

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA
IRRADIAÇÃO POR ULTRAVIOLETA DE
BIOMOLÉCULAS

Carlos Daniel Silva Mota

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador: Doutor Paulo António Martins Ferreira Ribeiro.

Co-Orientador: Doutor Pedro António de Brito Tavares.

Constituição do Júri:

Presidente: Doutor Mário António Basto Forjaz Secca.

Arguente: Doutor Paulo Manuel Assis Loureiro Limão-Vieira.

LISBOA

Abril 2011

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA IRRADIAÇÃO POR ULTRAVIOLETA DE BIOMOLÉCULAS

Carlos Daniel Silva Mota

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Biomédica

Orientador: Doutor Paulo António Martins Ferreira Ribeiro.

Co-Orientador: Doutor Pedro António de Brito Tavares.

LISBOA
Abril 2011

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA IRRADIAÇÃO POR ULTRAVIOLETA DE BIOMOLÉCULAS

Copyright©2011 - Todos os direitos reservados. Carlos Daniel Silva Mota. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

*“Não tenho nada a oferecer-vos senão sangue,
trabalho, suor e lágrimas...”*

Winston Churchill

A todos os que nunca acreditaram em mim.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Paulo Ribeiro pelo seu grande apoio, pela sua dedicação, disponibilidade e atenção. Mas acima de tudo, agradeço pela sua paciência. A sua boa disposição e positivismo foram essenciais para realizar este trabalho.

Ao Professor Pedro Tavares, agradeço o seu apoio e a sua disponibilidade.

À Professora Doutora Maria Raposo, agradeço todos os conselhos e toda a atenção que teve para comigo e com o meu trabalho.

Ao Filipe Folgosa, agradeço por se ter mostrado sempre disponível para me ajudar.

Agradeço a todos os elementos da linha 5 do CEFITEC, por se preocuparem com o meu trabalho e por me ajudarem em tudo o que precisei.

Ao Sr. António Arez da Silva, agradeço por todos os momentos de boa disposição e pela sua enorme disponibilidade.

Ao Faustino e ao Sr. Eduardo, agradeço por toda a ajuda que me deram na oficina do Departamento de Física.

Agradeço à Cátia por ser uma Mulher fantástica. Agradeço por ter tido paciência para me aturar e por ter tido a coragem de me chamar à razão quando tal era necessário. Sem o seu amor, sem a sua dedicação e sem a sua paixão, este trabalho tinha sido bastante mais difícil. Agradeço pela força que me transmitiu sempre que foi necessário. Fez de mim uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Isabel e José Carlos, agradeço pela forma como me ensinaram a ser uma melhor pessoa. Tudo o que sou hoje deve-se aos seus ideais, aos seus ensinamentos e às suas experiências. Quando foi preciso uma palavra amiga, uma palavra de apoio e força mental, eles nunca ma negaram. São o meu modelo de vida e sem eles, sem o seu esforço para me manterem no rumo certo, não seria a pessoa que hoje sou.

À minha irmã, Carla, agradeço por se disponibilizar sempre para o que fosse preciso, desde jantares de curso em Coimbra até momentos de parvoíce aguda. É o meu maior orgulho.

À minha irmã, Susana e ao meu cunhado, José Manuel, agradeço pela disponibilidade e por se preocuparem comigo.

Aos meus avós, Lela e António, por se preocuparem comigo, pelas palavras de força e por me ajudarem sempre que precisei. Um especial agradecimento ao meu avô, que me acompanhou diariamente neste caminho universitário. Onde quer que esteja, agradeço-lhe por não se ter esquecido de mim, nunca.

Ao meu padrinho, Edmundo, agradeço por todos os momentos de paródia e boa disposição. Apesar da enorme diferença de idades, via-me e tratava-me como um amigo do coração. Partiu cedo de mais.

Ao Ludovico, agradeço por ser o meu melhor amigo. Neste percurso universitário revelou-se uma pessoa preponderante no momento de tomar decisões. Os seus conselhos, a sua boa disposição e o seu companheirismo foram importantes para chegar a esta fase.

Aos meus amigos André, João, Ana, Jeremias e Hugo, agradeço por estarem sempre disponíveis para me aturar. Agradeço pelo esforço de me manterem bem-disposto e motivado.

Resumo

Foi desenvolvido um sistema destinado ao estudo do efeito da radiação Ultravioleta em amostras biológicas, nomeadamente em estruturas membranares constituídas por lípidos, proteínas, DNA e moléculas intercalantes de DNA potenciadoras do efeito da radiação. O sistema desenvolvido é constituído por uma fonte de luz Ultravioleta, uma lâmpada de vapor de mercúrio com incidência predominante no comprimento de onda de 254 nm, um porta amostras ajustável que permite variar a distância da fonte de luz, possibilitando assim ajustar a irradiância a que a amostra está exposta. O sistema permite ainda o controlo do tempo de exposição, medição do tempo de vida da lâmpada de vapor de mercúrio, medir a temperatura da amostra e a ventilação da câmara da amostra para remoção do ozono acumulado. O sistema permite variar a irradiância entre 0,07 e 70 W/m² e apresenta uma distribuição ao longo da superfície da porta amostras de irradiância que não varia mais do que 15% em relação ao valor central.

Palavras-chave: Ultravioleta-C, Lâmpada de vapor de mercúrio, Irradiância.

Abstract

An ultraviolet system was developed for the study of the Ultraviolet light effect in biological samples, particularly membrane structures of lipids, proteins, DNA and DNA intercalating molecules which enhance the radiation effects. The system is composed by an Ultraviolet light source, a 254 nm wavelength low pressure mercury vapour lamp, an adjustable sample holder allowing to vary the distance between the sample and light source, and thus adjust the irradiance to which the sample is exposed. The system allows control of exposure time, lamp lifetime measurements, sample temperature monitoring and sample chamber ventilation, for ozone removal. The system allows varying the irradiance between 0,07 and 70 W/m² and presents an irradiation distribution along the sample holder surface which does not depreciate more than 15% with respect to central value.

Keywords: Ultraviolet-C, Mercury vapour lamp, Irradiance.

Índice de matérias

Agradecimentos	vi
Resumo	viii
Abstract	ix
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Tabelas.....	xv
Simbologia e Notações	xvi
Capítulo 1. Introdução	1
Capítulo 2. A radiação Ultravioleta	3
2.1. Ultravioleta	3
2.2. Interação da radiação com a matéria	4
2.3. Efeitos da radiação UV.....	5
2.4. Ultravioleta-C.....	6
2.4.1. Efeitos da radiação Ultravioleta-C no DNA.....	6
2.4.2. Fotoreactivação e reparação	8
2.4.3. Efeito Germicida	9
2.4.4. Modelação do efeito germicida.....	9
2.4.5. Exposição à radiação e dose	10
2.4.6. Mecanismo de desinfecção	10
2.4.7. Os modelos matemáticos da cinética germicida	12
2.4.8. Estudos na <i>E.Coli</i>	15
Capítulo 3. O Sistema.....	17
3.1. Câmara de Irradiação.....	17
3.1.1. Características.....	17
3.1.2. Sistema de guiamento de porta amostras.....	19
3.2. Lâmpada	21
3.2.1. Tipos de Lâmpadas	21
3.2.2. Funcionamento	24
3.2.3. Princípios da lâmpada de baixa pressão.....	26
3.2.4. Balastros	27
3.2.5. Funcionamento Balastro-Lâmpada.....	28
3.2.6. Produção de Ozono	29
3.2.7. Cuidados	30

3.2.8. Manutenção.....	31
3.2.9. Características da lâmpada utilizada	31
3.3. Sistema de Posicionamento.....	32
3.4. Porta amostras.....	36
3.5. Unidade de controlo	39
3.6. Exaustor	43
3.7. Segurança do Sistema.....	43
3.8. O sistema	44
3.9. Orçamento.....	45
Capítulo 4. Teste do Sistema e Resultados Experimentais	46
4.1. Teste 1 – Variação da distância entre a fonte de luz e a amostra.....	46
4.2. Teste 2 – Distribuição da radiação em função da posição do sensor.....	50
4.3. Teste 3 – Distribuição da irradiância em função do tempo de exposição.....	62
Capítulo 5. Conclusões	64
5.1. Conclusões e trabalhos futuros.	64
Referências bibliográficas	66
Anexos	69
1 – Doses de inactivação para alguns microrganismos	69
2 – Lista do material utilizado	70

Índice de Figuras

FIGURA 2. 1 - DIVISÃO DA REGIÃO DO ULTRAVIOLETA DO ESPECTRO, SALIENTANDO-SE A BANDA DE RADIAÇÃO DE UMA LÂMPADA DE BAIXA PRESSÃO DE MERCÚRIO.	3
FIGURA 2. 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO PROCESSO DE ABSORÇÃO.	4
FIGURA 2. 3 - ESPECTROS DE ABSORÇÃO DAS DIFERENTES BASES AZOTADAS DOS ÁCIDOS NUCLEICOS.	6
FIGURA 2. 4 - OS QUATRO COMPONENTES DOS ÁCIDOS NUCLEICOS QUE FORMAM O DNA.	7
FIGURA 2. 5 - MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS FOTO-PRODUTOS MAIS FREQUENTES APÓS EXPOSIÇÃO AO ULTRAVIOLETA-C.	7
FIGURA 2. 6 - MECANISMO DE FOTOREACTIVAÇÃO COM LUZ VISÍVEL.	8
FIGURA 2. 7 - DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DA IRRADIÂNCIA PARA UMA FONTE DE RADIAÇÃO IDEAL E LINEAR.	10
FIGURA 2. 8 - CURVA TÍPICA DA INACTIVAÇÃO GERMICIDA, ONDE SÃO ILUSTRADAS AS TRÊS DIFERENTES REGIÕES.	12
FIGURA 2. 9 - MODELO LOGARITMO-LINEAR.	13
FIGURA 2. 10 - MODELO DE CHICK-WATSON.	14
FIGURA 2. 11 - MODELO DE HOM ALTERADO.	15
FIGURA 2. 12 - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DA E.COLI COMPARADO COM O ESPECTRO DE ABSORÇÃO DO DNA.	15
FIGURA 3. 1 - ESQUEMA E DIMENSÕES (EM MILÍMETROS) DO ARMÁRIO UTILIZADO. É MOSTRADA A UNIDADE DE CONTROLO, O EXAUSTOR DE AR, O INDICADOR DE LUZ UV LIGADA, O FECHO DE SEGURANÇA E O RESPIRADOR.	17
FIGURA 3. 2 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DOS PERFIS UTILIZADOS.	19
FIGURA 3. 3 - ESQUEMA DO INTERIOR DE UMA DAS FACES LATERAIS DO ARMÁRIO E INDICAÇÃO DA POSIÇÃO DOS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO DOS PERFIS.	20
FIGURA 3. 4 - ESQUEMA DA FACE SUPERIOR DA CAIXA DE CONTROLO POSICIONADA NA TAMPA SUPERIOR DO ARMÁRIO, SENDO POSSÍVEL IDENTIFICAR O VENTILADOR E O POSICIONAMENTO DO ELEVADOR COLOCADO NO INTERIOR DA CAIXA DE CONTROLO.	20
FIGURA 3. 5 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DA LÂMPADA UTILIZADA.	21
FIGURA 3. 6 - ESPECTRO DE INTENSIDADE DAS LÂMPADAS DE BAIXA E MÉDIA PRESSÃO DE MERCÚRIO E COMPARAÇÃO COM O ESPECTRO DE ABSORÇÃO DA E.COLI.	22
FIGURA 3. 7 - ESPECTRO DE EMISSÃO DE UMA LÂMPADA UV-C DE BAIXA PRESSÃO DE MERCÚRIO.	22
FIGURA 3. 8 - VARIAÇÃO DA INTENSIDADE LUMINOSA UV-C DE UMA LÂMPADA DE BAIXA PRESSÃO DE MERCÚRIO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE UTILIZAÇÃO.	24
FIGURA 3. 9 - VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA LÂMPADA UV-C DE BAIXA PRESSÃO DE MERCÚRIO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NO INTERIOR DA LÂMPADA.	24
FIGURA 3. 10 - VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA DIFERENTES METAIS.	25
FIGURA 3. 11 - ESQUEMA DO BALASTRO ELECTROMAGNÉTICO.	28
FIGURA 3. 12 - BANDAS DE FORMAÇÃO DE OZONO APÓS EXPOSIÇÃO DO OXIGÉNIO AO ULTRAVIOLETA.	29
FIGURA 3. 13 - ESQUEMA DA LIGAÇÃO BALASTRO-LÂMPADA. É VISÍVEL O BALASTRO (1) E A LÂMPADA (2). O BALASTRO É LIGADO AO NEUTRO E O ARRANCADOR DA LÂMPADA (S) ENCONTRA-SE NO SEU INTERIOR.	31

FIGURA 3. 14 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL (A) E COTAS (EM MILÍMETROS) DAS POLIAS DE PASSAGEM DO CABO DE AÇO, COLOCADAS NA TAMPA INFERIOR DO ARMÁRIO (B).	32
FIGURA 3. 15 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DO EIXO DE SUPORTE DOS CABOS DE AÇO. SÃO MOSTRADAS AS POLIAS DE PASSAGEM DO CABO, OS SUPORTES DO EIXO QUE SE LIGAM À TAMPA SUPERIOR DO ARMÁRIO E A POLIA CENTRAL PERTENCENTE AO MOTOR DO ELEVADOR.....	32
FIGURA 3. 16 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DO EIXO DE SUPORTE DOS CABOS DE AÇO.	33
FIGURA 3. 17 - ESQUEMA DO MOTOR UTILIZADO COM PORMENOR DA LIGAÇÃO DO MOTOR À RODA DENTADA QUE FAZ A TRANSMISSÃO DO MOVIMENTO.	33
FIGURA 3. 18 - ESQUEMA DA INTERACÇÃO ENTRE O MOTOR DO ELEVADOR E A RODA DENTADA QUE FAZ A LIGAÇÃO AO SUPORTE. A TRANSMISSÃO DO MOVIMENTO É FEITA POR VIA DE UM PARAFUSO DO TIPO SEM FIM.....	33
FIGURA 3. 19 - ESQUEMA ELECTRÓNICO DO INTERRUPTOR INVERSOR DE POLARIDADE.	34
FIGURA 3. 20 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL (A) E MEDIDAS (EM MILÍMETROS) DOS INTERRUPTORES DE FIM DE CURSO (B). ..	34
FIGURA 3. 21 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DO INTERIOR DO ARMÁRIO. É MOSTRADO O SUPORTE DE AMOSTRAS, A FITA MÉTRICA INDICADORA DA DISTÂNCIA À LÂMPADA, O CASQUILHO DA LÂMPADA E OS EIXOS VERTICAIS.....	35
FIGURA 3. 22 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DO PORTA DE AMOSTRAS, ONDE SÃO IGUALMENTE APRESENTADOS OS ROLAMENTOS, AS PEÇAS ESTABILIZADORAS E OS PARAFUSOS DE FIXAÇÃO.	36
FIGURA 3. 23 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL (A) E COTAS (EM MILÍMETROS) DOS ROLAMENTOS DE LIGAÇÃO DO PORTA AMOSTRAS AO PERFIL DE GUIA (B).	36
FIGURA 3. 24 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL (A) E COTAS (EM MILÍMETROS) DAS PEÇAS DE PASSAGEM DOS EIXOS VERTICAIS (B).	37
FIGURA 3. 25 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DO SUPORTE DE AMOSTRAS, ABERTURAS PARA COLOCAÇÃO DAS PEÇAS DE PASSAGEM DOS EIXOS, ORIFÍCIOS DE PASSAGEM E FIXAÇÃO DOS CABOS DE AÇO.	38
FIGURA 3. 26 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DO SUPORTE DE AMOSTRAS E POSICIONAMENTO DO SENSOR DE TEMPERATURA.	38
FIGURA 3. 27 - ESQUEMA E COTAS (EM MILÍMETROS) DO SENSOR DE TEMPERATURA.....	38
FIGURA 3. 28 - ESQUEMA DA CAIXA DE CONTROLO.	39
FIGURA 3. 29 - ESQUEMA ELECTRÓNICO DA CAIXA DE CONTROLO.	41
FIGURA 3. 30 - LOCALIZAÇÃO, CALIBRE E RESPECTIVO INSTRUMENTO-ALVO DOS FUSÍVEIS UTILIZADOS.....	42
FIGURA 3. 31 - ESQUEMA TRIDIMENSIONAL (A) E COTAS (EM MILÍMETROS) DO VENTILADOR (B).....	43
FIGURA 3. 32 - ESQUEMA DA PARTE SUPERIOR DO INTERIOR DO ARMÁRIO.	44
FIGURA 3. 33 - ESQUEMA DA PARTE INFERIOR DO ARMÁRIO.	45
FIGURA 4. 1 - CURVA DA IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA À FONTE.....	46
FIGURA 4. 2— CURVA TEÓRICA E CURVA EXPERIMENTAL DA IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	48
FIGURA 4. 3 - ESQUEMA DO POSICIONAMENTO DO SENSOR DE RADIAÇÃO UV-C.	50
FIGURA 4. 4 - DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A UMA DISTÂNCIA DE 10 MM À FONTE.....	51
FIGURA 4. 5 - GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A UMA DISTÂNCIA DE 10 MM À FONTE.....	52

