uma metodologia de caracterização da água durante o processo de ativação por plasma não-térmico atmosférico de forma *in-situ*;
- Aprimorar a fonte de alta tensão; alterar a configuração do arco deslizante tradicional para vórtice no reator de ativação da água e realizar análise de espectrometria de emissão óptica do plasma para determinar a composição química elementar das espécies primárias;
- Promover a agitação das bolhas em volumes diferentes de água com o intuito de aumentar a eficiência energética do processo de ativação da água;
- Avaliar a eficiência energética para volumes menores (200,150 e 100 ml) de água de torneira ativada;
- Modificar a metodologia do tratamento indireto de sementes leguminosas à plasma para avaliar a emissão da radícula (germinação inicial) nos primeiros 3 dias *in vitro* (papel de germinação) em diferentes períodos de ativação da água;
- Verificar o ângulo de contato em sementes secas e, em seguida; embebidas e preparadas para avaliar o umedecimento da superfície da casca tratada à plasma indiretamente;
- Realizar o processo de ativação da água em diferentes períodos e observar, diariamente, a emissão da radícula e caule das lentilhas em papel de germinação até 7 dias.
- Avaliar a concentração de componentes e moléculas químicas sobre as amostras ao longo do tempo de germinação e estudar as possíveis reações físico-químicas das principais espécies reativas na superfície e volume da semente;

## REFERÊNCIAS

- [1] FRIDMAN, A. **Plasma chemistry**. Cambridge University Press, 2008.
- [2] MISRA, N.; SCHLÜTER, O.; CULLEN, P. J. (ed.). **Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications**. London: Academic Press, 2016.
- [3] HAN, Q. Y. *et al.* Application of plasma-activated water in the food industry: A review of recent research developments. **Food Chemistry**, v. 405, Artigo n. 134797, Mar 2023
- [4] BITTENCOURT, J.A. **Fundamentals of plasma physics**. 4<sup>a</sup> ed. Columbia: Creatspace, 2018. p. 1-9.
- [5] CHU, P. K.; LU, X. (Ed.). **Low temperature plasma technology: methods and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [6] ŠIMEČKOVÁ, J. *et al.* Influence of plasma-activated water on physical and physical-chemical soil properties. **Water**, v. 12, n. 9, Artigo n. 2357, 2020.
- [7] NDIFFO YEMELI, G. B. *et al.* The effect of water activated by nonthermal air plasma on the growth of farm plants: Case of maize and barley. **Plasma Processes and Polymers**, v. 18, n. 1, Artigo n. 2000205, 2021.
- [8] THIRUMDAS, R. *et al.* Exploitation of cold plasma technology in agriculture. **Advances in Research**, v. 12, n. 4, p. 1-7, 2017.
- [9] NASSER, E. **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics**. New York: John Wiley & Sons, 1971.
- [10] CHAPMAN, B. N. **Glow discharge processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [11] PESSOA, S.V.; MACIEL, H. S. **Fundamentos da ionização de gases: Descargas Elétricas e Plasmas I**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2021.66 p. Notas de Aula. Slides.
- [12] FILGUEIRA, G. A. **Estudo do efeito da água ativada por plasma no crescimento de plantas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Microeletrônica) - Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2020.
- [13] LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. **Principles of plasma discharges and materials processing**. 2<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.
- [14] HARRY, J. **Introduction to plasma technology**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [15] WARTEL, M. *et al.* Analysis of plasma activated water by gliding arc at atmospheric pressure: effect of the chemical composition of water on the activation. **Journal of Applied Physics**, v. 129, n. 23, Artigo n. 233301, 2021.
- [16] VOLKOV, A. G. *et al.* Mechanisms of multielectron reactions at the plasma/water interface: interfacial catalysis, RONS, nitrogen fixation, and plasma activated water. **Electrochimica Acta**, v. 385, Artigo n. 138441, 2021.
- [17] MUTAF-YARDIMCI, O. *et al.* Thermal and nonthermal regimes of gliding arc discharge in air flow. **Journal of Applied Physics**, v. 87, n. 4, p. 1632-1641, 2000.
- [18] FRIDMAN, A. *et al.* Gliding arc gas discharge. **Progress in Energy And Combustion Science**, v. 25, n. 2, p. 211-231, 1999.

- [19] MOUSAVI, S. A.; PIAVIS, W.; TURN, S. Reforming of biogas using a non-thermal, gliding-arc, plasma in reverse vortex flow and fate of hydrogen sulfide contaminants. **Fuel Processing Technology**, v. 193, p. 378-391, 2019.
- [20] SAGÁS, J. C. **Combustão assistida a plasma gerado por descarga de arco deslizante para produção de gases ricos em hidrogênio**. 2013. 168 f. Tese (Doutorado em Física de Plasmas) -Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2013.
- [21] SIVACHANDIRAN, L.; KHACEF, A. Enhanced seed germination and plant growth by atmospheric pressure cold air plasma: combined effect of seed and water treatment. **RSC advances**, v. 7, n. 4, p. 1822-1832, 2017.
- [22] FERNANDEZ, C. A.; HATZELL, M. C. Editors' Choice-economic considerations for low-temperature electrochemical ammonia production: achieving Haber-Bosch parity. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 167, n. 14, Artigo n. 143504, 2020.
- [23] BOGAERTS, A. *et al.* Gas discharge plasmas and their applications. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 57, n. 4, p. 609-658, 2002.
- [24] KUČEROVÁ, K. *et al.* Effects of plasma activated water on wheat: Germination, growth parameters, photosynthetic pigments, soluble protein content, and antioxidant enzymes activity. **Plasma Processes and Polymers**, v. 16, n. 3, Artigo n. 1800131, 2019.
- [25] TIAN, Y. *et al.* Assessment of the physicochemical properties and biological effects of water activated by non-thermal plasma above and beneath the water surface. **Plasma Processes And Polymers**, v. 12, n. 5, p. 439-449, 2015.
- [26] LIU, Z. *et al.* Dynamic analysis of absorbance behavior and peak shift of RONS in plasma-activated water by UV absorption spectroscopy: dependency on gas impurity, pulse polarity, and solution pH. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 54, n. 1, Artigo n. 015202, 2020.
- [27] HOEBEN, W. F. L. M. *et al.* On the possibilities of straightforward characterization of plasma activated water. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 39, n. 3, p. 597-626, 2019.
- [28] TEREKUN, Piotr *et al.* Influence of plasma activated water generated in a gliding arc discharge reactor on germination of beetroot and carrot seeds. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, Artigo n. 6164, 2021.
- [29] STARIČ, P. *et al.* Effects of nonthermal plasma on morphology, genetics and physiology of seeds: A review. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1736, 2020.
- [30] LIU, B. *et al.* Non-thermal DBD plasma array on seed germination of different plant species. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 52, n. 2, p. 025401, 2018.
- [31] ŠERÁ, B.; ŠERÝ, M. Non-thermal plasma treatment as a new biotechnology in relation to seeds, dry fruits, and grains. **Plasma Science and Technology**, v. 20, n. 4, Artigo n. 044012, 2018.
- [32] SADHU, S. *et al.* Influence of cold plasma on the enzymatic activity in germinating mung beans (*Vigna radiate*). **LWT Food Sci. Technol.**, v.78, p.97–104. 2017.
- [33] GUO, Q. *et al.* Alleviation of adverse effects of drought stress on wheat seed germination using atmospheric dielectric barrier discharge plasma treatment. **Sci. Rep.**, v.7, p.1–14, 2017.
- [34] EL SHAER, M. *et al.* Germination of wheat seeds exposed to cold atmospheric plasma in dry and wet plasma-activated water and mist. **Plasma Medicine**, v. 10, n. 1, p. 1-13, 2020.