FIGURA 4. 6 - DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS PARA UMA DISTÂNCIA DE 200 MM À FONTE.	53
FIGURA 4. 7 - GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A UMA DISTÂNCIA DE 200 MM À FONTE.....	54
FIGURA 4. 8 - DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS PARA UMA DISTÂNCIA DE 500 MM À FONTE.	55
FIGURA 4. 9 - GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A UMA DISTÂNCIA DE 500MM À FONTE.....	56
FIGURA 4. 10 - DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A UMA DISTÂNCIA DE 1000 MM À FONTE.....	57
FIGURA 4. 11 - GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A 1000MM À FONTE. .	58
FIGURA 4. 12 - DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS PARA UMA DISTÂNCIA DE 1700 MM À FONTE.....	59
FIGURA 4. 13 - GRÁFICO TRIDIMENSIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DA IRRADIÂNCIA NO PORTA AMOSTRAS A 1700MM À FONTE. .	60
FIGURA 4. 14- DIÂMETRO ÚTIL EM FUNÇÃO DA DISTANCIA À LÂMPADA.	61
FIGURA 4. 15 - CURVA DA IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DO TEMPO OCORRIDO COM A FONTE DE LUZ UV-C LIGADA.	62
FIGURA 4. 16 - CURVA EXPERIMENTAL OBTIDA PARA UMA DISTÂNCIA DE 1000 MM À FONTE.....	63

Índice de Tabelas

TABELA 2.1 - RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE K E RESPECTIVA DOSE DE INACTIVAÇÃO DE 90% DA POPULAÇÃO INICIALMENTE EXPOSTA AO ULTRAVIOLETA-C.	11
TABELA 2.2 - TEMPO DE EXPOSIÇÃO DE UMA AMOSTRA BIOLÓGICA COM $k=0,1\text{m}^2/\text{J}$ PARA DIFERENTES DISTÂNCIAS DA AMOSTRA A UMA LÂMPADA GERMICIDA DE POTÊNCIA UV-C 1,1W.	16
TABELA 3.1 - TEMPO DE EXPOSIÇÃO NECESSÁRIO PARA ATINGIR A D_{90} PARA MICRORGANISMOS COM VALORES DE K COMPREENDIDOS NO INTERVALO $[0,0005\text{m}^2/\text{J} : 2,494\text{m}^2/\text{J}]$	18
TABELA 3.2 - REFLECTIVIDADE DE ALGUNS MATERIAIS.	19
TABELA 3.3 - ENERGIAS DE IONIZAÇÃO DOS GASES RAROS E ENERGIA DE IONIZAÇÃO DO MERCÚRIO.	25
TABELA 3.4 - NÍVEIS DE EXPOSIÇÃO ADMISSÍVEL AO UV-C SEGUNDO A ACGIH.	30
TABELA 3.5 - ORÇAMENTO UTILIZADO NA CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE IRRADIAÇÃO POR ULTRAVIOLETA.	45
TABELA 4.1 - VALORES TEÓRICOS E PRÁTICOS PARA A IRRADIÂNCIA EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA À LÂMPADA.	47
TABELA 4.2 - VALORES DA IRRADIÂNCIA PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES.	51
TABELA 4.3 - VALORES DA IRRADIÂNCIA PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES.	53
TABELA 4.4 - VALORES DA IRRADIÂNCIA PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES.	55
TABELA 4.5 - VALORES DA IRRADIÂNCIA PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES.	57
TABELA 4.6 - VALORES DA IRRADIÂNCIA PARA AS DIFERENTES POSIÇÕES.	58

Simbologia e Notações

α	Ângulo
β	Coefficiente do modelo matemático de Weibul
ε	Energia de um quantum radiante, na relação de Planck
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência
μ	Coefficiente do modelo matemático de Weibul
ϕ	Potência Ultravioleta da lâmpada
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
RNA	Ácido Ribonucleico
A	Ampere
Atm	Atmosfera
Ar	Árgon
ACGIH	<i>American Congress of Governmental and Industrial Hygienist</i>
AC	Alternating Current
BaO	Óxido de Bário
bar	Unidade S.I. para pressão
c	Velocidade da luz no vácuo, $2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
CFC	Clorofluorcarbonetos
C-G	Citosina-Guanina
C	Concentração de microrganismos após exposição
C_0	Concentração de microrganismos antes da exposição
[c]	Concentração de agente desinfetante
°C	Unidade S.I. para temperatura - Grau Célsius
CaO	Óxido de Cálcio
D	Dose
D_{90}	Dose necessária para inativação de 90% da população inicial
DC	Direct Current
DPDT	Tipo de Interruptor: Double pole, double throw
dB	Decibel
eV	Electrão-Volt
<i>et al</i>	E outros
e^-	Electrão

F1	Fusível 1
F2	Fusível 2
F3	Fusível 3
F4	Fusível 4
F5	Fusível 5
h	Constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34}$ Js
H	Variável do modelo matemático de Hom
HID	Tipo de lâmpada: High Discharge Intensity
Hg	Mercúrio
Hz	Hertz
I	Irradiância
km	Kilometro
k	Constante de inactivação germicida
k_2	Constante de primeira ordem do decaimento Ultravioleta
kHz	Kilohertz
k Ω	Kiloohm
kV	Kilovolt
l	Comprimento de uma fonte de radiação linear e ideal
m/s	Metro por segundo
m ² Kg/s	Constante de Plank
m ² /J	Unidade S.I. para a constante de inactivação germicida
mm	Milímetro
mbar	Milibar
m	Metro
mA	Miliampere
m ³ /h	Metro cúbico por hora
m ³	Metro cúbico
nm	Nanómetro
N _t	População final após exposição
N ₀	População inicial antes da exposição
n	Ordem da reacção
NTCH	Coefficiente de temperatura negativa
O	Oxigénio
O ₂	Oxigénio molecular

O ₃	Ozono
p	Momento linear
Pa	Pascal
rad	Radiano
S	Fracção entre população final e inicial
SrO	Óxido de Estrôncio
s	Unidade S.I. para tempo: segundo
SPST	Tipo de interruptor: Single pole, single throw
t	Tempo
T-A	Timina-Adenina
UV	Ultravioleta
UV-A	Ultravioleta-A
UV-B	Ultravioleta-B
UV-C	Ultravioleta-B
UV-V	Ultravioleta- Vácuo
V	Volt
W	Watt
W/m ²	Watt por metro quadrado
Ws/m ²	Watt segundo por metro quadrado

Capítulo 1. Introdução

A radiação solar que atinge a superfície terrestre possui comprimentos de onda que podem ser prejudiciais. Dos comprimentos de onda que atingem a superfície, os que se enquadram na radiação Ultravioleta são os mais perigosos. A radiação provoca uma série de efeitos nos organismos vivos, nos ecossistemas aquáticos e terrestres.¹ Estes efeitos podem ser benéficos como a produção fotoquímica de vitamina D, que favorece o crescimento ósseo. Podem ser igualmente negativos, como estarem na origem do cancro de pele e queimaduras solares.¹

Dos diversos estudos que têm sido levados a cabo a fim de estudar os efeitos da radiação Ultravioleta, conclui-se que dependendo da dose, esta radiação pode causar danos no DNA e nas proteínas dos organismos vivos,² sendo potencialmente mutagénica, citotóxica e carcinogénica.³

A região Ultravioleta do espectro electromagnético é geralmente dividida em quatro regiões específicas: UV-A (400 - 315 nm), UV-B (315 - 280 nm), UV-C (280 - 200nm) e UV-V (200 - 100 nm)³. Apenas 10% da luz solar que atinge a superfície terrestre é radiação Ultravioleta⁴, sendo 96,5% do tipo Ultravioleta-A e 3,5% do tipo Ultravioleta-B.⁵

Das quatro regiões definidas no Ultravioleta, o UV-B e o UV-C são as regiões mais perigosas, sendo de destacar o UV-C por ser a radiação mais energética e a menos penetrante. De facto, esta radiação tem um efeito altamente germicida, isto é, possui a capacidade de esterilizar uma amostra biológica. Esta capacidade germicida é frequentemente utilizada para esterilizar superfícies, água e ar.² No entanto, a radiação UV-C não tem sido, até recentemente, alvo de estudos devido à existência da camada do ozono. A camada do ozono, situada na estratosfera (15 a 30 km da superfície), funciona como um filtro à radiação Ultravioleta, absorvendo todo o Ultravioleta-C e grande parte do Ultravioleta-B.⁶ Nas últimas décadas, vários estudos têm evidenciado uma diminuição da camada do ozono,⁷ essencialmente atribuída a factores de origem humana: o crescimento da concentração de clorofluorcarbonetos (CFC's) e o aumento da produção de gases de estufa.^{6,7}

Como consequência da diminuição da camada do ozono, os níveis de radiação Ultravioleta-B e Ultravioleta-C na superfície terrestre têm vindo a aumentar. Actualmente, existem locais na superfície terrestre em que os níveis de UV-C correspondem a 1% da radiação Ultravioleta solar. Com o aumento dos níveis de radiação Ultravioleta-C à superfície terrestre, surge a necessidade de se estudarem os efeitos desta no ser humano. Os comprimentos de onda referentes ao Ultravioleta-C englobam a banda de absorção de

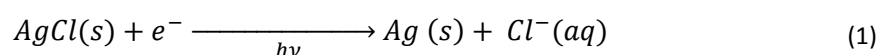
radiação do DNA, sendo este facto a razão do seu potencial destrutivo. Um dos efeitos da absorção de Ultravioleta-C por parte do DNA é a formação de dímeros de timina na dupla cadeia que podem resultar na incapacidade de replicação do DNA e em casos mais graves, resultar em mutações génicas.

Torna-se assim relevante desenvolver estudos mais específicos, de forma a poder conhecer cada vez melhor este tipo de radiação, os seus efeitos no ser humano, desenvolver formas de protecção e também desenvolver novas terapias. Foi neste âmbito que se desenvolveu um sistema que permita irradiar amostras biológicas com radiação Ultravioleta-C.

Este trabalho descreve o projecto, desenvolvimento e caracterização deste sistema e encontra-se dividido em 5 capítulos. No capítulo 2, será analisado um dos componentes do espectro electromagnético, o Ultravioleta. Serão introduzidas algumas noções teóricas necessárias para contextualizar os conceitos utilizados ao longo desta dissertação e serão apresentados modelos matemáticos que suportam o desenho do sistema e a escolha dos componentes do mesmo. Serão estudados conceitos como a interacção da radiação com a matéria, mecanismos de interacção da radiação com o DNA, Ultravioleta-C e efeito germicida. De seguida, no capítulo 3 são descritos os componentes do sistema: a câmara, a fonte de luz, o elevador, o porta amostras, a unidade de controlo e o ventilador. Serão apresentados e explicados vários esquemas técnicos que permitem obter uma noção do sistema real. No capítulo 4, serão explicados os testes levados a cabo para aferir da efectividade do sistema. Serão igualmente apresentados e discutidos os resultados desses testes. Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho e as perspectivas futuras no desenvolvimento do projecto.

Capítulo 2. A radiação Ultravioleta

Em 1801, John Ritter (1776 - 1810) descobre a radiação Ultravioleta.⁹ Através de experiências de mistura de luz solar através de filtros que eliminavam os componentes da luz, o infravermelho e ondas de comprimento de onda superiores, foi capaz de mostrar que a prata reduzida podia ser produzida pela irradiação do cloreto de prata com luz invisível, de comprimento de onda menor que a parte violeta do espectro visível. A redução da prata é explicada pela equação seguinte.



2.1. Ultravioleta

A radiação Ultravioleta compreende os comprimentos de onda entre 100 nm a 400 nm, correspondendo a uma energia dos fótons entre os 12,4 eV e 3,10 eV respectivamente.⁹ Esta radiação é considerada não ionizante, ou seja, dissipa a energia sob a forma de calor não ionizando os átomos, ao contrário das radiações ionizantes que têm a capacidade de retirar os electrões das orbitais.¹⁰ Um átomo pode emitir um fóton UV quando um electrão executa uma transição a partir de um estado excitado para o estado fundamental.⁹

Este tipo de radiação electromagnética tem 4 regiões importantes, conforme ilustrado na figura 2.1.

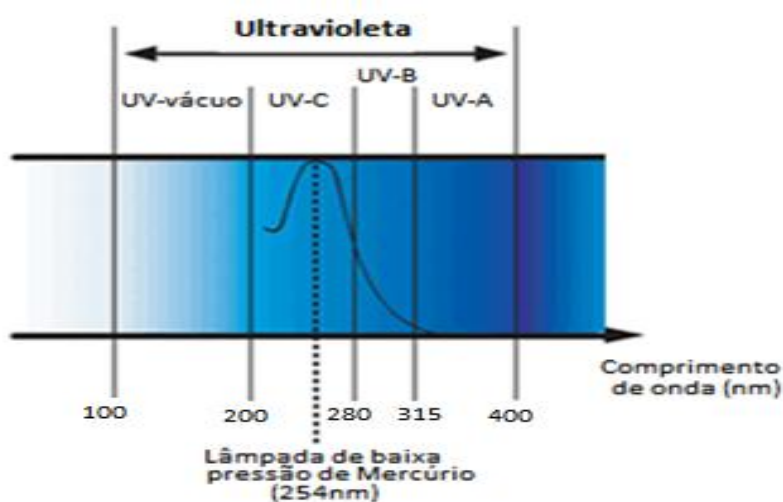


Figura 2. 1 - Divisão da região do Ultravioleta do espectro, salientando-se a banda de radiação de uma lâmpada de baixa pressão de Mercúrio.¹¹

- UV-A (400 – 315 nm) – Neste intervalo de comprimentos de onda, a radiação é considerada pouco energética, sendo no entanto a que penetra mais profundamente na

pele¹², podendo atingir os tecidos basilares da pele. Provoca o envelhecimento da pele e alguns tipos de cancro, como o melanoma.¹⁰

- UV-B (315 – 280 nm) – Esta região do Ultravioleta é conhecida por causar queimaduras, cataratas, danos no sistema imunitário e cancro da pele.¹⁰ É a radiação mais energética que chega à superfície¹³ e é absorvida pela epiderme¹².
- UV-C (280 – 200 nm) – São os comprimentos de onda mais carcinogénicos. É neste intervalo que se verifica o efeito germicida¹². É também nesta gama de comprimentos de onda que se verifica uma banda de absorção importante do DNA.⁴
- UV-V (vácuo) (200 – 10 nm) – Neste intervalo, encontra-se uma região que ainda não está bem definida. Estas radiações não se transmitem através do ar, sendo absorvidas pelo Oxigénio e Nitrogénio antes de atingirem a atmosfera.¹⁴

A radiação Ultravioleta é considerada uma radiação actínica. A radiação actínica é toda a radiação electromagnética que consegue produzir reacções fotoquímicas. Estas reacções podem ser do tipo ionização, activação ou dissociação das moléculas.⁴ No caso do Ultravioleta, as reacções mais frequentes são as de dissociação e activação, uma vez que apenas para comprimentos de onda inferiores a 100nm se verifica a ionização das moléculas irradiadas.

2.2. Interacção da radiação com a matéria

Actualmente, estão estudados e documentados três mecanismos distintos de interacção da radiação com a matéria molecular. São eles a absorção, emissão estimulada (fluorescência) e difusão da radiação.³ O objectivo do sistema desenvolvido é justamente a absorção de radiação.

Quando um feixe de radiação atravessa um determinado meio, parte da sua energia pode ser absorvida pelas moléculas e átomos presentes no meio. No caso da absorção, a energia absorvida provoca uma transição electrónica para um nível de energia superior¹⁵, como está representado na figura 2.2. Nesta figura é identificado o fenómeno de transição de um átomo ou molécula de um nível de menor energia, E_1 , para um nível de energia superior, E_2 , após a absorção de um fóton.

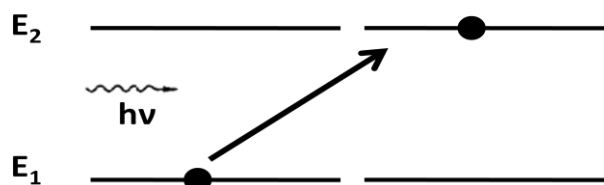


Figura 2.2 - Representação esquemática do processo de absorção.³

A relação entre a energia absorvida numa transição electrónica, a frequência (ν) e comprimento de onda (λ) da radiação produzida nessa transição é:

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Onde h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vazio e ΔE é a energia absorvida numa transição³

2.3. Efeitos da radiação UV

No caso do Ultravioleta proveniente da radiação solar, apenas o UV-A e UV-B atingem a superfície. O UV-B é mais nocivo do que o UV-A, sendo responsável por cerca de 80% dos efeitos da exposição solar, sendo que o UV-A é responsável por apenas 20%.⁷ O UV-C é absorvido pela camada do ozono e não representa um perigo.³ No entanto, devido ao aumento do buraco do ozono o UV-C começa a ser uma preocupação, sendo o estudo dos seus efeitos cada vez mais relevante.

A exposição à radiação solar é benéfica para o corpo humano, sendo um dos exemplos mais estudados, o aumento da formação da vitamina D, que é responsável pelo metabolismo ósseo. No entanto, a exposição prolongada à radiação pode revelar-se bastante prejudicial.