- [35] THIRUMDAS, R. *et al.* Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. **Trends in Food Science & Technology**, v. 77, p. 21-31, 2018.
- [36] ZHOU, R. *et al.* Plasma-activated water: Generation, origin of reactive species and biological applications. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 53, n. 30, Artigo n. 303001, 2020.
- [37] PUAČ, N.; GHERARDI, M.; SHIRATANI, M. Plasma agriculture: a rapidly emerging field. **Plasma Processes and Polymers**, v. 15, n. 2, Artigo n. 1700174, 2018.
- [38] JULÁK, J. *et al.* Contribution to the chemistry of plasma-activated water. **Plasma Physics Reports**, v. 44, n. 1, p. 125-136, 2018.
- [39] ZEGHIOUD, H. *et al.* Review on discharge Plasma for water treatment: Mechanism, reactor geometries, active species, and combined processes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, Artigo n. 101664, 2020.
- [40] PARK, D. P. *et al.* Reactive nitrogen species produced in water by non-equilibrium plasma increase plant growth rate and nutritional yield. **Current Applied Physics**, v. 13, p. S19-S29, 2013.
- [41] TOMM, G. O. *et al.* Desempenho de genótipos de ervilha, de lentilha e de grão-de-bico no Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Brasília: Embrapa. 2001. Embrapa Trigo.
- [42] GURAGAIN, R. P. *et al.* Influence of plasma-activated water (PAW) on the germination of radish, fenugreek, and pea seeds. **AIP Advances**, v. 11, n. 12, Artigo n. 125304, 2021.
- [43] XU, Y. *et al.* Effect of plasma activated water on the postharvest quality of button mushrooms, *Agaricus bisporus*. **Food Chemistry**, v. 197, p. 436-444, 2016.
- [44] MOUSSA, D. *et al.* Acidity control of the oxidation reactions induced by non-thermal plasma treatment of aqueous effluents in pollutant abatement processes. **Eur Phys J Appl Phys**, v. 29, p. 189-199, 2005.
- [45] THAN, H. *et al.* Non-thermal plasma activated water for increasing germination and plant growth of *Lactuca sativa L.* **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 42, n. 1, p. 73-89, 2021.
- [46] WANG, Y.; NIE, Z.; MA, T. The effects of plasma activated water treatment on the growth of tartary buckwheat sprouts. **Frontiers in Nutrition**, v. 9, Artigo n. 849615, Feb.2022.
- [47] RASHID, M. *et al.* Enhancement of growth, enzymes, nutrition and yield of eggplant: combined effects of plasma treatments. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 43, n. 1, p. 163-181, 2023.
- [48] VLAD, E. *et al.* Time stability of water activated by different on-liquid atmospheric pressure plasmas. **Journal of Electrostatics**, v. 87, p. 284-292, 2017.
- [49] FOSTER, J. E. Plasma-based water purification: challenges and prospects for the future. **Physics of Plasmas**, v. 24, n. 5, Artigo n. 055501, 2017.
- [50] LUKES, P. *et al.* Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HNO<sub>2</sub>. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 23, n. 1, Artigo n. 015019, 2014.

- [51] ZHAO, Y.M. *et al.* Plasma-activated water: Physicochemical properties, microbial inactivation mechanisms, factors influencing antimicrobial effectiveness, and applications in the food industry. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 6, p. 3951-3979, 2020.
- [52] TACHIBANA, K.; NAKAMURA, T. Examination of UV-absorption spectroscopy for analysis of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, and HNO<sub>2</sub> compositions and kinetics in plasma-activated water. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 59, n. 5, Artigo n. 056004, 2020.
- [53] ARAKAKI, T. *et al.* pH Dependent Photoformation of hydroxyl radical and absorbance of aqueous-phase N (III) (HNO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). **Environmental Science & Technology**, v. 33, n. 15, p. 2561-2565, 1999.
- [54] SZILI, E. J. *et al.* Probing the transport of plasma-generated RONS in an agarose target as surrogate for real tissue: dependency on time, distance and material composition. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 48, n. 20, Artigo n. 202001, 2015.
- [55] CHIAPPIM, W. *et al.* Antimicrobial effect of plasma-activated tap water on *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans*. **Water**, v. 13, n. 11, Artigo n. 1480, 2021.
- [56] TRAYLOR, Matthew J. *et al.* Long-term antibacterial efficacy of air plasma-activated water. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 44, n. 47, Artigo n. 472001, 2011.
- [57] PAWŁAT, J. *et al.* Evaluation of oxidative species in gaseous and liquid phase generated by mini-gliding arc discharge. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 39, p. 627-642, 2019.
- [58] VAN GILS, C. *et al.* Mechanisms of bacterial inactivation in the liquid phase induced by a remote RF cold atmospheric pressure plasma jet. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, n. 17, Artigo n. 175203, 2013.
- [59] MAŁAJOWICZ, J.; KHACHATRYAN, K.; KOZŁOWSKA, M. Properties of water activated with low-temperature plasma in the context of microbial activity. **Beverages**, v. 8, n. 4, Artigo n. 63, 2022.
- [60] KIM, H. *et al.* Concentration of hydrogen peroxide generated by gliding arc discharge and inactivation of *E. coli* in water. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 5-10, 2013.
- [61] GAO, Y.; FRANCIS, K.; ZHANG, X. Review on formation of cold plasma activated water (PAW) and the applications in food and agriculture. **Food Research International**, v. 157, Artigo n. 111246, 2022.
- [62] HADINOTO, K. *et al.* Hybrid plasma discharges for energy-efficient production of plasma-activated water. **Chemical Engineering Journal**, v. 451, Artigo n. 138643, 2023.
- [63] SILVA, J. D. **Transformador para fonte de alta-tensão contínua**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica) -Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [64] RATHORE, V. *et al.* Treatment of pea seeds with plasma activated water to enhance germination, plant growth, and plant composition. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 42, n. 1, p. 109-129, 2022.
- [65] BIRKMANN, J. *et al.* UV spectroscopic properties of principal inorganic ionic species in natural waters. **Water Practice & Technology**, v. 13, n. 4, p. 879-892, 2018.

- [66] LIU, Z. *et al.* Quantifying the concentration and penetration depth of long-lived RONS in plasma-activated water by UV absorption spectroscopy. **AIP Advances**, v. 9, n. 1, Artigo n. 015014, 2019.
- [67] JOSHI, M. *et al.* Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*). **Journal of Food Engineering**, v. 100, n. 1, p. 61-69, 2010.
- [68] SOUZA, P. R. F. *et al.* Effect of ozone exposure on water uptake and germination of lentil (*Lens culinaris*) seeds. **Ozone: Science & Engineering**, v. 43, n. 1, p. 48-59, 2021.
- [69] KRUPSKI, P.; STRYCZEWSKA, H. D. GLIDARC reactor power supply with ignition improvement. **COMPEL-International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, v. 38, n. 4, p. 1274-1284, 2019.
- [70] SONG, F. *et al.* N-decane reforming by gliding arc plasma in air and nitrogen. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 40, n. 6, p. 1429-1443, 2020.
- [71] CZERNICHOWSKI, A. Gliding arc: applications to engineering and environment control. **Pure and Applied Chemistry**, v. 66, n. 6, p. 1301-1310, 1994.
- [72] EL-ARAGI, G. M. **Gliding arc discharge (GAD) experiment**. Cairo: Plasma Physics and Nuclear Fusion Dept., Nuclear Research Center, 2009. Disponível em: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/papers/3.pdf> Acesso em: 10 abr. 2021
- [73] POTOČŇÁKOVÁ, L. *et al.* Experimental study of gliding arc plasma channel motion: buoyancy and gas flow phenomena under normal and hypergravity conditions. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 26, n. 4, Artigo n. 045014, 2017.
- [74] JANDA, M. *et al.* The Role of HNO<sub>2</sub> in the Generation of Plasma-Activated Water by Air Transient Spark Discharge. **Applied Sciences**, v. 11, n. 15, Artigo n. 7053, 2021.
- [75] MOVASAGHI, Z.; REHMAN, S.; UR REHMAN, I. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 43, n. 2, p. 134-179, 2008.
- [76] SMITH, B. L. **Principles and applications of infrared spectroscopy**. 5<sup>a</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- [77] CUNHA, P. T. Alterações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas em sementes de lentilha em diferentes estádios de maturação e submetidas ao armazenamento. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.
- [78] VIEIRA, R. F. *et al.* Épocas de plantio da lentilha precoce em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 1233-1240, 1999.
- [79] MATRA, K. *et al.* Enhancement of Lettuce Growth by PAW Spray Gliding Arc Plasma Generator. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 50, n. 6, p. 1430-1439, 2021.
- [80] GURAGAIN, R. P. *et al.* Improvements in germination and growth of sprouts irrigated using plasma activated water (PAW). **Water**, v. 15, n. 4, Artigo n. 744, 2023.
- [81] NIEDUZAK, T. B. *et al.* Digitally manufactured air plasma-on-water reactor for nitrate production. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 31, n. 3, Artigo n 035016, 2022
- [82] WANG, Y. *et al.* Evaluation of the storage stability and quality properties of fresh noodles mixed with plasma-activated water. **Foods**, v. 11, n. 1, p. 133, 2022.
- [83] SAMUKAWA, S. *et al.* The 2012 plasma roadmap. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 45, n. 25, Artigo n. 253001, 2012.

[84] BRUGGEMAN, P.; LEYS, C. Non-thermal plasmas in and in contact with liquids. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 42, n. 5, p. 053001, 2009.

[85] SAMPAIO, A. G. *et al.* Effect of the pH on the antibacterial potential and cytotoxicity of different plasma-activated liquids. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 22, Artigo n.13893, 2022.

[86] VitalFluid B.V. **Plasma activated water**. 2014-2021. Eindhoven. 2021. Disponível em: <https://vitalfluid.com/>. Acesso em: 08 jul. 2021.

[87] Inmetro. **Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP)**: Escopo da Acreditação – ABNT NBR ISO/IEC 17025 – Ensaio. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/rble/docs/CRL0168.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2021.

## Apêndice A – Gerador De Alta Tensão e Arco Deslizante

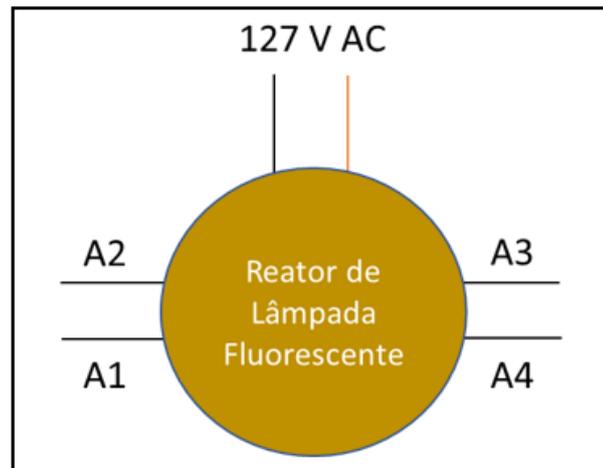


Figura A.1. Esquema elétrico de entrada (127 V AC) e saídas (A1 à A4) de potência do reator de lâmpada fluorescente de bulbo.

Na Figura A.1, a representação elétrica simplificada do reator de lâmpada fluorescente para facilitar o entendimento deste componente no circuito relativo ao gerador de alta tensão e formar a descarga em arco deslizante.

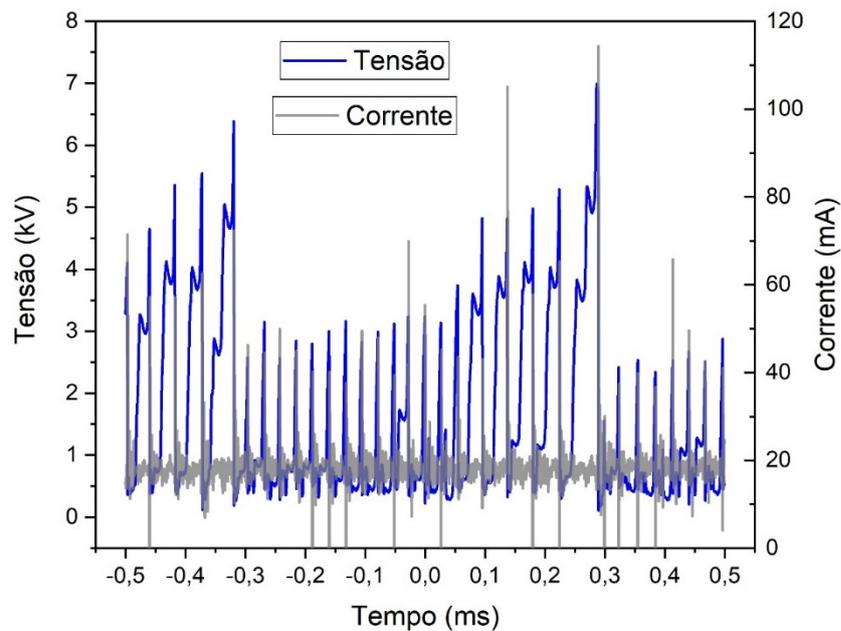


Figura A.2. Gráfico da tensão e corrente elétrica em função do tempo relativo à descarga em arco deslizante.

## Apêndice B – Estufa Indoor e seus Componentes

O planejamento do posicionamento de sensores, atuadores e amostras precisou ser feito para manter o controle adequado de parâmetros físicos como umidade relativa do ar, temperatura e período de iluminação mediante a realização de testes dentro da estufa *indoor* com dimensões 60x60x140 cm.

Dada a necessidade de um sincronismo entre os sensores e atuadores dentro da estufa, o microcontrolador da plataforma Arduino foi utilizado como placa de aquisição de dados e comandos. O modelo escolhido foi Arduino Mega, com microprocessador Atmega 2560 (Figura C.1, vide Anexo C), pois contém a quantidade suficiente de entradas ou saídas digitais e analógicas para o recebimento e envio de dados e comandos dos sensores e atuadores, respectivamente, além de certos acessórios como *cases* de proteção para os sensores. Para alimentação desta placa de aquisição de dados, uma fonte de tensão contínua de 9V/1A foi utilizada para o funcionamento do sistema sem utilizar a potência fornecida pelo computador via USB. O acionamento dos atuadores foi realizado por meio de relês 5V/10A de dois canais. Para a visualização de certos parâmetros importantes para o acompanhamento externo à interface de aquisição, um display LCD 20X4 com módulo I2C foi adicionado.

Para realizar as medidas de temperatura e umidade relativa do ar através dos sensores DHT 11, algumas adaptações no código fonte básico da programação precisaram ser feitas para manter o ambiente da estufa em uma média adequada para as amostras de lentilhas. A sala de laboratório era mantida a temperatura de 20°C com auxílio de um condicionador de ar.

A temperatura interna da estufa foi aumentada utilizando um aquecedor 150W / 12 VDC foi colocado na parte superior da estufa e inclinado levemente ao centro. Este aquecedor foi alimentado por uma fonte chaveada que fornece 12 V /12,5 A em sua saída.

O estabelecimento da umidade relativa do ar foi realizado mediante o uso de umidificadores portáteis os quais possuem um filtro imerso dentro de uma garrafa de metal inox (Figura B.1). A necessidade de circuladores de ar motivou o uso de miniventiladores e coolers em posições estratégicas para manutenção dos valores de temperatura e umidade.



Figura B.1. Conjunto de nebulização da água para gerar umidade no ambiente interno da estufa *indoor*.