Macroscopicamente, o Ultravioleta danifica a pele e os olhos. Na pele, as maiores consequências são a formação de queimaduras e manchas, envelhecimento precoce e em casos mais extremos o aparecimento do cancro da pele. Nos olhos, os efeitos mais frequentes são a formação de cataratas, inflamações na membrana da mucosa do olho.⁵

A radiação Ultravioleta provoca danos celulares por duas vias: absorção directa da luz incidente pelos componentes celulares (UV-B e UV-C) e mecanismos fotossensibilizadores (UV-A). A acção directa da radiação resulta na formação de estados excitados e, subsequentemente, de reacções químicas. Este processo leva à formação de dímeros de bases azotas, como os ciclobutanos de pirimídnas e isómeros de Dewar. Os mecanismos fotossensibilizadores, pelos quais a luz Ultravioleta é absorvida por moléculas fotossensibilizadoras de modo endógeno ou exógeno, correspondem à excitação das moléculas para os seus estados de tripleto. Este tipo de mecanismos pode ocorrer de dois modos diferentes: através de reacções do Tipo 1, que correspondem à transferência de electrões e remoção de hidrogénios, conduzindo à produção de radicais livres e em reacções do Tipo 2 pela transferência de energia para a produção de oxigénio no estado de singleto em estado reactivo (1O_2). A formação de 8-hidroxi-guanina é um exemplo deste tipo de reacção, que constitui uma lesão bastante comum no DNA.³

2.4. Ultravioleta-C

A radiação Ultravioleta-C, pode destruir a capacidade dos microrganismos se reproduzirem, através de mudanças fotoquímicas nos ácidos nucleicos. Esta região da radiação Ultravioleta é conhecida como germicida.

2.4.1. Efeitos da radiação Ultravioleta-C no DNA

Os componentes dos ácidos nucleicos, tanto as purinas como as pirimídinas têm o seu pico de absorção no comprimento de onda de aproximadamente 260 nm.⁶ Como é visível na figura 2.3, este valor está dentro do intervalo UV-C, e é por isso que esta radiação é tão perigosa para o DNA e RNA.

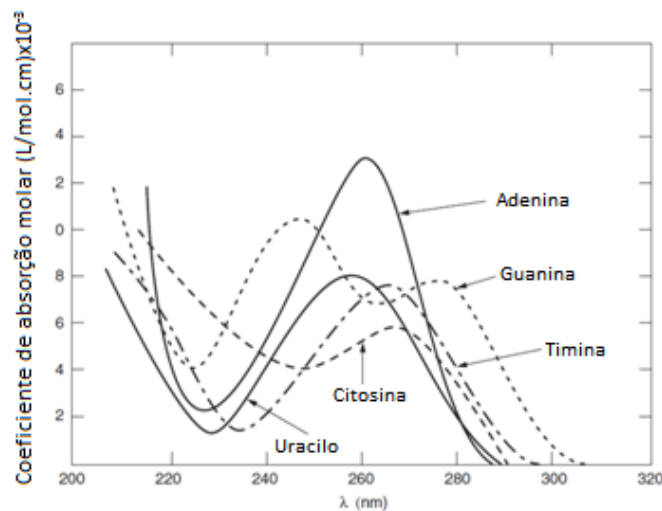


Figura 2.3 - Espectros de absorção das diferentes bases azotadas dos ácidos nucleicos.⁴

A maior consequência da exposição à radiação UV-C é a formação de ligações cruzadas entre componentes dos ácidos nucleicos da mesma cadeia, ou entre componentes de cadeias diferentes.¹⁴ As ligações cruzadas, também conhecidas como dimerizações, são mais prováveis em componentes da mesma cadeia devido à estrutura do DNA/RNA e devido ao emparelhamento das bases na mesma cadeia.⁶

De todos os componentes, as pirimídinas são as que possuem locais mais vulneráveis à formação de fotolesões,¹⁴ uma vez que a sua estrutura é menos complexa que a das purinas. As pirimídinas, recorde-se, são bases heterocíclicas, estrutura da qual derivam moléculas como a timina e a citosina.¹⁶

Os casos mais frequentes de fotolesões, verificam-se em timinas adjacentes embora também se verifiquem casos de ligações entre citosinas e guaninas.

A timina é o componente que mais facilmente sofre dimerização uma vez que a energia necessária para quebrar a dupla ligação T=A é menor do que para quebrar a tripla ligação C≡G, como é ilustrado na figura 2.4.

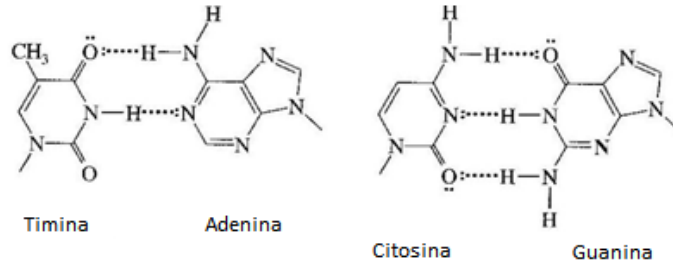


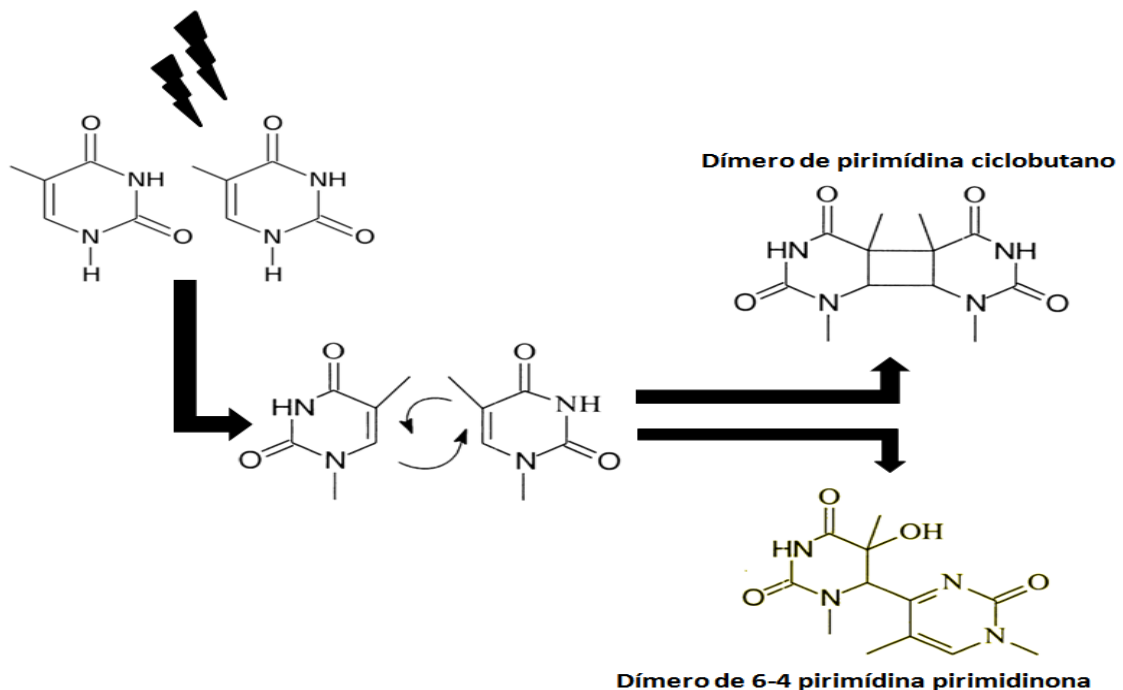
Figura 2. 4 - Os quatro componentes dos ácidos nucleicos que formam o DNA.²⁰

O resultado mais frequente da exposição ao UV-C é a formação de dímeros de pirimídina ciclobutano e dímeros de 6-4 pirimídina pirimidinona.⁷ Na figura 2.5 é esquematizado o mecanismo de formação destes foto-produtos.

Figura 2. 5 – Mecanismo de formação dos foto-produtos mais frequentes após exposição ao Ultravioleta-C.^{5,13,17}

Estas alterações nos ácidos nucleicos podem afectar seriamente a reprodução celular. Os resultados mais frequentes são o aparecimento de mutações e em casos mais graves, morte celular. Os dímeros formados não se conseguem emparelhar com outros nucleótidos e não são directamente mutagénicos, mas se forem criados dímeros suficientes, o DNA não se consegue replicar.¹⁸

A nível molecular, os dímeros de pirimídinas têm a capacidade de inibir o progresso



das DNA polimerases. Quando a DNA polimerase atinge uma destas lesões durante a replicação, a enzima vai tentar instalar o nucleótido oposto à lesão, reconhecendo apenas a lesão como uma base desemparelhada.⁷

Como cada dímero de pirimídina pode actuar como bloqueador da transcrição e replicação (apenas uma pequena fracção de dímeros resultam em mutação), os efeitos inibitórios da radiação Ultravioleta no mecanismo de transcrição e replicação são mais significativos no crescimento celular do que os seus efeitos mutagénicos.⁷

2.4.2. Fotoreactivação e reparação

Os dímeros de timina absorvem luz na gama do visível (luz azul) ou Ultravioleta do tipo A.⁷ Este fenómeno leva à auto-reparação das ligações nucleótídicas e está esquematizado na figura 2.6, onde após exposição ao Ultravioleta são formados alguns dímeros. Após a exposição à luz visível, o número de dímeros reduz-se significativamente.

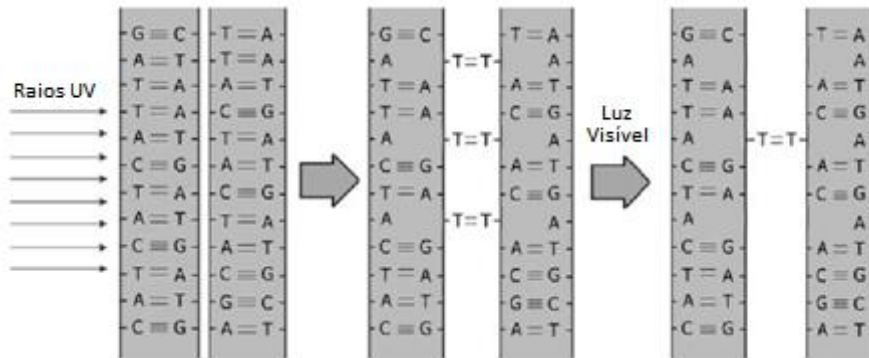


Figura 2. 6 – Mecanismo de fotoreactivação com luz visível.¹⁴

A reactivação pode igualmente ocorrer em condições de ausência de luz visível, a chamada reparação no escuro. A capacidade de auto-reparação pode depender da organização biológica do microrganismo e dos danos causados à célula pelo Ultravioleta.¹⁴ Na fotoreactivação, a reparação é feita por uma enzima chamada de fotoliase. Esta enzima reverte os danos no DNA induzidos pela radiação Ultravioleta. Na reparação no escuro, os danos são revertidos por acção de diferentes enzimas. No entanto, os danos no DNA não são totalmente revertidos.⁷

Todas estas enzimas têm de ser inicialmente activadas por uma fonte de energia, que tanto pode ser a luz visível como nutrientes que existam na célula. O mecanismo de reparação enzimática requer pelo menos dois sistemas enzimáticos: sistema de exonuclease (que quebram a ligação timina-timina) e sistema de polimerase, que insere as bases de timina nos locais da adenina da cadeia complementar do DNA.¹⁴

2.4.3. Efeito Germicida

A radiação UV-C tem elevada capacidade germicida. Inicialmente utilizado nos anos 40 e 50 para combater os surtos de tuberculose em hospitais do Reino Unido e dos Estados Unidos, a utilização do UV-C como método de desinfecção caiu em desuso com o desenvolvimento dos antibióticos¹⁹ e com a diminuição de casos de tuberculose. Actualmente o UV-C ainda é utilizado para desinfecção do ar, para limpeza de superfícies e de embalagens de alimentos²⁰, embora a sua maior utilização seja a investigação científica, sendo o efeito desta radiação o maior alvos dos estudos.

Se for utilizada com intensidade e com tempo de exposição adequados, a radiação UV-C tem a capacidade de eliminar todo o tipo de microrganismos, tais como bactérias, fungos e vírus.²⁰ Neste trabalho, o efeito germicida vai ser alvo de uma análise mais aprofundada, sendo que para o projecto do sistema de irradiação foram tidos em conta, apenas alguns aspectos.

2.4.4. Modelação do efeito germicida

Para desenhar um sistema baseado no efeito germicida, importa aqui analisar alguns modelos matemáticos existentes. A modelação matemática do efeito germicida permite recolher informações úteis, não só para o desenho do sistema, mas também para interpretar os resultados obtidos. Para além disso, os modelos matemáticos também permitem criar sistemas específicos para determinado microrganismo ou para determinado mecanismo de desinfecção.¹⁴

O processo de desinfecção é normalmente avaliado em termos da taxa de sobrevivência de microrganismos expostos à radiação. A taxa de desinfecção é muito variável e apresenta um comportamento complexo, para a qual contribuem vários factores. Destacam-se: o efeito patamar que se manifesta por um atraso no início do decrescimento populacional da amostra exposta; o decaimento de primeiro grau, que consiste na principal fase do processo germicida, em que 90% a 100% da população inicialmente exposta é eliminada; o decaimento de segundo grau, que se verifica em situações cuja inactivação é inferior a 100% no decaimento de primeiro grau. Este fenómeno é explicado pela maior resistência de algumas porções da população exposta à radiação; e a fotoreactivação, explicada na secção 2.4.2.¹⁴ Nem todos estes efeitos são tidos em conta no desenho de sistemas de desinfecção, mas o seu conhecimento é essencial para se entender a dinâmica germicida da radiação Ultravioleta. Todos estes processos podem ser modelados com equações exponenciais simples a seguir descritas.

2.4.5. Exposição à radiação e dose

Os microrganismos expostos à radiação Ultravioleta são sujeitos a uma dose de radiação, D ($W.s/m^2$). Esta dose corresponde ao fluxo de radiação (Irradiância), I , multiplicada pelo tempo de exposição, t (s):¹⁴

$$D = I \cdot t \quad (3)$$

Sendo a Irradiância a medida que traduz a energia média por unidade de área e por unidade de tempo, expressa em W/m^2 .⁹ Geometricamente, como é exibido na figura 2.7, a Irradiância numa pequena superfície num ponto "P", a uma distância "a" de uma fonte de radiação, linear e ideal de comprimento "l" é dada pela equação 3.¹⁸

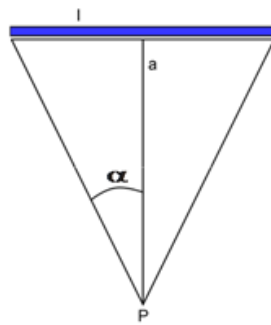


Figura 2.7 – Descrição matemática da Irradiância para uma fonte de radiação ideal e linear.¹⁸

$$I = \frac{\varphi}{2\pi^2 \cdot l \cdot a} (2\alpha + \text{sen } 2\alpha) \quad (4)$$

Em que φ corresponde à potência UV-C da lâmpada (W) e o valor de α é dado por:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{l}{2 \cdot a}\right) \quad (5)$$

2.4.6. Mecanismo de desinfecção

A cinética de desinfecção pode ser descrita através da equação:⁴

$$N_t = N_0 e^{-kD} \quad (6)$$

Em que N_t é a população final depois da exposição ao Ultravioleta; N_0 é a população inicial antes da exposição; k é a constante de inativação e D é a dose de radiação.

A fracção de sobrevivência é medida pela relação:¹⁴

$$S = \frac{N_t}{N_0} = e^{-kD} \quad (7)$$

Quando a dose de UV resulta numa taxa de desinfecção de 90% ou numa taxa de sobrevivência (S) igual a 0,1, atinge-se um patamar conhecido como a D_{90} . Este valor é normalmente utilizado como indicador das características do sistema. O valor da D_{90} é calculado da seguinte forma:¹⁴

$$D_{90} = -\ln \frac{(0,1)}{k} \Leftrightarrow D_{90} = \frac{2,3026}{k} \quad (8)$$

Desta forma, para se obter a Dose de inativação de 90% da população inicial, basta apenas conhecer o valor da constante de inativação (k). De acordo com a tabela 2.1, este valor varia de 0,00050 m²/J a 2,49394 m²/J, para microrganismos conhecidos (bactérias, vírus, fungos, esporos e algas).¹⁴

Tabela 2. 1 – Relação entre os valores de k e respectiva Dose de inativação de 90% da população inicialmente exposta ao Ultravioleta-C.

Microrganismo	k (m ² /J)	D_{90} (W.s/m ²)
<i>Aspergillus niger</i>	0,00050	4605,20
<i>Corona vírus</i>	0,00075	3070,13
<i>Aspergillus fumigatus</i>	0,00113	2046,76
<i>B. atrophaeus spores</i>	0,00169	1364,50
<i>Adenovirus</i>	0,00253	909,67
<i>Bacteriophage Ms2</i>	0,00380	606,45
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0,00570	404,30
<i>Reovirus</i>	0,00854	269,53
<i>Mucor mucedo</i>	0,01281	179,69
<i>Polyomavirus</i>	0,01922	119,79
<i>Encephalitozoon hellew</i>	0,02883	79,86
<i>Coliophage T7</i>	0,04325	53,24
<i>Herpes simplex vírus T1</i>	0,06487	35,49
<i>E. Coli</i>	0,09731	23,66
<i>Newcastle disease vírus</i>	0,14596	15,78
<i>Rabies vírus</i>	0,21895	10,52
<i>Mycoplasma hominis</i>	0,32842	7,01
<i>Coliophage T2</i>	0,49263	4,67
<i>Coliophage ΦX-174</i>	0,73895	3,12
<i>Staphylococcus epidermis</i>	1,10842	2,08
<i>Streptococcus pyogenes</i>	1,66263	1,38
<i>Vaccina virus</i>	2,49394	0,92

Em anexo, são apresentadas as doses de inativação para alguns microrganismos.