A iluminação necessária para o cultivo foi estabelecida com auxílio de duas luminárias tubulares de LED do tipo Luz do Dia (ASUS, LTC18V2), com 18 W/127 V de potência e fluxo luminoso de 1.440 lm cada, as quais foram fixadas na parte superior da estufa e separadas de forma equidistante para melhor distribuição luminosa sobre toda estufa. O controle de tempo de iluminação foi comandado pelo microcontrolador com auxílio do módulo RTC - DS3231 o qual tem a função de fornecer uma precisão de tempo estável e contínua, mesmo quando o Arduino está desligado ou reiniciado, sendo alimentado com a tensão de 5 V ou 3,3 V fornecida pelo microcontrolador. Ele contém um suporte para uma bateria externa de lítio de 3,3 V para continuar a contagem do tempo em uma eventual queda de energia ou desligamento súbito do sistema. Os atuadores de baixa potência como miniventiladores, coolers, umidificadores e relês foram alimentados por uma fonte externa de 5 V/4 A conectada em paralelo com estes componentes. Os demais componentes, como os sensores DHT11, display de LCD e o módulo RTC, foram alimentados pelas saídas de tensão fornecidas pelo microcontrolador. A estufa *indoor* e seus componentes estão ilustrados na Figura B.2.

Com exceção do aquecedor, todo o sistema de controle foi conectado ao *nobreak* (Ragtech, CBU – 700 VA) para evitar prejuízos durante a execução dos testes e experimentos definitivos.

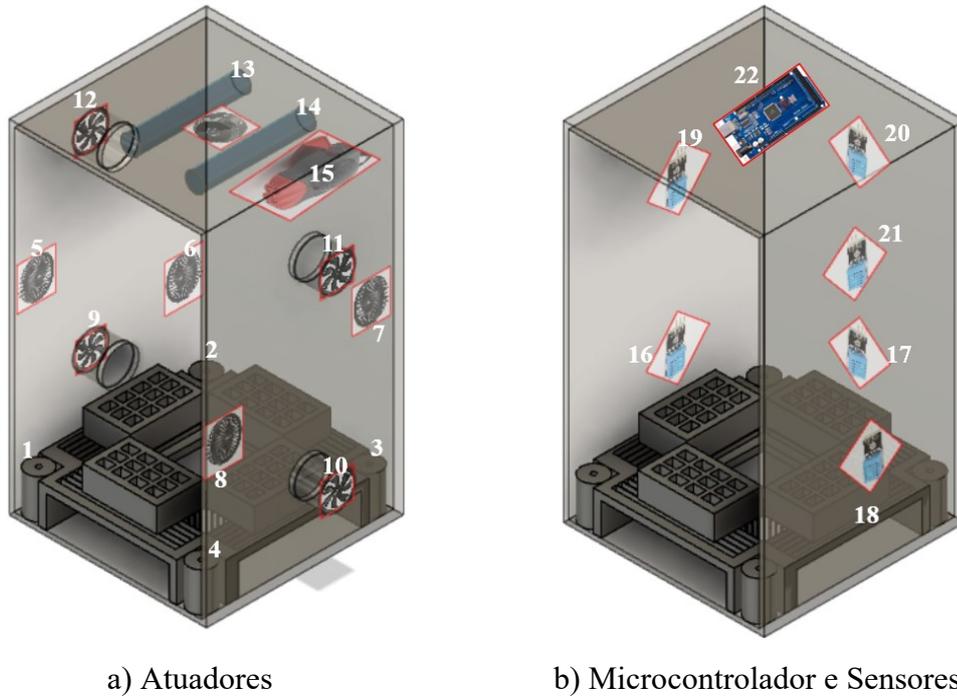


Figura B.2. Vista isométrica superior do desenho que ilustra, de forma simplificada, a estrutura da estufa *indoor* com os sensores, alguns atuadores e microcontrolador posicionados por meio do software gráfico Fusion 360, Autodesk.

O esquema simplificado que contém as conexões entre microcontrolador, sensores e atuadores está presente na Figura B.3.

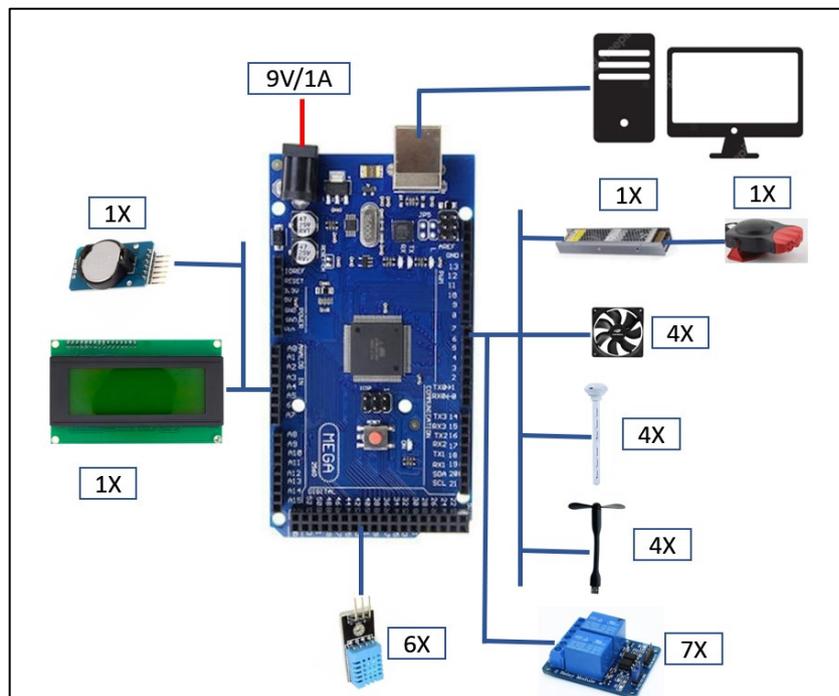


Figura B.3. Esquema simplificado de conexões do sistema de controle e aquisição de dados.

A necessidade de controlar e automatizar o ambiente dentro da estufa *indoor*, o módulo DHT 11, que contém os sensores de umidade e temperatura, auxiliou na aferição dos dados devido a presença de sensores resistivos capazes de mensurar as variações de temperatura (NTC) e umidade relativa do ar contendo isolamento necessário para barrar certas interferências. Algumas especificações sobre o módulo DHT 11 estão descritas na Tabela A.1, vide Anexo A. Para fixação e proteção dos contatos elétricos, o desenho de protetores plásticos (*cases*) foi desenvolvido e, a partir dele, os *cases* foram confeccionados por meio de uma impressora 3D (Ender 6, Creality). Os protetores são compostos por uma base e uma tampa plástica com aberturas para deixar apenas a região em que os sensores se encontram exposta e proteger os contatos elétricos do módulo o máximo possível. O módulo DH 11 e seu respectivo case são mostrados na Figura B.4.

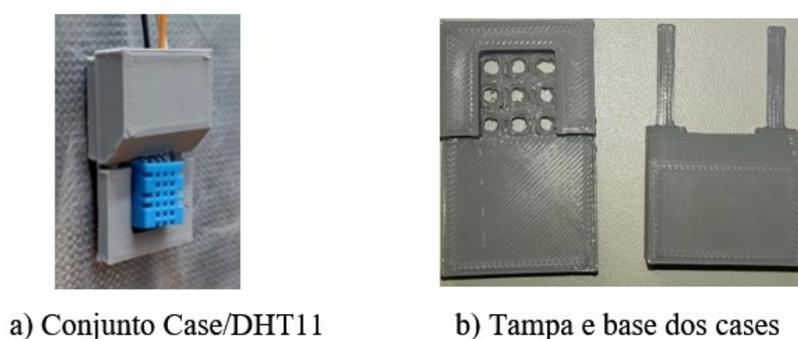


Figura B.4. Conjunto sensor e *case* (a) e as partes desmontadas do *case* (b).

Para coletar e armazenar os dados adquiridos pelos sensores de temperatura e umidade relativa do ar dentro da estufa, uma interface adicional foi elaborada para guardar estes dados em formato de texto através da plataforma Node-RED. O diagrama de blocos da programação desta interface está presente na Figura B.5.

Esta interface oferece um ambiente de visualização da programação em blocos com código aberto. O primeiro bloco (COM5) corresponde a entrada de dados indexados na porta serial conectada ao microcontrolador. O segundo (*switch*) diz respeito ao reconhecimento de uma eventual reinicialização do microcontrolador, indicando a introdução de novos dados com possíveis programações divergentes, seguindo para o bloco intitulado “*function*”. Caso não ocorra divergências e mensagem “*TRUE*” seja enviada, os dados seguem para o terceiro bloco (*split*) para separação das linhas contendo o conjunto de dados em diferentes períodos definidos no código de programação do Arduino. A partir disso, os dados indexados são separados e

organizados pelo quarto (*switch*), quinto (*join*), sexto (*set.msg.time*) e sétimo (*compose line*) bloco em grupos de Umidade Relativa do Ar, Temperatura e Temperatura Aparente no formato TXT. Ao finalizar o período de germinação, os dados são analisados para verificação da normalização ou não do ambiente durante o desenvolvimento das amostras.

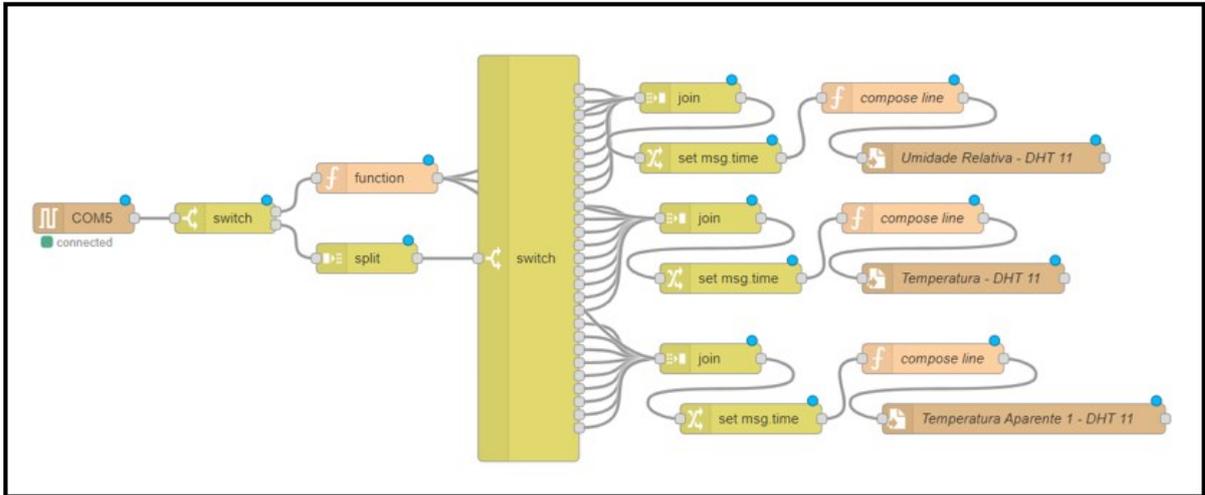


Figura B.5. Diagrama de blocos da programação na interface de aquisição de dados.

Dentro da estufa, ilustrada na Figura B.2, os sensores e atuadores foram dispostos em lugares estratégicos para sua função. Por este motivo, os 6 sensores do tipo DHT 11 foram colocados da seguinte forma: três foram fixados na parede da estufa na parte inferior e os demais, parte superior. Tal arranjo permite que as condições de temperatura e umidade relativa do ar fossem aferidas em dois níveis de altura dentro da estufa. Após alguns testes sem atuadores, coube a colocação dos principais atuadores como os 4 minis umidificadores os quais foram embutidos, de forma individual, em uma garrafa de aço inoxidável sem tampa nos cantos da parte inferior da estufa. Os miniventiladores foram posicionados de forma inclinada para baixo (Fan 1 e 3) e para cima (Fan 2 e 4) com intuito de promover um efeito de convecção do ar e possibilitar a manutenção do equilíbrio dos parâmetros físicos de temperatura e umidade relativa do ar entre os níveis superior e inferior dentro da estufa. Os mini coolers foram fixados nas saídas laterais da seguinte maneira: os Coo 3 e 4 tinham a função de renovação do ar e os Coo 1 e 2, exaustão. As informações complementares (Figura B.2, Vide Apêndice B) ao posicionamento dos sensores, atuadores e microcontrolador estão descritas na Tabela B.1.

	n° Ind.		Distância em relação ao chão da estufa ( $\pm 0,05$ cm)
Sensores	16	DHT 1	43,50
	17	DHT 2	41,00
	18	DHT 3	41,50
	19	DHT 4	104,30
	20	DHT 5	102,40
	21	DHT 6	102,30
Atuadores	1	Hum1	25,60
	2	Hum2	25,60
	3	Hum3	25,60
	4	Hum4	25,60
	9	Coo1	21,50
	10	Coo2	21,50
	11	Coo3	118,50
	12	Coo4	118,50
	5	Fan1	94,20
	6	Fan2	68,50
	7	Fan3	91,30
	8	Fan4	72,50
	22	Arduino	140,00

Tabela B.1. Distância ortogonal dos Sensores e alguns atuadores em relação ao chão da estufa.

## Apêndice C – Análises Da Água e Sementes

Como as sementes do tipo leguminosas tem uma característica simbiótica com certo grupo de bactérias fixadora de nitrogênio, podem ter uma maior influência ao tratamento indireto nas sementes imposto pela ação das espécies reativas presente em PATW como o  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{NO}_2^-$  principalmente. Por este motivo, foram escolhidas as sementes de lentilha (*Lens culinaris*). Esta espécie apresenta um fotoperíodo de 12 h, com faixa de temperatura de 20 a 25 °C, idealmente a 22°C e uma umidade relativa do ar entre 70 e 80 % para germinação plena [77;78].

Com estas condições iniciais, as sementes de lentilhas foram cultivadas em sistema *in vitro* (testes qualitativos) e *in vivo* (grupos de teste quantitativo e definitivos) dentro de porta-amostras constituídas por bandejas plásticas e tubos de ensaio.

Nos grupos de teste LS1 e LS2, as lentilhas foram colocadas, individualmente, na primeira versão de tubo de ensaio do tipo 1, em substratos de algodão neutro (pH 7) colocado de forma cilíndrica. Em bandejas de acrílico (*Germbox*), foram forradas com algodão neutro e papel de germinação de gramatura 65 g/m<sup>2</sup>, ambos em formatos retangulares, sendo que o algodão neutro retangular foi colocado por baixo de dois cortes de papéis de germinação dobrados.

Para grupo de teste LS3, os porta-amostras utilizados são constituídos por bandejas de plástico com 12 divisórias em cada e tubos do tipo 2 (com furos de  $(4,15 \pm 0,03)$  mm de diâmetro na parte inferior) nos quais as sementes foram colocadas a  $(3,50 \pm 0,05)$  cm e  $(7,5 \pm 0,05)$  cm, respectivamente, em relação as bases destes porta-amostras e cobertas de  $(1,00 \pm 0,05)$  cm de altura com a terra (substrato) aproximadamente. Como substrato, a massa de 40 g e 10 g de terra do tipo substrato sem aditivo de fertilizantes artificiais foi utilizada nos recipientes das bandejas e tubos de ensaio, respectivamente, para acondicionar as sementes com o objetivo análoga ao algodão neutro e o papel de germinação. As sementes foram colocadas individualmente nos 40 tubos de ensaio (metade PATW e outra, CONT) e 48, bandejas. Neste último porta-amostra, 8 divisórias foram utilizadas sendo que 3 sementes foram plantadas em cada divisão. Com o sucesso na germinação do grupo de teste LS3, a disposição das amostras, substrato e porta-amostras foram mantidas para os grupos definitivos LS4 e LS6.

O objetivo principal destes substratos foi para retenção do volume de água suficiente para o estudo do desenvolvimento inicial das sementes.

As dimensões dos porta-amostras e alguns substratos (mensuradas com um paquímetro analógico) estão descritas nas Tabelas C.1 e C.2. A massa do substrato de terra foi medida por uma balança digital simples (SF -400).