2.4.7. Os modelos matemáticos da cinética germicida

Na figura 2.8 é exibido o comportamento típico da inativação fotocatalítica de um microrganismo, o qual exhibe fundamentalmente três diferentes regiões.²¹

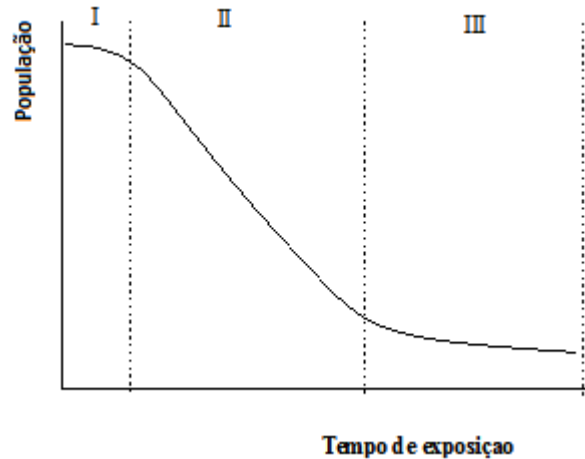


Figura 2. 8 - Curva típica da inativação germicida, onde são ilustradas as três diferentes regiões.

Especificamente, tem-se:

- Região I: uma região de retardo, de decaimento muito lento no início da reacção, ou seja, efeito “ombro” ou patamar.
- Região II: uma região de inativação logaritmo-linear que abrange a maior parte da reacção.
- Região III: região de desaceleração da reacção.

Para explicar estas três regiões da curva de inativação, surgiram vários modelos matemáticos. Os modelos mais utilizados e que melhor definem o fenómeno germicida são o modelo logaritmo-linear, o modelo de Chick-Watson alterado e o modelo de Hom, a serem de seguida descritos.

Modelo Logaritmo-Linear

O modelo mais usado para avaliar a sobrevivência dos microrganismos expostos ao UV é o modelo clássico do decaimento exponencial. É um modelo de taxa de decaimento de primeira ordem e geralmente é o mais adequado para a maioria dos sistemas. Isto porque as taxas de desinfecção de 90% ou acima são atingidas no primeiro degrau do decaimento¹⁴ isto é, na região II da curva de desinfecção, acima referida.

A resistência efectiva dos microrganismos à radiação Ultravioleta varia consideravelmente. Além disso, o meio onde o microrganismo está inserido influencia

fortemente a dose de radiação necessária para a sua destruição.¹⁴ Este modelo tem sido amplamente aceite e utilizado para descrever o mecanismo de inactivação microbiana.²²

A expressão mais utilizada é a equação de Chick-Watson, dada por:²¹

$$\log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right) = -k[c]^n t \quad (9)$$

Em que C é a concentração bacteriana final depois da exposição ao ultravioleta; C_0 é a concentração inicial antes da exposição; k é a constante de inactivação, c é a concentração do agente desinfectante e n é a ordem da reacção.

Em processos fotocatalíticos com luz artificial, a concentração do agente desinfectante pode ser considerada constante no tempo:

$$\log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right) = -k' t \quad (10)$$

Devido à simplicidade desta equação logaritmo-linear, este modelo tem sido bastante utilizado na literatura para comparar a eficiência de diferentes processos de desinfecção para diferentes valores de k . No entanto, a aplicação correcta do modelo requer que a taxa de desinfecção não varie durante o processo.²¹ O modelo de Chick-Watson está representado graficamente na figura 2.9 .

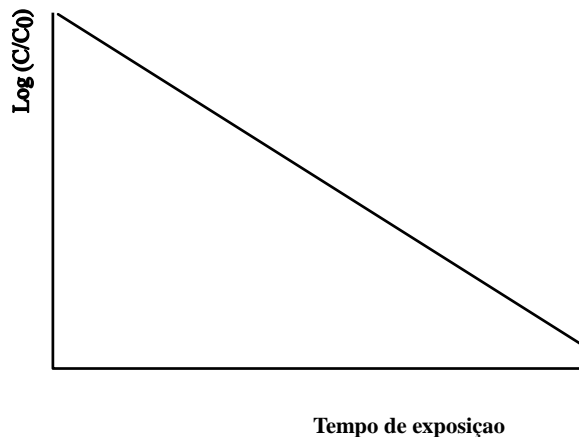


Figura 2. 9 - Modelo Logaritmo-Linear

Modelo de Chick-Watson alterado

Na aplicação de processos de desinfecção tais como a irradiação com Ultravioleta, o mecanismo de inactivação é muito complexo e a análise cinética pode ser levada a cabo através de equações empíricas. O modelo de Chick-Watson é um modelo de desinfecção empírica que considera a taxa de inactivação de um determinado microrganismo como uma função exponencial da concentração de um agente desinfectante.²²

De forma a poder explicar o patamar inicial e a zona de abrandamento, a equação de Chick-Watson usada no modelo logaritmo-linear tem de ser alterada inserindo-se dois parâmetros:

$$\log_{10} \left(\frac{N}{N_0} \right) = k[1 - e^{-k_2 t}] \quad (11)$$

Em que k é a constante de desinfecção, k_2 é a constante de primeira ordem do decaimento Ultravioleta.

De acordo com a figura 2.10, este modelo consegue esquematizar duas regiões do espectro de desinfecção. Na curva a, consegue-se definir a região I e II do espectro, sendo que inicialmente se verifica um retardo e depois a inclinação da curva aumenta drasticamente. Na curva b consegue-se definir a região II e III, sendo visível a região de inactivação e a região de desaceleração. No entanto, este modelo não permite esquematizar as três regiões simultaneamente.

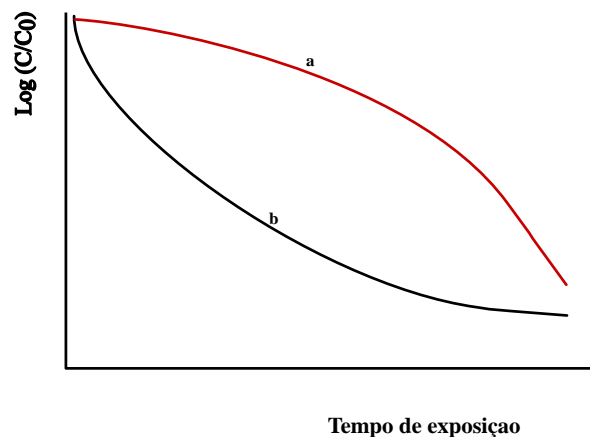


Figura 2. 10 - Modelo de Chick-Watson

Modelo de Hom alterado

Esta equação não-linear incorpora um novo parâmetro, H , que define a região do gráfico que se pretende. Se o valor de H for superior a 1, corresponde à região I da curva de desinfecção; se o valor de H for igual a 1, corresponde à região II da curva de desinfecção; e finalmente, se o valor de H for inferior a 1, corresponde à região III da curva de desinfecção.²²

$$\log_{10} \left(\frac{C}{C_0} \right) = -kt^H \quad (12)$$

Uma das limitações deste modelo é que não consegue reproduzir simultaneamente todas as regiões da curva de desinfecção.²²

Modificando esta equação:

$$\log_{10} \left(\frac{N}{N_0} \right) = -k[e^{-k_2 t}]^H \quad (13)$$

É possível obter as três regiões diferentes simultaneamente, como se mostra na figura 2.11.²²

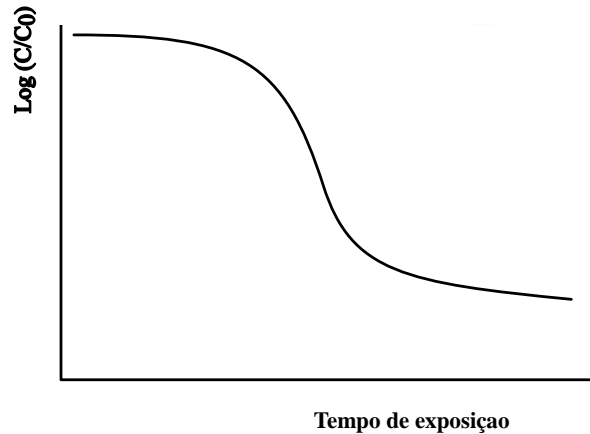


Figura 2. 11 - Modelo de Hom alterado

Para este projecto em concreto, foi considerado o modelo logaritmo-linear. Desta forma, apenas é necessário conhecer o valor de k da espécie a ser exposta à radiação. A espécie considerada para o desenho do sistema foi a *E.Coli*.

2.4.8. Estudos na *E.Coli*

Analisando a figura 2.12, é possível perceber a semelhança nos espectros de absorção da bactéria *E. Coli* e do DNA.

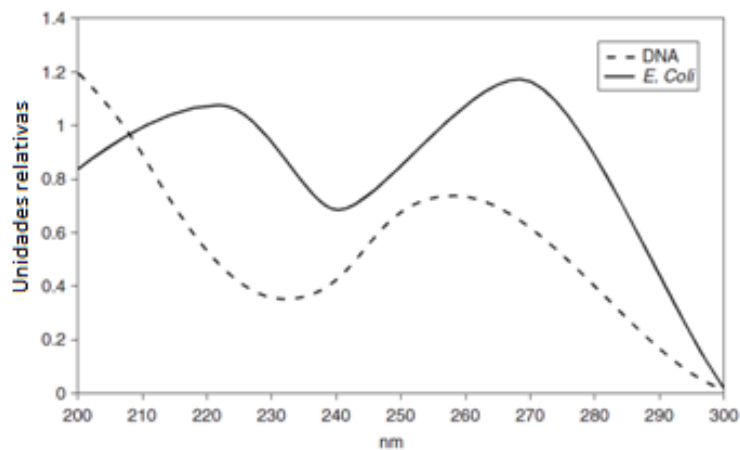


Figura 2. 12 -- Espectro de absorção da E.Coli comparado com o espectro de absorção do DNA. ⁴

Esta bactéria tem sido estudada em testes de Ultravioleta-C. Existem actualmente cerca de 700 tipos de *E.Coli* diferentes²³, sendo que o valor da constante de inactivação k é em média $0,1\text{m}^2/\text{J}$. Foi este o valor considerado para o desenvolvimento do sistema, como é

exibido na tabela 2.2. Nesta tabela, é exibido o tempo de exposição necessário para atingir a D_{90} , para diferentes distâncias à lâmpada germicida.

Tabela 2. 2 – Tempo de exposição de uma amostra biológica com $k=0,1\text{m}^2/\text{J}$ para diferentes distâncias da amostra a uma lâmpada germicida de potência UV-C 1,1W.

Distância (m)	I (W/m^2)	Tempo (s)	
		$k = 0,1 \text{ m}^2/\text{J}$	Dose = $23,026 \text{ W.s}/\text{m}^2$
0,010	130,47003		0,18
0,100	8,75596		2,63
0,200	2,59689		8,87
0,300	1,19896		19,21
0,400	0,68387		33,67
0,500	0,44056		52,27
0,600	0,30705		74,99
0,700	0,22608		101,85
0,800	0,17334		132,84
0,900	0,13709		167,96
1,000	0,11112		207,22
1,100	0,09188		250,60
1,200	0,07724		298,12
1,300	0,06583		349,77
1,400	0,05678		405,55
1,500	0,04947		465,46
1,600	0,04349		529,51
1,700	0,03853		597,69
1,800	0,03437		669,99

Capítulo 3. O Sistema

3.1. Câmara de Irradiação

3.1.1. Características

O sistema composto pela lâmpada, posicionador e porta amostras móvel está inserido num armário monobloco de dimensões 480 mm x 380 mm x 1800 mm, de chapa de aço com 1mm de espessura. O armário, que será a câmara de irradiação é munido de um fecho por cadeado. Na figura 3.1, encontram-se ilustrados os componentes do exterior do sistema desenvolvido.

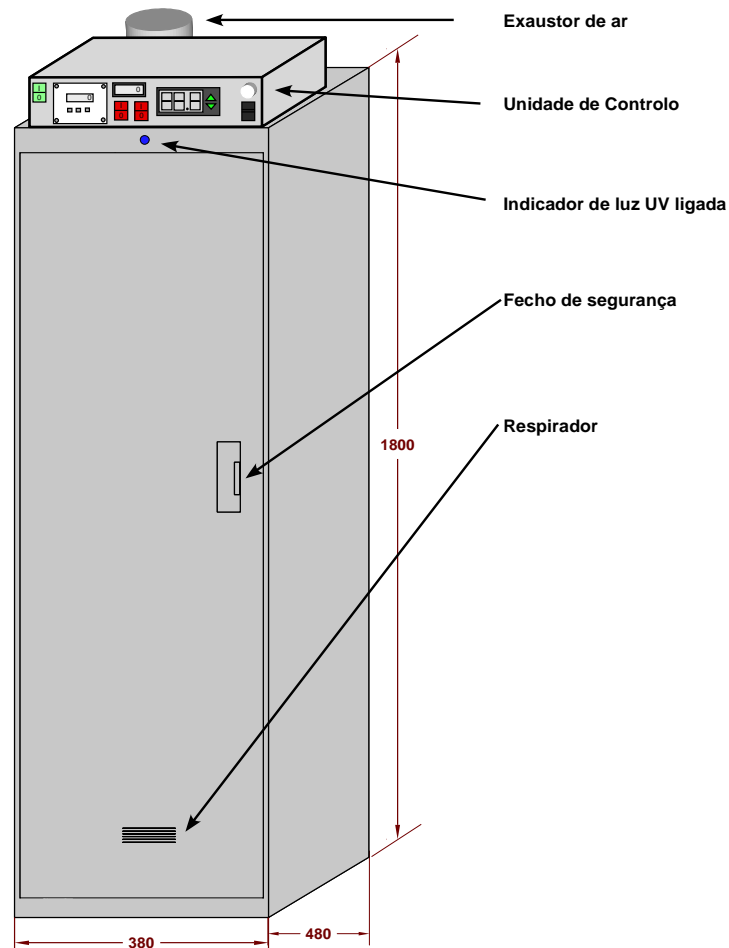


Figura 3. 1 – Esquema e dimensões (em milímetros) do armário utilizado. É mostrada a unidade de controlo, o exaustor de ar, o indicador de luz UV ligada, o fecho de segurança e o respirador.

O tempo de exposição da amostra à radiação Ultravioleta é uma questão essencial no desenho do sistema. Analisando os cálculos efectuados no capítulo anterior e de acordo com a tabela 3.1, pode-se verificar que a uma distância de 1800 mm e para um valor de $k = 0,1 \text{ m}^2/\text{J}$ a

D_{90} ocorre cerca de 16 minutos depois de iniciada a exposição. Este é um valor bastante elevado. No entanto, o valor de $k = 0,1 \text{ m}^2/\text{J}$ é apenas um valor possível entre vários. Tendo apenas em conta a altura de 1800 mm, o tempo necessário para atingir a D_{90} é de cerca de 40 segundos para o valor mais alto de k e de cerca de 200000 segundos, aproximadamente 56 horas para o valor mais baixo de k .

Tabela 3.1. Tempo de exposição necessário para atingir a D_{90} para microrganismos com valores de k compreendidos no intervalo $[0,0005 \text{ m}^2/\text{J} : 2,494 \text{ m}^2/\text{J}]$.

Tempo (s)							
$k \text{ (m}^2/\text{J)}$	$D_{90} \text{ (W.s/m}^2)$	$k \text{ (m}^2/\text{J)}$	$D_{90} \text{ (W.s/m}^2)$	$k \text{ (m}^2/\text{J)}$	$D_{90} \text{ (W.s/m}^2)$	$k \text{ (m}^2/\text{J)}$	$D_{90} \text{ (W.s/m}^2)$
2,494	0,9233	0,1	23,026	0,0288	79,8612	0,0005	4605,20
39,37		981,88		3405,48		196376,94	

A possibilidade de se poder alterar a distância à fonte permite não só uma melhor qualidade da informação retirada das amostras expostas, como permite também ajustar o tempo de exposição a um valor razoável.

A reflectividade nas superfícies do armário pode afectar a distribuição da irradiância no porta amostras. A reflectividade é normalmente uma combinação da reflexão especular e difusa.¹⁴

Os materiais de elevada reflectividade no comprimento de onda de 254 nm são usados para construir reflectores de radiação. Os materiais com uma baixa reflectividade a 254 nm são usados em situações em que há necessidade de absorver o Ultravioleta depois de este ser utilizado. Estes materiais são úteis para evitar as consequências resultantes das reflexões indesejadas.¹⁸ Na tabela 3.2 encontram-se indicados os valores de reflectividade de vários materiais para o comprimento de onda de 254 nm.

Tabela 3. 2 - Reflectividade de alguns materiais.

Material	Reflectividade a 254 nm(%)
Folha de alumínio	60-90
Aço inoxidável	25-30
tinta de óleo (branca)	3-10
Tinta de água (branco)	10-35
Tinta de revestimento de alumínio	40-75
Tinta plástica	40-60
Óxido de zinco	5-10
Óxido de magnésio	75-90
Papel de parede	20-30
Lã branca	4
Linho branco	15
Algodão branco	30

Dos valores de reflectividade da tabela 3.2, verifica-se que o material do armário e do porta amostras apresentam uma reflectividade de cerca de 30%. Este valor é susceptível de provocar alterações na distribuição da irradiância ao longo do porta amostras como se verá mais adiante.

3.1.2. Sistema de guiamento de porta amostras.

Em cada uma das duas faces laterais, foram colocados dois perfis de aço, do tipo T2-2000-5²⁴ com 1800 mm de comprimento, que se destinam a guiar o prato do porta amostras. Na figura 3.2 encontra-se ilustrado o perfil utilizado:

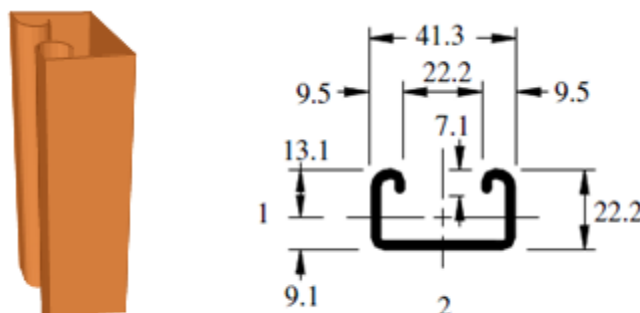


Figura 3. 2 – Esquema e cotas (em milímetros) dos perfis utilizados.