	Largura ( $\pm 0,03\text{mm}$ )	Comprimento ( $\pm 0,03\text{ mm}$ )	Altura ( $\pm 0,03\text{mm}$ )	Volume aproximado ( $\pm 0,5\text{ml}$ )
Bandeja <i>Germbox</i>	109,20	109,25	33,40	398,47
Bandeja (unidade - vaso/porta-mudas)	33,30	32,20	54,35	58,28
Algodão retangular	7,30	210,20	-----	-----
Papel de germinação (unidade dobrada )	3,65	210,10	-----	-----

Tabela C.1. Dimensões dos porta-amostras de bandejas e alguns substratos para o plantio de sementes de lentilha.

O lote de solo do tipo substrato foi escolhido, pois seu uso é recomendado para o estágio inicial de desenvolvimento da semente, dado que ele pode oferecer maior retenção de água e cobertura da semente dentro de cada porta-amostra. A escolha de tubos de ensaio foi feita para observar como a separação das sementes poderia afetar seu desenvolvimento a partir da eliminação da variável de competição de água pelas sementes, dado que tal competição foi imposta para as demais amostras em outros tipos de porta-amostra (bandejas de plástico e *Germbox*). A partir disso, pôde-se definir como os porta-amostras, sensores e atuadores serão posicionados dentro da estufa para os grupos semanais definitivos LS4 e LS6.

	Diâmetro interno ( $\pm 0,03\text{mm}$ )	Espessura ( $\pm 0,03\text{mm}$ )	Altura ( $\pm 0,03\text{mm}$ )	Volume aproximado ( $\pm 0,05\text{ml}$ )
Tubo de ensaio tipo 1	13,45	1,20	100,20	15,00
Tubo de ensaio tipo 2	14,00	1,10	150,25	20,00

Tabela C.2. Dimensões dos porta-amostras dos diferentes tipos de tubo de ensaio para o plantio de sementes de lentilha.

Com o sistema de controle já definido, as amostras puderam ser testadas e, no final, os grupos definitivos puderam ter a medida de comprimento de caules e raízes das amostras realizada de forma individual com o auxílio do software *IMAGE J* já que os componentes da plântula podem possuir formatos curvilíneos após o período mínimo de germinação. Para diminuir os erros absolutos de medida dos componentes da plântula (Figura C.1), foi feita uma série de 20 medidas para cada componente de cada amostra, obtendo seu respectivo valor médio e desvio padrão amostral como tentativa de aumentar a acurácia da medida.



Figura C.1. Definição para região de raiz e caule para serem medidas através do *IMAGE J*.

Com a medida populacional dos caules e raízes das amostras germinadas, foi feita uma análise de variância conhecida como a ANOVA a partir dos dados plotados em *box-plot* (análise não paramétrica) e filtrados através de cartas de controle para avaliar as duas hipóteses estatísticas propostas pelo Teste F:  $H_0$  e  $H_1$ , onde a primeira hipótese declara que não há diferença estatística entre as médias entre os grupos e a segunda, tal diferença é apresentada. Tais hipóteses são avaliadas a partir do valor-p e a comparação entre o valor F e  $F_{crítico}$ . Quando F é maior que  $F_{crítico}$  e o valor-p maior que 0,05, a hipótese nula ( $H_0$ ) é considerada, mas sendo condições opostas, a  $H_1$  é considerada.

Tempo (min)	pH( $\pm 0,02$ )		ORP ( $\pm 5,0$ mV)		Cond. ( $\pm 0,004$ mS/cm)		TDS ( $\pm 2,6$ ppm)		Temp. ( $\pm 0,5$ °C)	
	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo	Topo	Fundo
0	6,77	6,77	4,0	4,0	0,099	0,099	65,0	65,0	22,6	22,6
5	7,63	7,65	-52,0	-53,0	0,104	0,102	68,5	66,7	24,2	24,2
10	7,84	7,74	-65,0	-59,0	0,104	0,105	68,4	69,1	25,2	25,1
15	7,64	7,66	-63,0	-62,0	0,104	0,105	69,0	68,8	25,0	24,9
30	7,64	7,66	-53,0	-55,0	0,112	0,110	73,8	72,2	25,3	24,5
45	7,51	7,41	-44,0	-39,0	0,115	0,113	75,4	74,6	25,7	25,7
60	7,44	7,33	-41,0	-34,0	0,121	0,120	80,5	79,2	25,3	25,1
75	7,50	7,39	-45,0	-38,0	0,132	0,128	86,5	84,3	24,9	24,8
90	5,05	4,75	100,0	118,0	0,143	0,145	94,6	95,5	26,3	26,4
105	4,25	4,09	147,0	158,0	0,153	0,158	106,5	104,2	27,2	27,1
120	4,10	3,96	157,0	166,0	0,164	0,164	108,8	107,9	26,0	26,1
150	3,82	3,81	174,0	175,0	0,183	0,182	121,4	120,8	26,0	26,2
180	3,66	3,63	181,0	184,0	0,201	0,199	131,5	132,0	26,0	26,2

Tabela C.3. Parâmetros físico-químicos do volume de 250 ml de PATW com o plasma de arco deslizante em função do tempo.

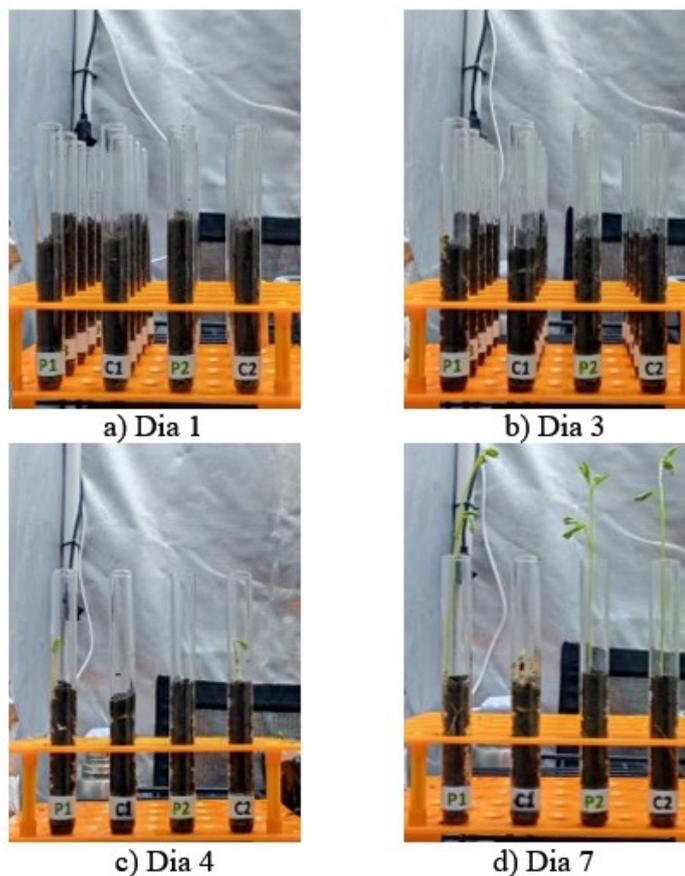


Figura C.2. Germinação de sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) em 2 pares de tubos de ensaio do grupo LS6.