Cada perfil foi fixo ao armário através de parafusos do tipo M6x40 mm que foram colocados conforme ilustrado na figura 3.3.

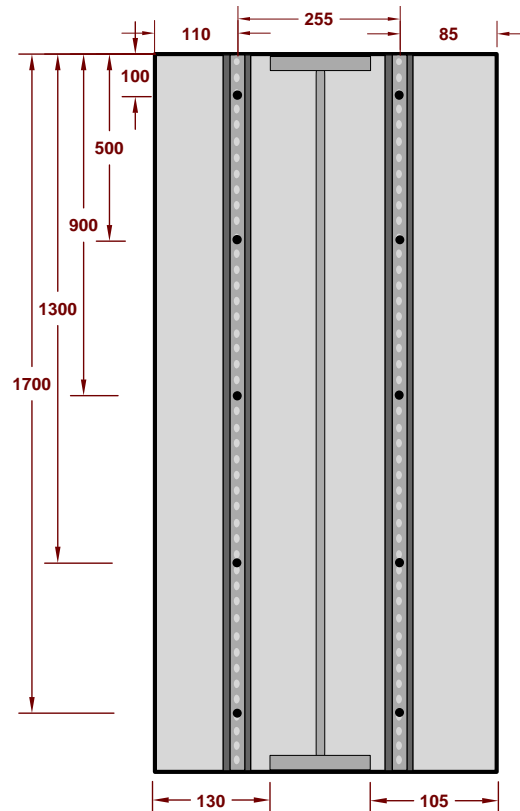


Figura 3. 3 – Esquema do interior de uma das faces laterais do armário e indicação da posição dos parafusos de fixação dos perfis.

Na face superior do armário, foram colocados o painel de controlo, o motor do elevador e o exaustor de ar, conforme ilustrado na figura 3.4. O motor do elevador está posicionado dentro da caixa que contém o painel de controlo.

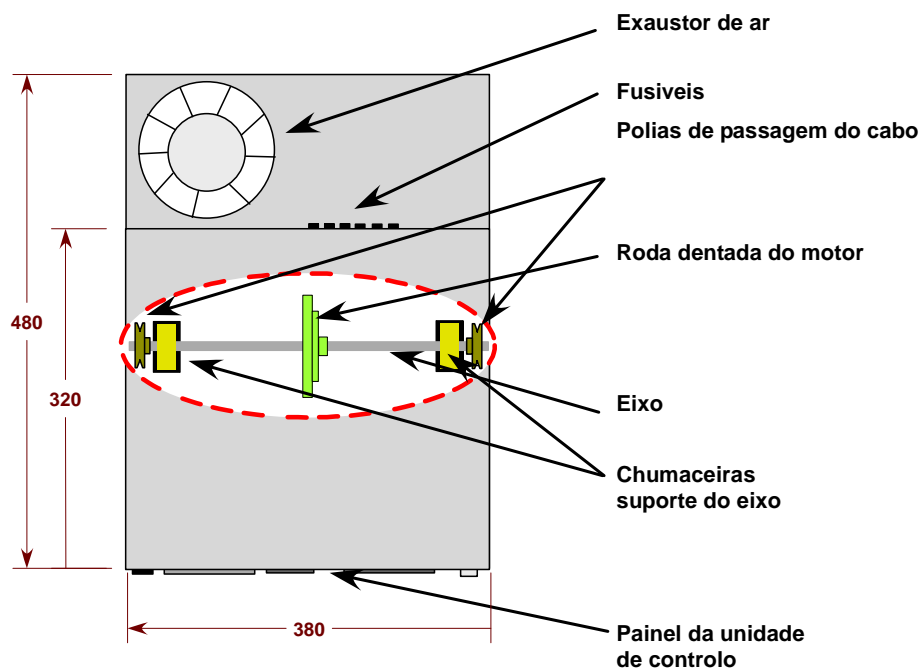


Figura 3. 4 – Esquema da face superior da caixa de controlo posicionada na tampa superior do armário, sendo possível identificar o ventilador e o posicionamento do elevador colocado no interior da caixa de controlo.

3.2. Lâmpada

Na figura 3.5 encontra-se ilustrada a lâmpada de mercúrio de baixa pressão utilizada.

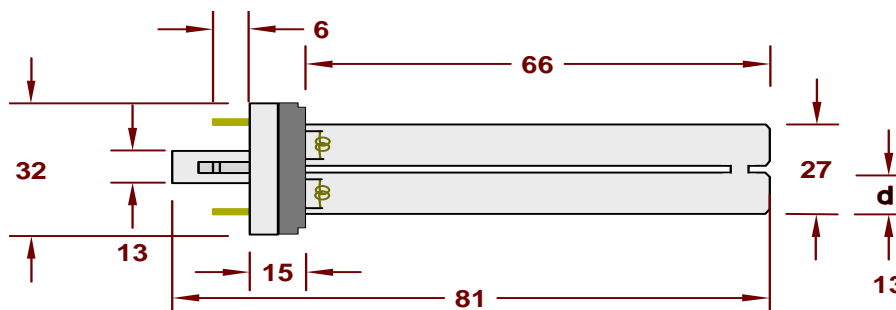


Figura 3.5 – Esquema e cotas (em milímetros) da lâmpada utilizada.

Normalmente as fontes de luz Ultravioleta são lâmpadas de vapor de mercúrio, uma vez que o fenómeno de produção de UV está directamente relacionado com o processo de activação do mercúrio. No interior da lâmpada existe uma quantidade de mercúrio líquido juntamente com uma quantidade em excesso de gás de iniciação.¹⁴ Este gás não só facilita o início da descarga eléctrica como também promove o início da activação-ionização do mercúrio, como será referido mais adiante.

Estas lâmpadas podem produzir comprimentos de onda que se estendem do UV-C ao UV-A. Como neste trabalho se dá maior importância à formação de UV-C, as lâmpadas produtoras de UV-B e UV-A não serão alvo de uma análise muito aprofundada. Existem vários tipos de lâmpadas geradoras de radiação UV-C: as de baixa pressão, que produzem uma faixa estreita de comprimentos de onda na região UV-C e as lâmpadas de descarga com alta intensidade (HID) também conhecidas como lâmpadas de media ou alta pressão de vapor de mercúrio.¹⁴

3.2.1. Tipos de Lâmpadas

Lâmpadas de baixa pressão

As lâmpadas de baixa pressão possuem uma pressão total de gás no intervalo 10^2 a 10^3 Pa (0,001 a 0,01 mbar). O gás de enchimento está em excesso numa proporção de 1:10 mbar. Nas lâmpadas de baixa pressão, o mercúrio líquido permanece em excesso no equilíbrio térmico.⁴

O invólucro das lâmpadas de baixa pressão consiste em vidro de quartzo, ou outro vidro que transmita radiação Ultravioleta. No interior da lâmpada, um par de eléctrodos e uma amálgama de mercúrio que consiste numa liga de mercúrio com outro elemento, tal como índio ou o gálio.¹⁴ Esta amálgama controla a pressão de vapor do mercúrio.

Nas lâmpadas de baixa pressão de mercúrio, em média 35% da potência eléctrica de entrada é convertida em potência UV-C.¹⁸ Este tipo de lâmpadas tem o seu pico de emissão no comprimento de onda de 253,7 nm, sendo que esta linha UV-C tem uma largura de cerca de 4 nm. Neste comprimento de onda, o efeito germicida é 85% do valor máximo que se obtém em média, no intervalo 260-265 nm.¹⁸ Na figura 3.6 faz-se a comparação do pico de emissão de uma lâmpada de baixa pressão e de uma lâmpada de média pressão, sendo também ilustrada a curva de absorção da bactéria *E.Coli*.

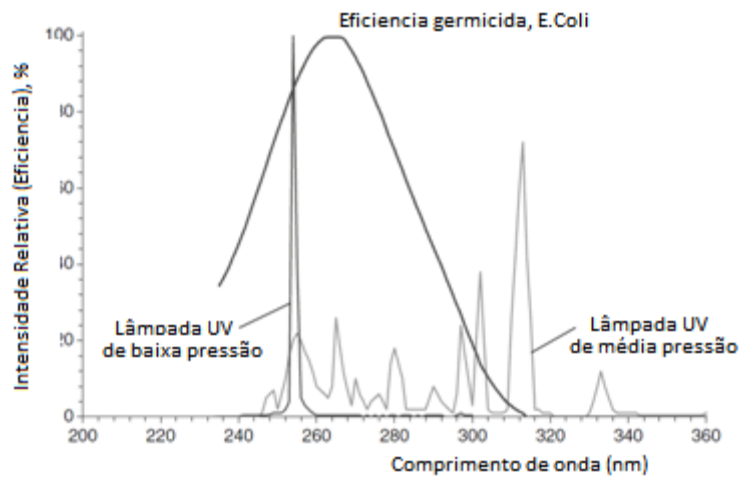


Figura 3. 6 – Espectro de intensidade das lâmpadas de baixa e média pressão de mercúrio e comparação com o espectro de absorção da *E.Coli*.¹⁴

As lâmpadas de baixa pressão emitem baixos níveis de radiação para vários comprimentos de onda diferentes de 254 nm, como está ilustrado na figura 3.7.

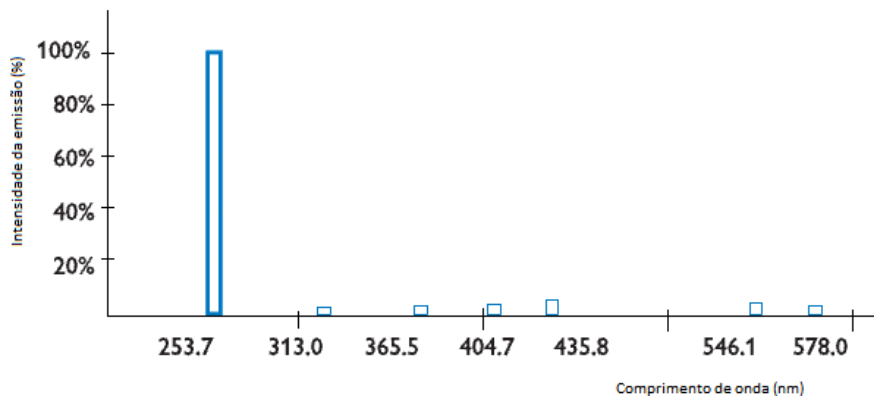


Figura 3. 7 – Espectro de emissão de uma lâmpada UV-C de baixa pressão de mercúrio.¹⁸

Lâmpadas de média pressão

Este tipo de lâmpadas opera a uma pressão total de gás na ordem dos 10 – 30 MPa (100 a 300 bar). Normalmente, nestas lâmpadas, não existe mercúrio líquido em excesso nas condições normais de funcionamento, uma vez que as temperaturas dentro da lâmpada atingem cerca de 5700°C e a essa temperatura apenas existe mercúrio em forma gasosa.⁴

Lâmpadas de alta pressão

As lâmpadas de alta pressão operam a pressões superiores a 10⁶ Pa (10 atm) emitindo um espectro contínuo. Estas lâmpadas têm uma menor eficiência e produzem elevados níveis de ozono. Estas características fazem com que este tipo de lâmpadas seja inapropriado para aplicações específicas tais como a desinfecção da água (aplicação directa do efeito germicida) ou produção de reacções fotoquímicas.⁴

As lâmpadas UV-C podem ter dois tipos de cátodo: frio e quente.

O cátodo frio é uma construção sólida com eléctrodos de ferro ou níquel. Estes eléctrodos são bombardeados com iões positivos de forma a libertar electrões no plasma. Esta reacção implica elevadas tensões de arranque (até 2 kV).⁴ O facto de ser uma construção sólida permite que a ligação frequente da lâmpada não afecta o seu tempo de vida útil nem altera a potência de saída.

As lâmpadas de cátodo quente baseiam-se na emissão termiónica. Esta emissão provém de filamentos de tungsténio impregnados com óxidos alcalinos electroemissivos: CaO, BaO ou SrO. Quando aquecido, o revestimento do filamento cria uma camada de metal, normalmente o bário, e a cerca de 800°C dá-se a emissão de radiação. Em condições normais de funcionamento, a temperatura dos eléctrodos pode atingir temperaturas na ordem dos 2000°C. Normalmente, este tipo de lâmpadas opera com tensões baixas, sendo o valor mais frequente os 220 V.⁴

A vida útil da lâmpada é determinada pela taxa de perda do revestimento electrónico emissivo dos eléctrodos. Os revestimentos sofrem erosão durante o início e evaporam-se durante o uso. O arranque frequente pode acelerar o envelhecimento da lâmpada. O fim da vida útil da lâmpada é atingido quando o revestimento é completamente removido de um ou de ambos os eléctrodos.

Na figura 3.8 é exibida a curva da intensidade luminosa em função do tempo de vida de uma lâmpada germicida. Estas lâmpadas normalmente têm um tempo de vida de aproximadamente 9000 horas, sendo que a partir das 1000 horas de utilização, a potência da lâmpada é 85% da potência inicial.

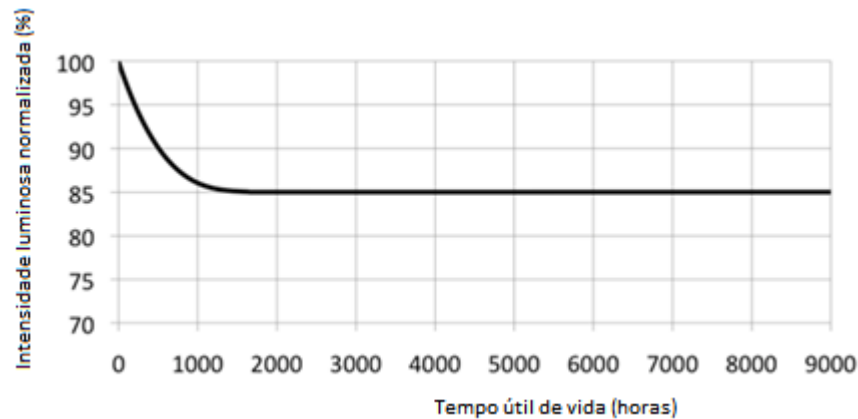


Figura 3. 8 – Variação da intensidade luminosa UV-C de uma lâmpada de baixa pressão de mercúrio em função do tempo de utilização.²⁵

A lâmpada de baixa pressão de mercúrio tem o seu máximo de radiação quando a temperatura no interior da lâmpada atinge os 40° C, como é ilustrado na figura 3.9.

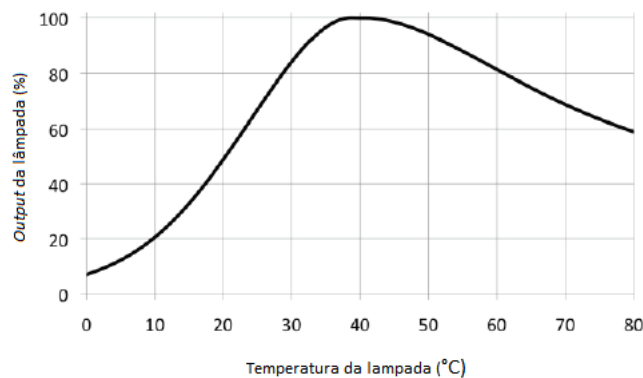


Figura 3. 9 – Variação da eficiência da lâmpada UV-C de baixa pressão de mercúrio em função da temperatura no interior da lâmpada.²⁵

A emissão da lâmpada vai aumentando até se atingir a temperatura óptima. Quando atingida esta temperatura, a potencia UV-C é de 100%. Mais adiante será apresentado um teste do sistema em que se pretende verificar a curva da emissão da lâmpada.

3.2.2. Funcionamento

A emissão de radiação Ultravioleta ocorre através da activação dos átomos de mercúrio por meio de electrões (descargas eléctricas). A razão pela qual ainda se utiliza o mercúrio é porque este é o elemento mais volátil dos metais, para o qual a activação na fase gasosa pode ser obtida em valores de temperatura compatíveis com a estrutura da lâmpada.⁴ Na figura 3.10 são apresentados as tensões de vapor para alguns metais, sendo visível que a 1atm, o mercúrio é o metal cuja tensão de vapor é atingida a uma menor temperatura.