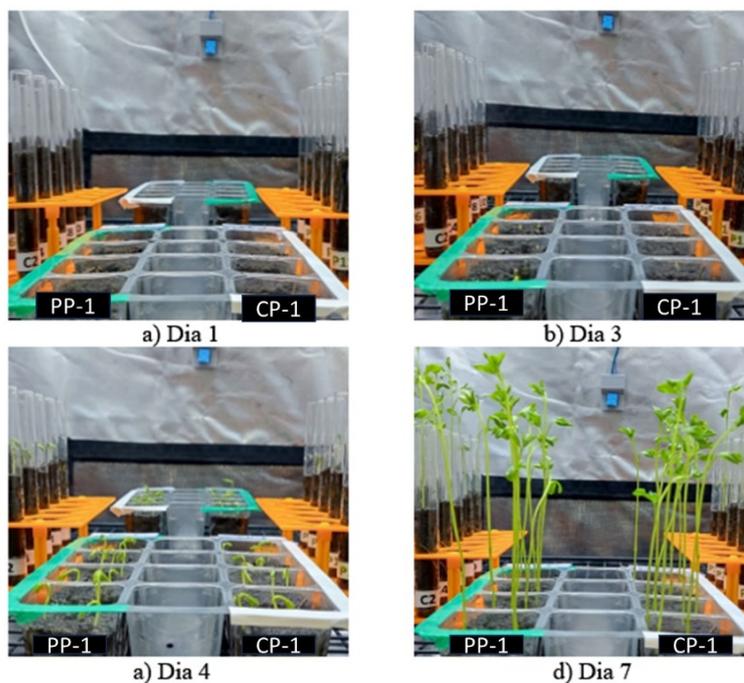


Figura C.3. Germinação de sementes e crescimento das plântulas de lentilhas nos dias 1 (a), 3 (b), 4 (c) e 7 (d) no primeiro conjunto de bandejas de plástico (PP-1: lado esquerdo e CP-1: lado direito) em primeiro plano do grupo LS6.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	12	909,0	75,8	29,8	5,2	
PATW	12	920,0	76,7	10,0	3,0	
Raiz ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	5,0	1,0	5,0	0,2	6,23E-01	4,3
Dentro dos grupos	438,3	22,0	19,9			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	12	1664,0	138,7	99,8	9,6	
PATW	12	1795,0	149,6	157,3	12,0	
Caule ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	714,9	1,0	714,9	5,6	2,77E-02	4,3
Dentro dos grupos	2828,2	22,0	128,6			

Tabela C.4. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em tubos de ensaio no grupo LS4.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	14	1541,5	110,1	628,6	24,2	
PATW	14	1742,9	124,5	594,2	23,5	
Raiz ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1448,4	1,0	1448,4	2,4	1,36E-01	4,2
Dentro dos grupos	15897,4	26,0	611,4			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	14	2086,2	149,0	44,7	6,4	
PATW	14	2269,0	162,1	48,6	6,7	
Caule ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1193,5	1,0	1193,5	25,6	2,89E-05	4,2
Dentro dos grupos	1213,3	26,0	46,7			

Tabela C.5. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em bandejas de plástico no grupo LS4.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	12	914,1	76,2	27,2	4,8	
PATW	12	1207,5	100,6	447,0	19,4	
Raiz ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3587,9	1,0	3587,9	15,1	7,88E-04	4,3
Dentro dos grupos	5216,3	22,0	237,1			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	12	1684,0	140,3	45,8	6,2	
PATW	12	1713,3	142,8	79,5	8,2	
Caule ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	35,9	1,0	35,9	0,6	4,57E-01	4,3
Dentro dos grupos	1378,4	22,0	62,7			

Tabela C.6. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em tubos de ensaio no grupo LS6.

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	14	1460,4	104,3	874,4	27,5	
PATW	14	1613,0	115,2	935,4	28,5	
Raiz ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	3587,9	1,0	3587,9	15,1	7,88E-04	4,3
Dentro dos grupos	5216,3	22,0	237,1			
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância	Desvio Padrão	
Control	14	2029,4	145,0	12,4	3,3	
PATW	14	2114,5	151,0	34,7	5,5	
Caule ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	259,0	1,0	259,0	11,0	2,69E-03	4,2
Dentro dos grupos	611,8	26,0	23,5			

Tabela C.7. Parâmetros estatísticos relativos ao comprimento de raiz e caule em bandejas de plástico no grupo LS6.

## **Apêndice D – Resumo Apresentado e Premiado**

**1. Água Ativada por Plasma Frio do tipo Arco Deslizante à Pressão Atmosférica.**  
**Filgueira, G. A.;** Leite, D.M; Pessoa, R.S.; da Silva Sobrinho, A.S. Apresentação em Pôster (Apresentado por Filgueira, G. A) premiada em 2º Lugar na Categoria Pós-Graduação - Mestrado no XV Encontro de Física do ITA (XV-EFITA), 2022, São José dos Campos. Realizado por Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

## Anexo A – Módulo Sensor DTH 11

Variável	Faixa de Medição	Acurácia	Resolução	Componente Eletrônico
Umidade Relativa	5 à 95% RH	$\pm 5\%RH$	1%RH	3 pinos de conexão
Temperatura	-20 à 60°C	$\pm 2^{\circ}C$	1°C	

Tabela A.1. Algumas especificações do módulo sensor de umidade relativa e temperatura do modelo DHT 11. Disponível em: [www.aosong.com](http://www.aosong.com). Acesso em: 14 fev.2022.

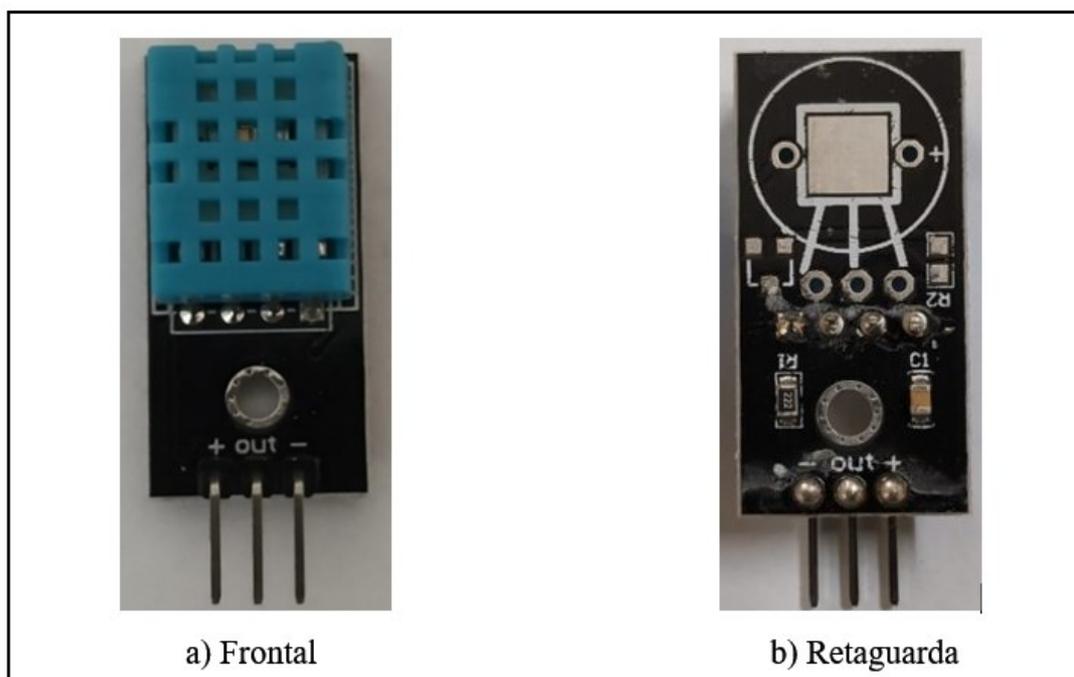


Figura A.1. Vistas frontal (a) e da retaguarda (b) do módulo sensor de umidade relativa do ar e temperatura do modelo DHT 11. Disponível em: [www.aosong.com](http://www.aosong.com). Acesso em: 14 fev.2022.

## Anexo B – Transformador Flyback para Geração de Alta Tensão

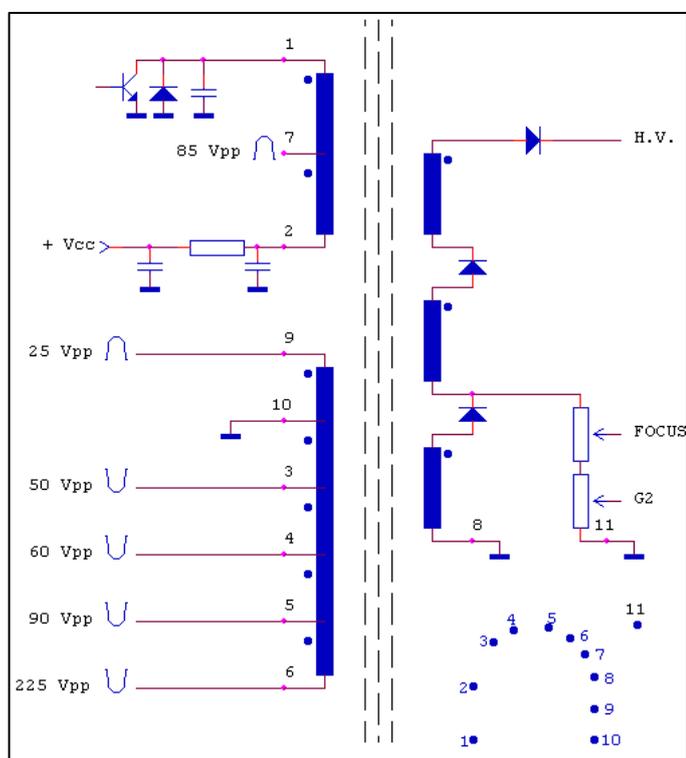


Figura B.1. Esquema elétrico do trafo interno do transformador *flyback*. Disponível em: <https://www.donberg.ie/>. Acesso em: 02 abr.2021.

O transformador *flyback* é composto por dois circuitos relativos ao primário e secundário. No primário, os pinos 1 e 2 são conectados a fonte de potência primária (saída do reator de lâmpada fluorescente) e, no secundário, os pinos HV e 8 estabelecem a saída de alta tensão suficiente para ruptura dielétrica do ar atmosférica e formação da descarga em arco deslizando.

## Anexo C – Sistema de Controle de Dados

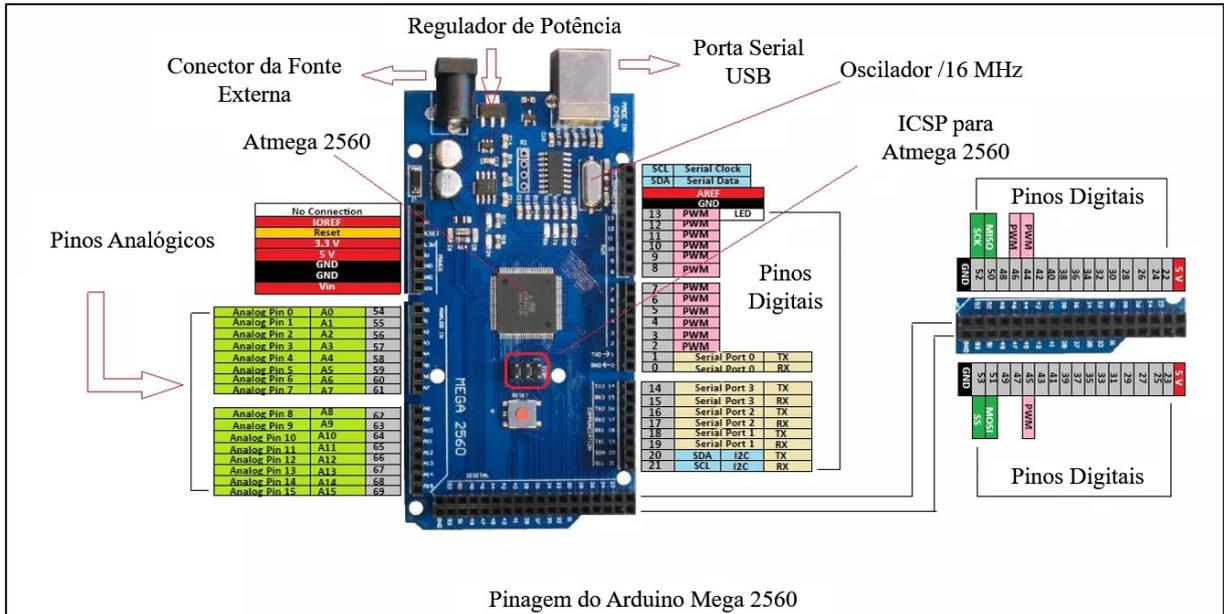


Figura C.1. Pinagem da placa do microcontrolador da plataforma Arduino Mega 2560

Traduzido de <https://www.theengineeringprojects.com/>.

A placa de aquisição de dados da plataforma Arduino é composto por conexões analógicas e digitais para recepção de dados dos 6 sensores de temperatura e umidade relativa do ar e envio de comandos para os atuadores como umidificadores e coolers para manter o sistema minimamente controlado no interior da estufa *indoor* utilizada como ambiente propício para o estudo do tratamento indireto na semente de lentilha à plasma.

## Anexo D – Análise Morfológica e Química da Semente

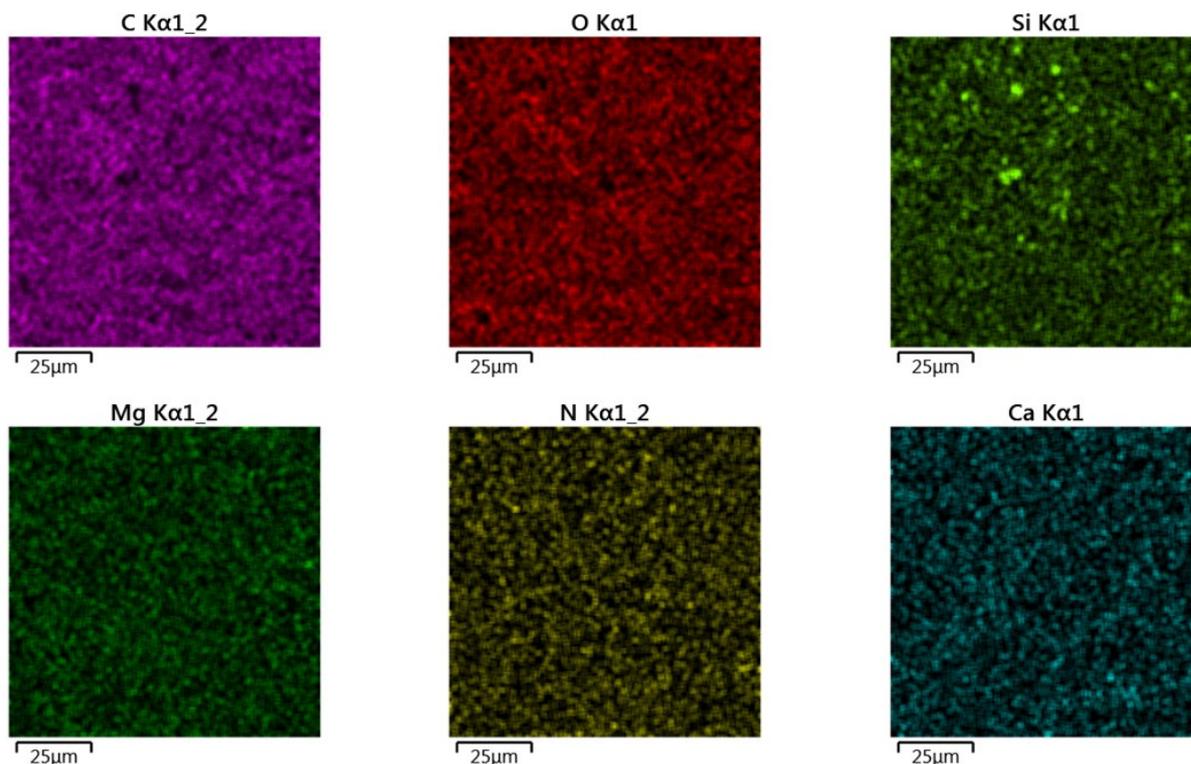


Figura D.1. Legenda colorimétrica dos possíveis elementos químicos detectados por EDS na superfície das amostras de lentilhas. Obtido no *Software* da AZtec, OXFORD Instruments.

Esta legenda colorimétrica é relacionada as cores relativas aos componentes químicos como C, O, Si, Mg, N e Ca a partir da análise por EDS para avaliação de composição química elementar superficial das lentilhas.