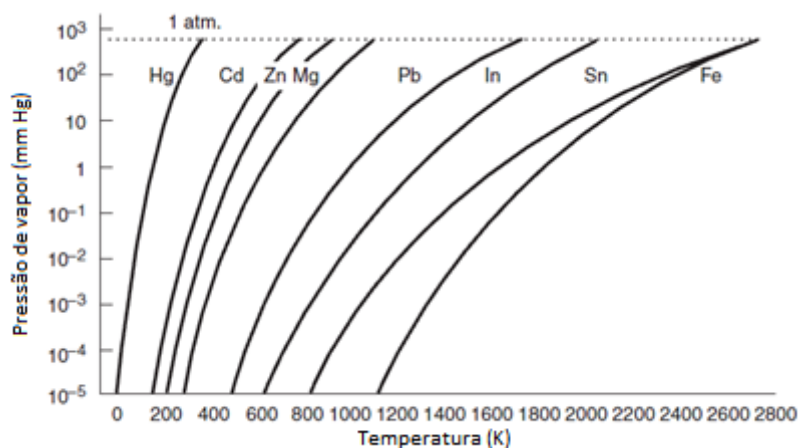


Figura 3. 10 – Variação da pressão de vapor em função da temperatura para diferentes metais.⁴

A energia de ionização do mercúrio é baixa o suficiente para criar o efeito avalanche: Nas proximidades do ânodo, o electrão adquire entre duas colisões sucessivas, uma energia cinética superior ao potencial de ionização das moléculas do gás. Da colisão desse electrão com uma molécula, resulta uma nova ionização. Estas sucessivas ionizações dão origem a um processo de multiplicação de electrões, até que todos os electrões sejam recolhidos no ânodo.²⁶ Entretanto, mais lentamente que os electrões, os iões positivos que se vão formando, dirigem-se para o cátodo onde são recolhidos.¹⁴ A activação-ionização através da colisão com electrões e o retorno a um estado de menor energia é o princípio da produção de luz.

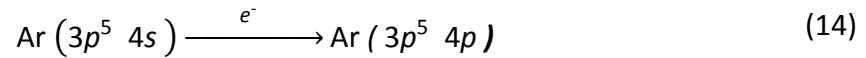
Como já foi referido, estas lâmpadas possuem um gás de enchimento. Normalmente este gás é o árgon, sendo que também são utilizados outros gases inertes, mas com menor frequência. Este tipo de gases possui a camada electrónica mais externa completa, e possuem elevadas energias de ionização, como é mostrado na tabela 3.3.

Tabela 3. 3- Energias de ionização dos gases raros e energia de ionização do mercúrio.⁴

Elemento	Energia de ionização (eV)	Energia do primeiro estado excitado (eV)
Mercúrio	10,4	4,77
Xénon	12,1	8,32
Crípton	14	9,91
Árgon	15,8	11,6
Néon	21,6	16,6
Hélio	24,6	19,8

A energia de ionização do árgon é 15,8 eV, mas o seu estado metaestável, que impede que o electrão retorne espontaneamente ao seu nível fundamental⁸, de menor energia é a 11,6 eV. O árgon pode retornar ao seu estado normal se receber energia externa por colisão

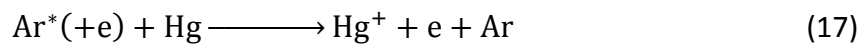
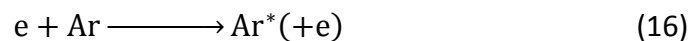
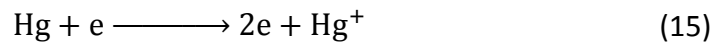
com outro átomo, ou se ocorrer transferência de energia de um electrão que esteja num estado de energia superior ao metaestável⁴, como se demonstra na equação 14.



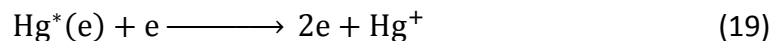
3.2.3. Princípios da lâmpada de baixa pressão.

Na lâmpada de baixa pressão, a pressão parcial de mercúrio dentro da lâmpada é cerca de 1 Pa (10^{-5} atm). Este valor corresponde à pressão de vapor do mercúrio líquido a uma temperatura óptima de 40 °C na parede da lâmpada.⁴

A forma mais simples de representar o processo de produzir radiação Ultravioleta, é considerando a ionização do mercúrio atómico através da transferência da energia cinética dos electrões. Esta transferência é feita através das colisões inelásticas do electrão com o átomo de mercúrio, de acordo com as reacções:⁴



Num regime de descarga permanente, os electrões no plasma de mercúrio a baixa pressão não possuem energia cinética suficiente para provocar a ionização num único passo, sendo necessárias várias colisões com formação de átomos de mercúrio excitados, de acordo com as reacções:



A reacção em que um fotão é transmitido corresponde a:



A emissão de um fotão por um átomo num estado electrónico excitado é reversível. Isto significa que os átomos de mercúrio podem absorver os fotões. Este fenómeno é chamado de auto-absorção.⁴

3.2.4. Balastros

O balastro tem duas funções. Fornece a tensão inicial para a ionização do gás na lâmpada e limita a intensidade da corrente eléctrica que passa entre os eléctrodos. Esta corrente ao passar nos eléctrodos, aquece o vapor de mercúrio, estimulando as transições electrónicas e causa a emissão da luz ultravioleta e visível. A tensão fornecida pelo balastro permite a criação do arco eléctrico. O arco eléctrico é o nome dado genericamente ao fluxo intenso de corrente eléctrica que se forma entre dois electrodos colocados próximos um do outro. Dependendo da intensidade da tensão aplicada, pode-se formar um arco extremamente brilhante entre os eléctrodos.¹⁴

Os balastros podem ser magnéticos ou electrónicos.¹⁴

Magnéticos:

Sendo uma tecnologia já antiga e com uma baixa eficiência, este tipo de balastros começam a estar em desuso. Estes balastros são constituídos por um núcleo laminado de aço silício (com baixas perdas) e bobinas de fio de cobre esmaltado. A sua função é fornecer um impulso atrasado no tempo, com tensão suficiente para iniciar a ionização da mistura de gás na lâmpada. O balastro também limita a corrente de entrada nos filamentos. Enquanto a lâmpada estiver acesa, o balastro de pré-aquecimento é apenas um indutor que aproximadamente a 50 Hz tem a impedância requerida para fornecer à lâmpada a corrente necessária.

Electrónicos

Os balastros electrónicos são mais modernos, havendo já balastros electrónicos de diferentes tipos. Os balastros electrónicos são constituídos por condensadores e bobinas para alta frequência, resistências, circuitos integrados e outros componentes electrónicos. Este tipo de balastros proporciona um maior fluxo luminoso com menor potência de consumo. Existem dois tipos de balastro electrónico: híbrido (ou electromagnéticos) e de alta frequência: Os balastros híbridos são basicamente balastros magnéticos com componentes electrónicos. Os balastros de alta frequência funcionam com frequências entre 20 kHz a 50 kHz e a eficiência é maximizada com componentes electrónicos compatíveis com as características da lâmpada. Na figura 3.11 é mostrado o esquema do balastro electromagnético utilizado neste sistema.

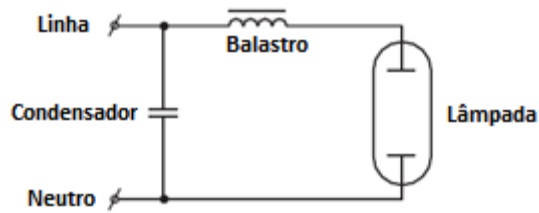


Figura 3. 11 – Esquema do balastro electromagnético.³²

3.2.5. Funcionamento Balastro-Lâmpada

O arranque da lâmpada ocorre em duas fases: na primeira fase, é aplicada uma tensão elevada nos eléctrodos para iniciar a ionização do gás na lâmpada. Na segunda fase, tem de ser mantida uma tensão suficiente dentro da lâmpada, de modo a manter a ionização e desenvolver o arco eléctrico.¹⁴

Há pelo menos três tipos de arrancadores: arrancadores com pré-aquecimento, arrancadores instantâneos e os arrancadores rápidos. As lâmpadas com arrancadores do tipo pré-aquecimento possuem um mecanismo que aquece os eléctrodos para estimular os electrões e ionizar o gás. Como consequência, a tensão necessária para atingir o arco é menor. Um iniciador automático controla o processo de pré-aquecimento, o que pode durar alguns segundos. Depois de pré-aquecidos os eléctrodos, é desligado o pré-aquecedor e a tensão é aplicada entre os eléctrodos de forma a atingir o arco. Quando a lâmpada estiver a funcionar, a temperatura nos eléctrodos é mantida pelo arco eléctrico.⁴

As lâmpadas com arrancadores do tipo instantâneo são também chamadas de lâmpadas de arrancadores frios e são capazes de operar a diversas densidades de corrente, dependendo do balastro associado. Isto resulta num elevado intervalo de potências de UV. A iniciação do arco numa lâmpada deste tipo depende unicamente da aplicação de uma elevada tensão (400 – 1000 V). Esta elevada tensão ejecta electrões dos eléctrodos, que iram ionizar o gás e iniciar a descarga no arco. Os balastros providenciam a tensão necessária para atingir o arco e funcionam sem um pré-aquecedor ou iniciador automático.⁴

As lâmpadas com arrancadores rápidos utilizam eléctrodos com baixa ou alta resistência, que são aquecidos continuamente. O aquecimento é concretizado por enrolamentos de baixa tensão presentes no balastro ou separando transformadores de baixa tensão. A tensão de arranque é similar às lâmpadas pré-aquecidas e este tipo de lâmpadas normalmente demoram um segundo a ligar. Os balastros de arranque rápido são mais pequenos, mais baratos e têm menor perda de potência do que os iniciadores instantâneos.¹⁴

3.2.6. Produção de Ozono

A radiação Ultravioleta compreendida no intervalo de comprimentos de onda 180 – 240 nm provoca a formação de ozono, sendo a banda associada à sua formação centrada a 185 nm²⁹, como é ilustrado na figura 3.12.

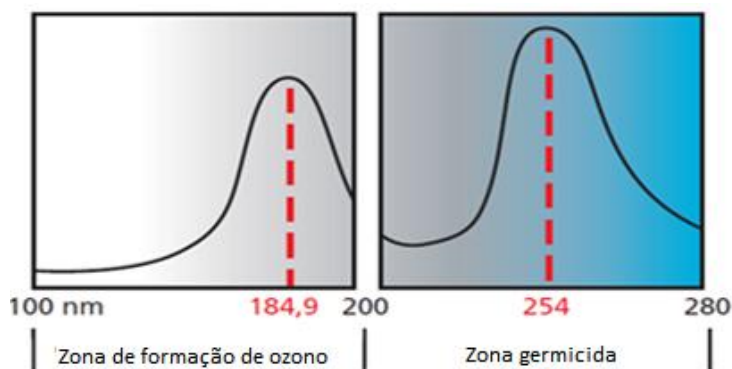


Figura 3. 12 – Bandas de formação de ozono após exposição do oxigénio ao Ultravioleta.²⁹

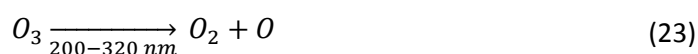
A radiação Ultravioleta interage com o oxigénio levando à criação de dois átomos de oxigénio. Esse oxigénio reage com as moléculas diatómicas formando ozono, de acordo com as reacções:



A reacção seguinte requer uma terceira molécula (M) que possa absorver a energia associada ao radical O. Esta molécula é normalmente o Nitrogénio (N₂).



O ozono formado absorve a radiação Ultravioleta, de acordo com as reacções:



Desta forma, a radiação Ultravioleta produz ozono, mas ao mesmo tempo destrói-o. Esta capacidade de absorver a radiação Ultravioleta faz da camada do ozono um importante filtro da radiação solar.

O ozono (O₃) é um gás à temperatura ambiente, instável, altamente reactivo e oxidante.²⁹ O ozono reage com a humidade do ar, produzindo radicais hidroxilo e outras espécies reactivas, sendo considerado perigoso para o humano a partir de valores na ordem dos 1,1 ppm por 8 horas de exposição.¹⁴

Um dos maiores efeitos do ozono no ser humano é a irritação dos tecidos das vias aéreas. A exposição ao ozono pode reduzir o volume de ar nos pulmões, causando falta de ar,

e doses excessivas podem aumentar a permeabilidade das células pulmonares, ficando estas mais susceptíveis a toxinas e a microrganismos.³¹

Nas lâmpadas de média pressão, é gerada uma linha espectral ténue no comprimento de onda de 185 nm, verificando-se a produção de ozono. No caso das lâmpadas de baixa pressão, não se verifica nenhuma linha espectral neste comprimento nem na sua vizinhança, sendo a formação de ozono apenas vestígal. Existem actualmente alguns tipos de lâmpada de baixa pressão, em que o tipo de vidro da lâmpada filtra o comprimento de onda de 185 nm, não se produzindo nenhum ozono.¹⁴

O ozono absorve UV no intervalo de comprimentos de onda 200-320 nm, sendo o pico de absorção aos 253,7 nm. Como tal, o ozono é criado e destruído pela radiação Ultravioleta, sendo que as condições de trabalho definem a taxa de formação de ozono.²⁹

3.2.7. Cuidados

Conforme indicado no capítulo anterior, a exposição à radiação Ultravioleta provoca danos na pele e nos olhos. É recomendado que não se manuseie a lâmpada enquanto esta estiver ligada. No caso deste sistema, essa situação não é permitida, uma vez que a porta do armário possui um interruptor que só permite que a lâmpada se ligue com a porta fechada. No entanto, se for necessário manusear a lâmpada ligada, é imperativo utilização de luvas de protecção e óculos. O uso de capacete com viseira é recomendado em situações de exposição mais prolongada.

Na tabela 3.4 apresentam-se os valores limite da Irradiância efectiva, considerados como aceitáveis pelo *American Congress of Governamental na Industrial Values* (ACGIH), para a exposição humana a 254 nm em função do tempo.

Tabela 3. 4 – Níveis de exposição admissível ao UV-C segundo a ACGIH.¹⁸

Exposição admissível ao UV-C	
Duração da exposição por dia	Irradiância efectiva ($I_{\text{eff}} / \mu\text{W}/\text{cm}^2$)
8 horas	0,2
4 horas	0,4
2 horas	0,8
1 hora	1,7
30 minutos	3,3
15 minutos	6,6
10 minutos	10
5 minutos	20
1 minuto	100

3.2.8. Manutenção

A lâmpada Ultravioleta-C deve ser substituída anualmente ou após 9000 horas de utilização contínua. Algumas lâmpadas, especialmente as lâmpadas pequenas podem ter uma vida útil menor, sendo necessário consultar as especificações do fabricante. Lâmpadas que são utilizadas em condições diferentes das ideais (demasiado quente ou demasiado frio) e lâmpadas que são periodicamente ligadas e desligadas podem ter tempos de vida menores. Por esta razão, a inspeção visual destas lâmpadas tem de ser regular. No caso de uma lâmpada fundida ou danificada, na zona dos filamentos, o vidro fica escurecido.

A utilização de um sensor de radiação Ultravioleta permite verificar que a lâmpada está a fornecer o UV-C indicado pelo fabricante. As lâmpadas geradoras de Ultravioleta-C também têm de ser protegidas do pó, sendo necessário fazer uma limpeza regular destas. Esta limpeza deve ser realizada com um pano humedecido em água ou com um agente de limpeza, por exemplo, álcool. Não devem ser utilizados óleos ou ceras. As lâmpadas queimadas terão áreas negras próximas dos eléctrodos.

3.2.9. Características da lâmpada utilizada

A lâmpada escolhida é a Philips TUV PL-S 5W/2P 1CT. Consiste numa lâmpada de geometria cilíndrica, de baixa pressão de vapor de mercúrio com potência de 5,5W e tensão de entrada de 34V, sendo que a potencia UV-C é de 1,1W.³² É uma lâmpada do tipo cátodo quente e o balastro mais utilizado é do tipo electromagnético. Na figura 3.13 encontra-se esquematizada a ligação balastro-lâmpada utilizada.

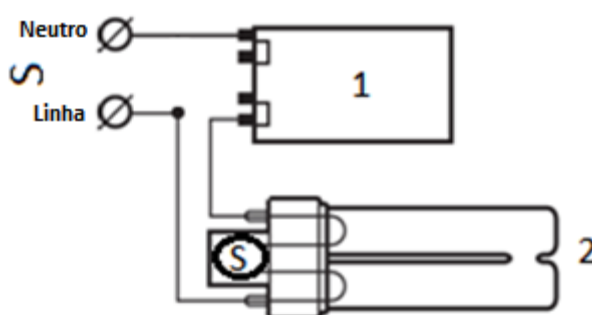


Figura 3. 13 – Esquema da ligação Balastro-Lâmpada. É visível o Balastro (1) e a lâmpada (2). O balastro é ligado ao neutro e o arrancador da lâmpada (S) encontra-se no seu interior.³³

Analisando os resultados obtidos para uma lâmpada com 1W UV-C, podemos concluir que os tempos de exposição para diferentes distâncias da amostra à lâmpada são elevados. Com este aumento do tempo de exposição, é possível obter dados mais concretos acerca do efeito germicida e do efeito da radiação em amostras biológicas.

3.3. Sistema de Posicionamento

O sistema de posicionamento vertical utilizado para deslocar o porta amostras consiste em dois cabos de aço com comprimento igual a 3600 mm e diâmetro 2 mm, ligados ao suporte através de molas, que permitem que o cabo esteja sempre em tensão. Na face inferior do armário, encontra-se de cada lado, uma polia de diâmetro 22 mm que permite que o movimento contínuo do cabo. Estas polias estão esquematizadas na figura 3.14.

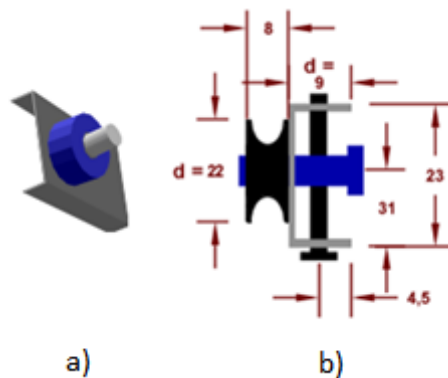


Figura 3. 14 – Esquema tridimensional (a) e cotas (em milímetros) das polias de passagem do cabo de aço, colocadas na tampa inferior do armário (b).

Na face superior do armário, o cabo passa pela tampa superior por meio de dois orifícios de diâmetro 2,5 mm passando por duas polias de teflon de 46 mm de diâmetro, revestidas com borracha no chanfro de passagem do cabo. Estas polias estão presas a um eixo de aço de diâmetro 12 mm e comprimento 370 mm que é suportado por duas chumaceiras fixas ao armário. Na figura 3.15 ilustra-se o sistema de elevação e na figura 3.16 é ilustrado um esquema tridimensional do mesmo sistema.

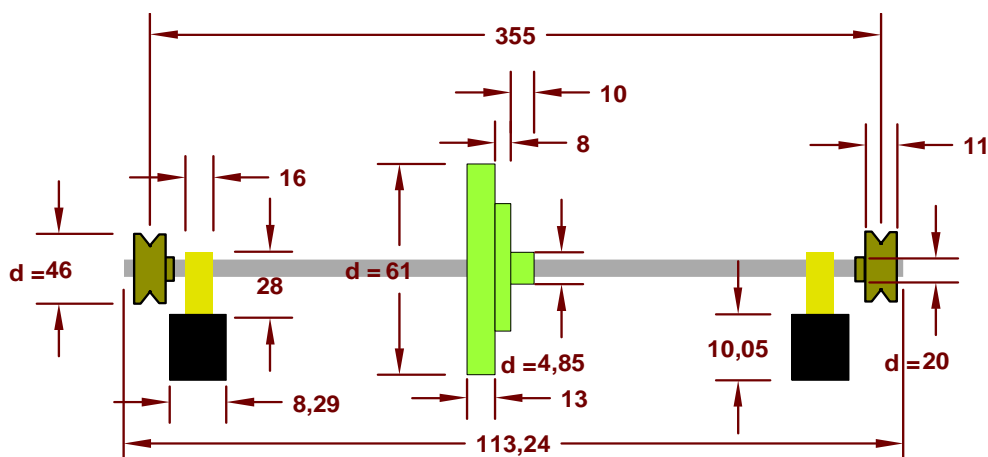


Figura 3. 15 – Esquema e cotas (em milímetros) do eixo de suporte dos cabos de aço. São mostradas as polias de passagem do cabo, os suportes do eixo que se ligam à tampa superior do armário e a polia central pertencente ao motor do elevador.

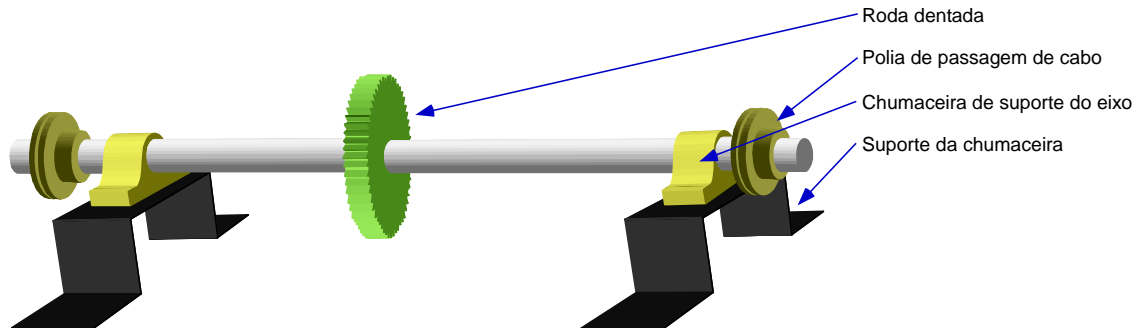


Figura 3. 16 Esquema tridimensional do eixo de suporte dos cabos de aço.

Para o movimento elevatório do porta amostras, foi utilizado um motor 12V DC e com uma corrente de 2A. Como ilustrado na figura 3.17, o motor possui na sua saída, um redutor de velocidade do tipo parafuso sem fim, irreversível. O sentido de rotação pode ser invertido, através de um sistema que inverte os pólos do motor.

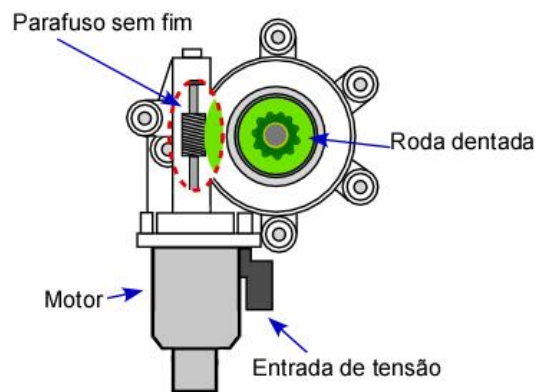


Figura 3. 17 – Esquema do motor utilizado com pormenor da ligação do motor à roda dentada que faz a transmissão do movimento.

O movimento do motor é transmitido ao eixo através de uma roda dentada, permitindo que a rotação do motor imprima o movimento ao porta amostras. Na figura 3.18 é ilustrado o mecanismo de transmissão de movimento.

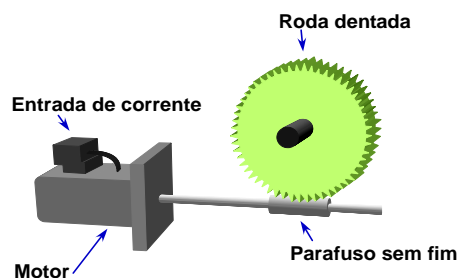


Figura 3. 18 – Esquema da interacção entre o motor do elevador e a roda dentada que faz a ligação ao suporte. A transmissão do movimento é feita por via de um parafuso do tipo sem fim.

Para fornecer uma tensão de 12V DC, foi utilizada uma fonte de tensão TDK-Lambda, que fornece uma tensão máxima de ± 12 DC. Esta tensão pode ser alterada, através de um potenciômetro de $5k\Omega$, conseguindo-se assim uma tensão máxima de saída de ± 14 V DC e a tensão mínima de saída de ± 8 V DC.

As saídas da fonte de tensão encontram-se ligadas de forma cruzada no interruptor de modo a obter um inversor polaridade. Assim, pode controlar-se o movimento de descida e subida do prato, bem como parar o prato numa posição pretendida.

O interruptor é do tipo DPDT do tipo ligado momentâneo–desligado–ligado momentâneo²⁴ e o seu esquema encontra-se ilustrado na figura 3.19.

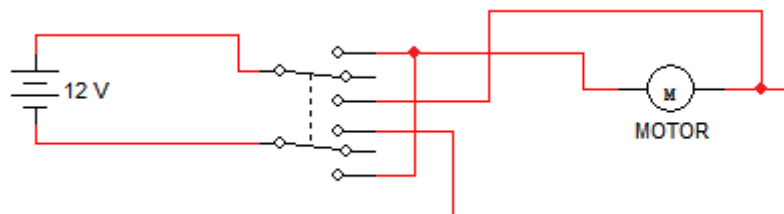


Figura 3. 19 – Esquema electrónico do interruptor inversor de polaridade.

A vantagem de ter uma tensão variável é que permite que o suporte de amostras se mova com velocidade variável. Assim, aumenta-se a sensibilidade do sistema de elevação para pequenos movimentos e diminui-se o tempo de espera para movimentos maiores.

Na face interna superior e inferior, foram colocados dois interruptores de fim de curso do tipo SPST de circuito normalmente fechado, figura 3.20, que permitem que o suporte das amostras quando chega ao limite, desligue o motor evitando assim sobrecarga.²⁴

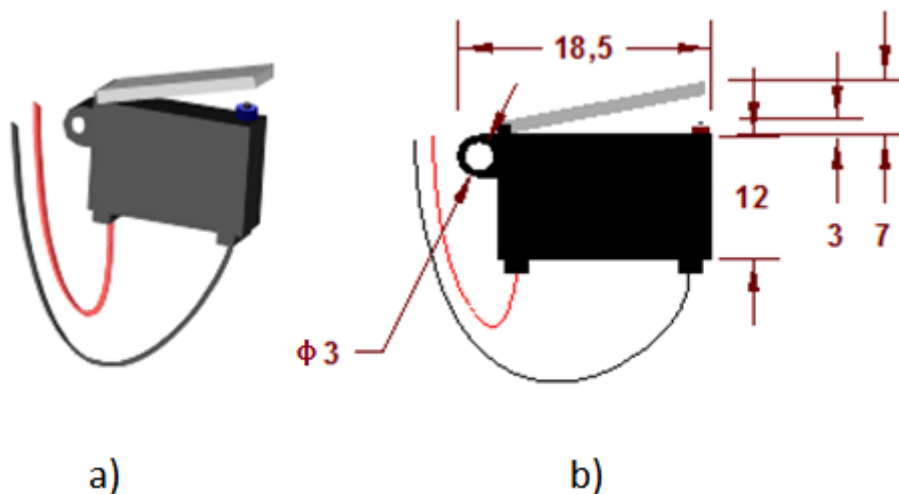


Figura 3. 20 – Esquema tridimensional (a) e medidas (em milímetros) dos interruptores de fim de curso (b).

Os interruptores foram colocados de tal forma que quando atingido o limite superior, apenas seja possível descer o suporte e quando atingido o limite inferior, apenas seja possível subir o suporte. A colocação na face superior teve em conta a colocação da lâmpada e do casquilho, para que não exista o perigo em fracturar a lâmpada aquando do movimento do suporte de amostras. Na face inferior, o interruptor foi colocado de forma a que o suporte de amostras baixasse o mais possível. Os cabos eléctricos, no caso do interruptor inferior, foram colocados dentro do eixo de apoio ao suporte de amostras, de modo a que não se danificassem com a exposição à radiação.

Para que o movimento do suporte de amostras fosse harmonioso, foi necessário colocar dois eixos verticais de diâmetro 19,5 mm presos na tampa inferior e na tampa superior, de modo a que a amostra ficasse sempre na mesma posição relativamente à lâmpada. Na figura 3.21 é ilustrado o posicionamento dos eixos verticais.

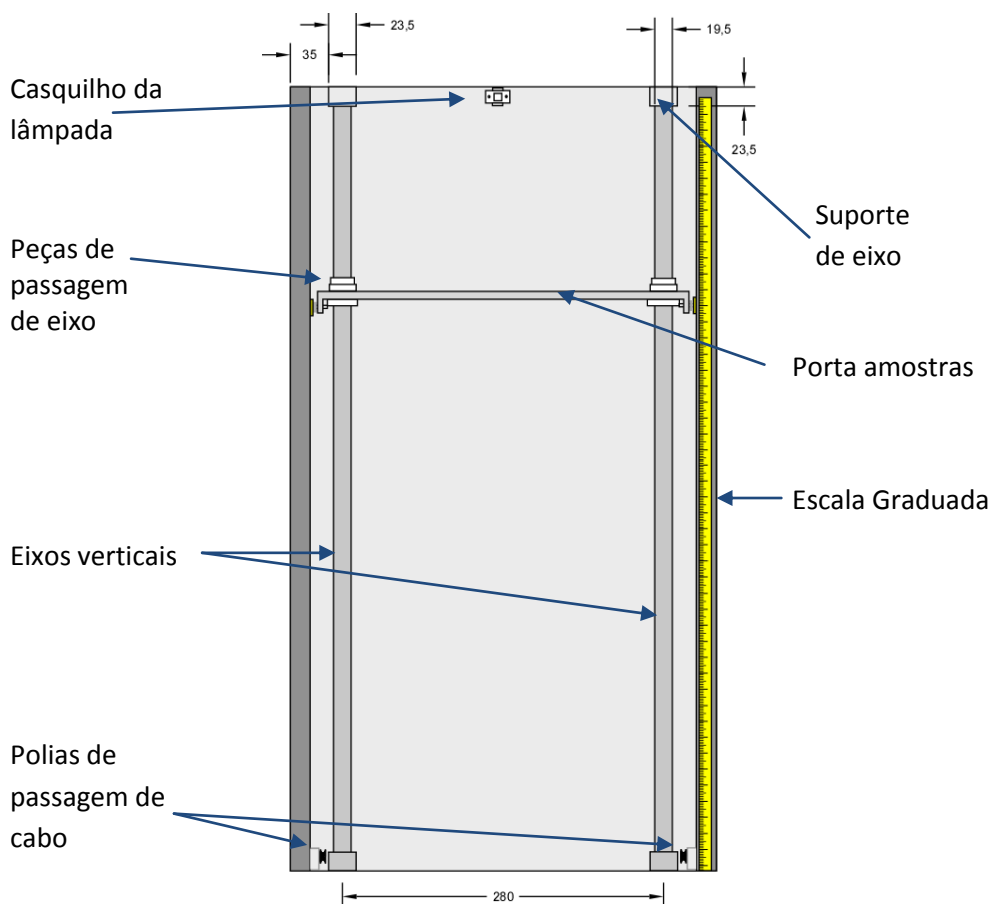


Figura 3. 21 – Esquema e cotas (em milímetros) do interior do armário. É mostrado o suporte de amostras, a fita métrica indicadora da distância à lâmpada, o casquilho da lâmpada e os eixos verticais.

Na face frontal de um dos perfis de guias, foi colocada uma fita métrica de 1800 mm para facilitar o posicionamento do porta amostras à distância pretendida. O zero da fita métrica corresponde à superfície da lâmpada e a distância máxima à lâmpada corresponde a 1760 mm. O suporte de amostras na sua posição mínima fica a 50 mm da lâmpada, sendo que a distância à lâmpada pode ser menor consoante a amostra. No caso dos testes do sistema, foi possível colocar o sensor de radiação a uma distância de 10 mm da lâmpada.

3.4. Porta amostras

Na figura 3.22 é ilustrado o porta amostras.

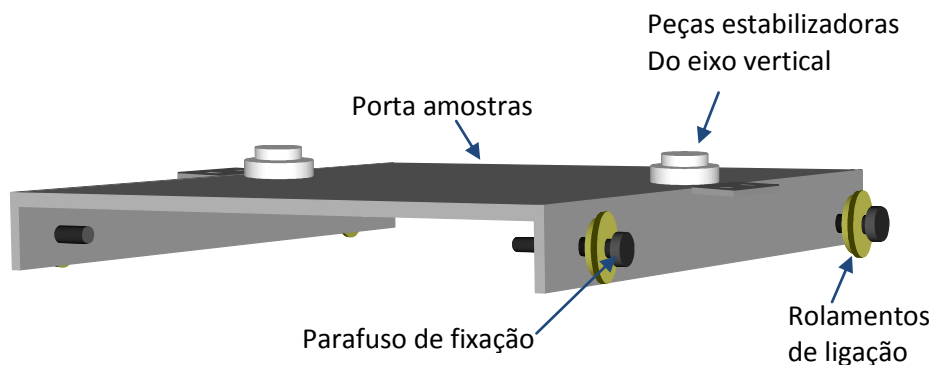


Figura 3. 22 – Esquema tridimensional do porta de amostras, onde são igualmente apresentados os rolamentos, as peças estabilizadoras e os parafusos de fixação.

O porta amostras consiste num prato em aço, com espessura 2 mm, em forma de U invertido com medidas indicadas na figura 3.25. É suportado lateralmente por quatro rolamentos de Teflon, que encaixam nos carris e que estão presos ao suporte através de parafusos autoblocantes, conforme ilustrado na figura 3.23.

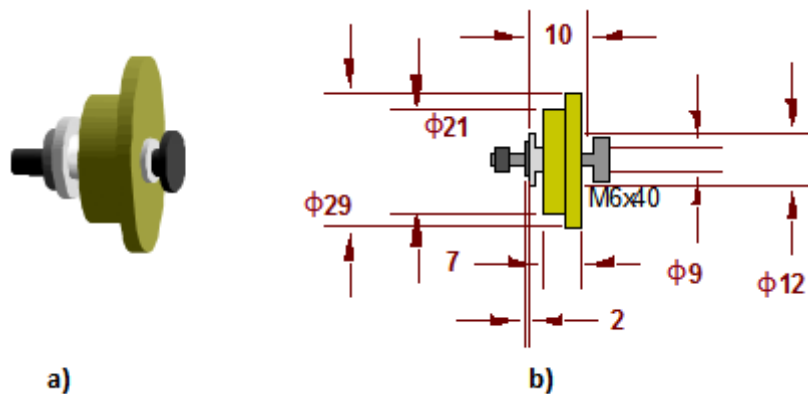


Figura 3. 23 - Esquema tridimensional (a) e cotas (em milímetros) dos rolamentos de ligação do porta amostras ao perfil de guia (b).

Na face superior do suporte de amostras, foram criadas duas aberturas por onde passam os eixos verticais. Essas aberturas possuem duas peças estabilizadoras em plástico, ilustradas na figura 3.24, que permitem a lubrificação dos eixos, bem como o controle da resistência ao movimento do prato, uma vez que são peças com aperto ajustável:

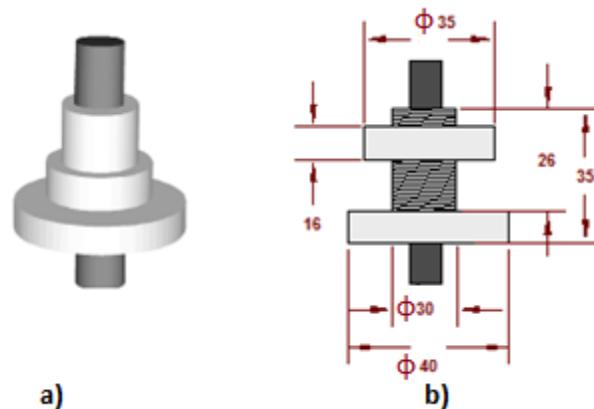


Figura 3. 24 – Esquema tridimensional (a) e cotas (em milímetros) das peças de passagem dos eixos verticais (b).

Ainda na parte lateral do suporte encontra-se soldada ao porta amostras, uma estrutura em L com rotação de 90° para a direita, onde se encontra fixo o cabo de aço pertencente ao sistema de elevação.

As medidas do porta amostras foram calculadas para que este encaixasse nos perfis de guias, já com os rolamentos colocados. Desta forma, os rolamentos quando colocados nos perfis de guias permitem que o prato não tenha movimento lateral nem antero-posterior. A face superior permite a colocação de caixas de Petri com um diâmetro máximo de 120 mm.

O sensor de temperatura está colocado na vertical, distanciando 50 mm da margem posterior, conforme ilustrado na figura 3.26. Encontra-se fixo ao porta amostras através de um parafuso e a ligação deste sensor é feita por meio de dois fios com resistência 10,5 k Ω e de diâmetro 1 mm, revestidos por uma cobertura de silício. Foi utilizado um sensor do tipo NTC (Negative Temperature Coefficient).²⁴

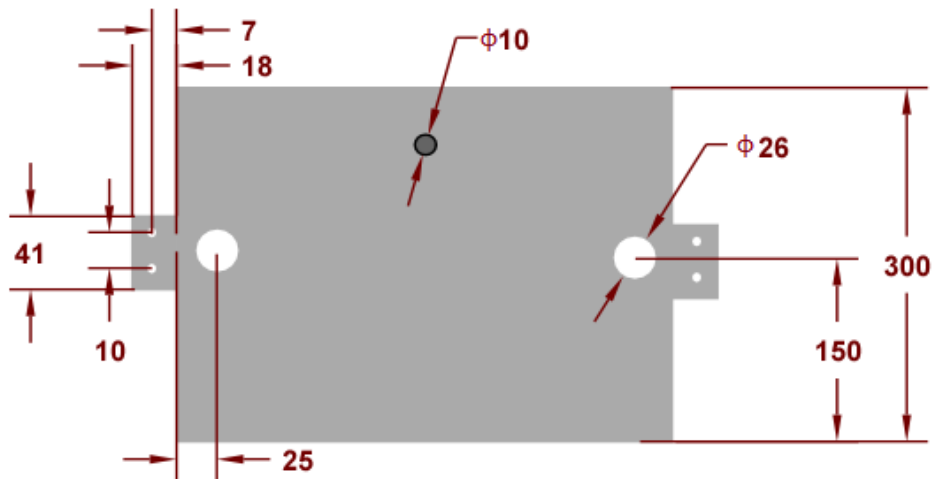


Figura 3. 25 – Esquema e cotas (em milímetros) do suporte de amostras, aberturas para colocação das peças de passagem dos eixos, orifícios de passagem e fixação dos cabos de aço.

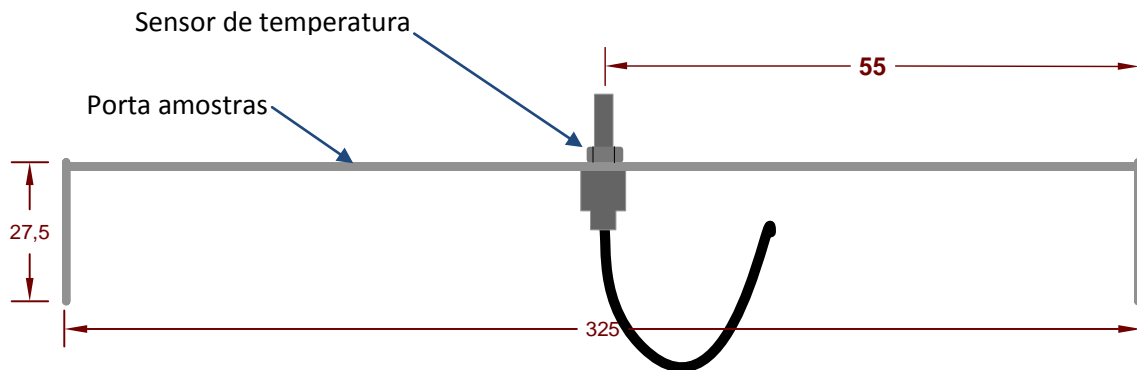


Figura 3. 26 - Esquema e cotas (em milímetros) do suporte de amostras e posicionamento do sensor de temperatura.

O sensor de temperatura foi posicionado de forma a mostrar a temperatura ao nível da caixa de Petri que contém as amostras a irradiar. Conforme ilustrado na figura 3.27 possui um parafuso de aperto ajustável, sendo possível retirar o sensor do suporte e colocá-lo noutra posição se tal for pretendido.

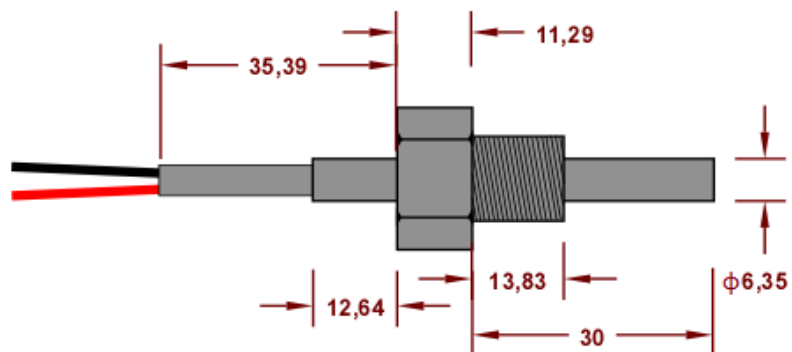


Figura 3. 27 – Esquema e cotas (em milímetros) do sensor de temperatura.

3.5. Unidade de controlo

A unidade de controlo possui todos os instrumentos necessários para controlar perfeitamente o sistema, como é se ilustra na figura 3.28. É feita de chapa de alumínio, medidas 380 mm x 320 mm x 120 mm e está aparafusada ao armário. Na face anterior encontram-se os instrumentos e na face posterior encontram-se os fusíveis e o cabo de alimentação. No interior da caixa de controlo, foi colocado o motor do elevador, a fonte de tensão, o eixo principal do elevador e respectivos suportes e finalmente a saída dos cabos de ligação aos instrumentos: sensor de temperatura, sensor de radiação, ventoinha e ligação ao balastro da lâmpada.

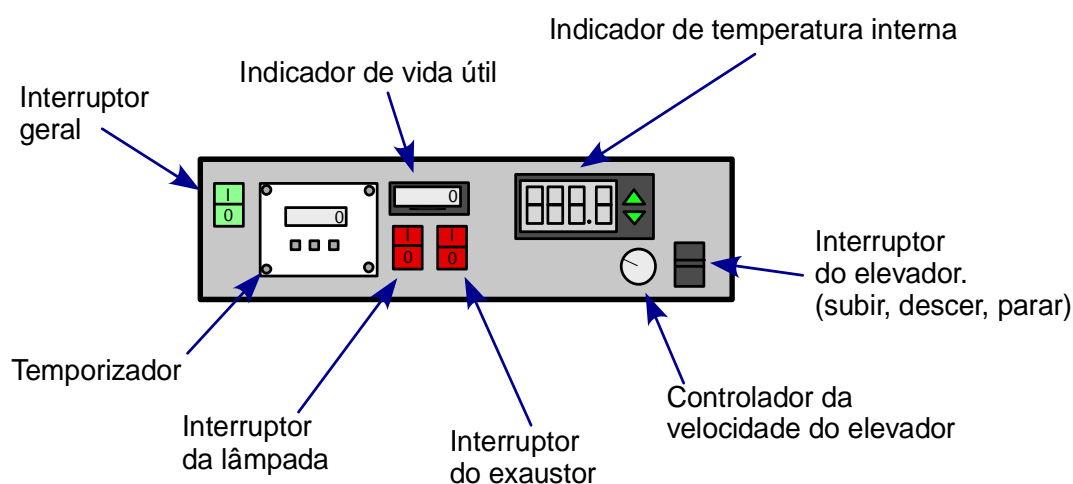


Figura 3. 28 – Esquema da caixa de controlo.

Para ligar o sistema, é necessário ligar o interruptor geral. Este interruptor é iluminado, de cor verde, com medidas 38,5 mm x 25 mm²⁴ e com entrada 220 V e é colocado antes do divisor de tensão. Quando este interruptor se encontra na posição “Desligado”, nenhum dos instrumentos funciona. Depois de ligado o interruptor principal, são ligados automaticamente o termóstato e o relé temporizador, sendo que, embora estando ligado, ainda não está activo.

O relé temporizador funciona como um controlador do tempo de exposição. No capítulo anterior, foi mostrada uma tabela que indica o tempo de exposição para alguns organismos. Para podermos controlar o tempo de exposição calculado e comparar os resultados obtidos com os resultados da literatura, é necessário ter um controlo temporal que permita que o tempo de exposição decorrido seja igual ao obtido nos cálculos. Este aparelho está ligado ao interruptor da lâmpada e ao balastro da lâmpada, sendo que esta só funciona quando o relé estiver activo. Possui funções de programação para 7 dias e a sua resolução mínima é de 1 minuto. Tem como medidas 72 mm x 72 mm.²⁴

O termóstato faz o controlo da temperatura na região do porta de amostras. Este aparelho tem como funcionalidades o controlo da temperatura máxima e mínima e indicação de temperatura. Permite actuar como um relé de temperatura, se tal for necessário. Este aparelho tem entrada do tipo NTC e tem duas saídas.²⁸ O contador tem como funcionalidade indicar o tempo contabilizado com a lâmpada ligada. Para tal, encontra-se directamente ligado ao interruptor, de modo a que lâmpada e contador funcionem em simultâneo. Este contador tem como valor máximo 99999 horas 59 minutos.²⁴

O interruptor da lâmpada está directamente ligado à lâmpada e ao contador. Só liga a lâmpada quando o relé estiver activo e pode desligar a lâmpada a qualquer momento independentemente de ser atingido ou não o tempo de exposição inserido no relé.

O interruptor do exaustor permite ligar e desligar o escoamento do ozono produzido pela lâmpada Ultravioleta-C. Desta forma é possível fazer estudos com e sem a presença de ozono no meio envolvente à amostra.

O interruptor do elevador funciona como controlador do movimento do porta amostras. Faz a ligação entre a fonte de tensão e o motor do elevador. A posição normal deste interruptor é na posição “Desligado”. É um interruptor do tipo momentâneo, ou seja, só quando o botão for premido é que o motor funciona.

O controlo de velocidade do suporte de amostras é feito no potenciómetro que controla a tensão de saída da fonte de tensão que alimenta o motor do elevador. A sua posição mínima significa a velocidade mínima a que o suporte se pode mover e a sua posição máxima significa a velocidade máxima a que o suporte se pode mover. A velocidade tanto pode ser controlada com o suporte em movimento como com o suporte parado.

A face posterior da caixa possui um único cabo de entrada da alimentação de todo o sistema. Este cabo liga directamente às tomadas tradicionais. No interior da caixa, faz-se a distribuição da tensão pelos diferentes instrumentos posicionados na face anterior da caixa, como está esquematizado na figura 3.29.

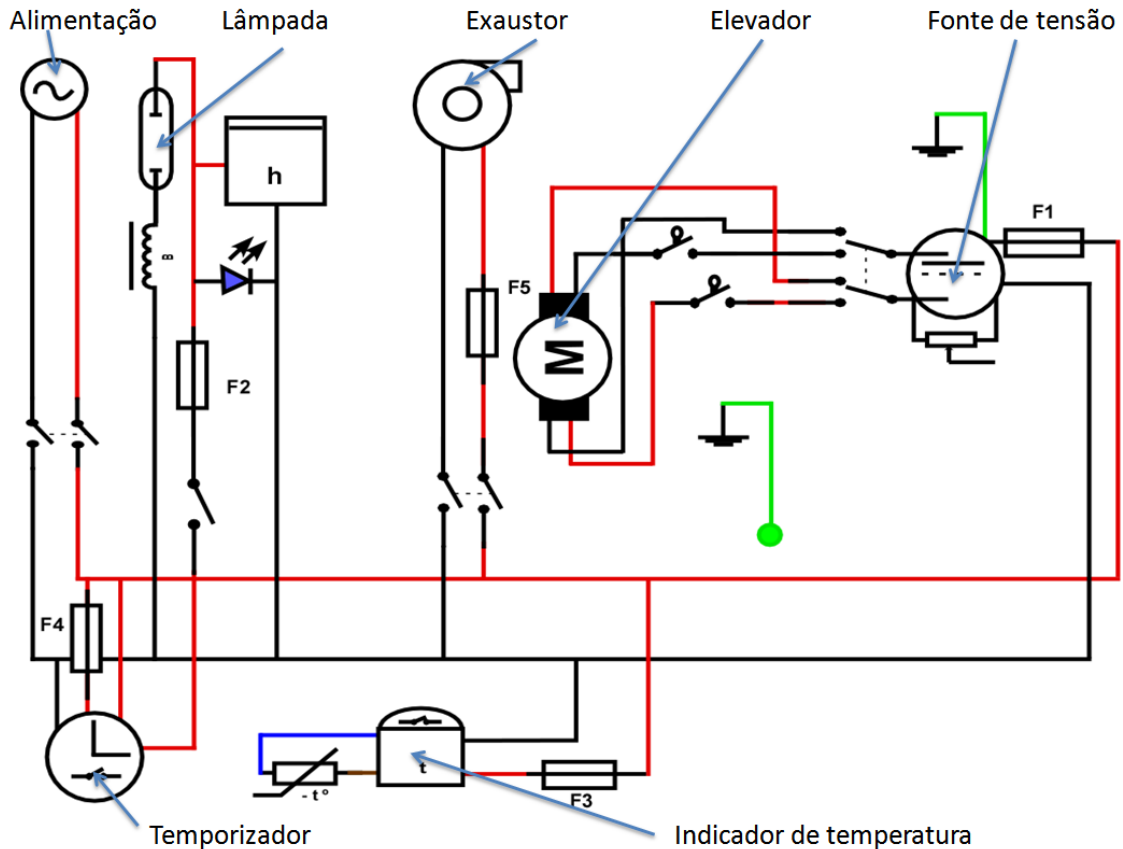


Figura 3. 29 – Esquema electrónico da caixa de controlo.

Na figura está esquematizada a parte electrónica da caixa de controlo. A complexidade do esquema está relacionada com a colocação dos fusíveis na face posterior da caixa de controlo. Para um melhor funcionamento da lâmpada, o balastro tem de estar o mais próximo possível desta, tendo sido necessário encaixar todos os componentes em função da posição do balastro. O motor do elevador ocupa a posição central da unidade de controlo. Uma vez que foi utilizada uma grelha de protecção da fonte de tensão, o único local onde esta se encaixava foi ao lado do motor do elevador. Os instrumentos estão colocados na face anterior da caixa de controlo para melhor acesso.

O instrumento mais importante da caixa de controlo é o temporizador. Sem ele, a lâmpada não funciona e conseqüentemente o contador também não. O utilizador define o tempo em que o sistema está ligado, sendo que esta programação pode ser feita para 7 dias. Para proteger o temporizador, foi colocado um fusível de 250 mA na posição F4.

No temporizador existe um interruptor que quando está na posição “ligado” permite ligar a lâmpada. Depois de se entrar no período definido pelo utilizador para funcionamento da lâmpada, o circuito entre o temporizador e o interruptor da lâmpada fica fechado, podendo a lâmpada ser ligada em qualquer instante. Quando o utilizador pretende ligar a lâmpada, acciona o respectivo interruptor e o circuito passa pelo fusível F2 e pelo interruptor da porta

até ligar um circuito que faz a ligação ao balastro. O fusível F2 protege também o contador e o LED de sinalização, uma vez que estes estão inseridos no circuito de ligação ao balastro.

O contador entra em funcionamento assim que chega corrente ao circuito de ligação e tal só acontece quando o interruptor da lâmpada estiver ligado e a porta fechada.

Os fins de curso estão colocados nas tampas inferior e superior do armário, o sensor está no suporte de amostras e o LED está inserido no encaixe da porta do armário. Os fios correspondentes a estes componentes passam para a caixa de controlo por via de um orifício que liga o armário à caixa. Este orifício é revestido com um tubo de borracha de forma a ser todo preenchido, evitando a saída de radiação para o exterior.

Colocados na face posterior, estão todos os fusíveis necessários para proteger o sistema de curtos circuitos e sobrecorrentes que possam acontecer, estes fusíveis são todos do tipo 5x20 mm com corpos de vidro, com correntes de 250 mA, 3,15 A e 1 A conforme ilustrado na figura 3.30.

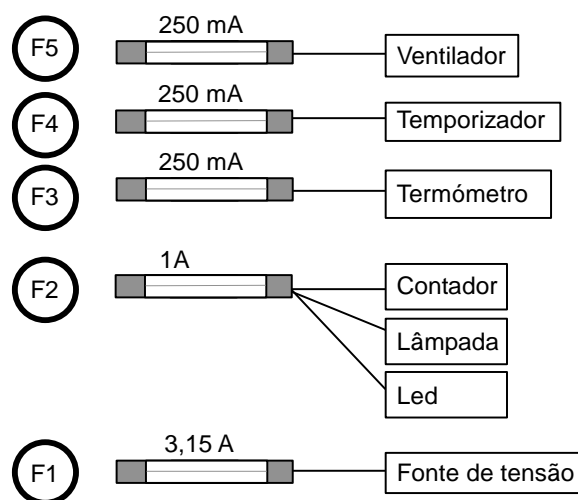


Figura 3. 30 – Localização, calibre e respectivo instrumento-alvo dos fusíveis utilizados.

No interior da caixa existe um único cabo que faz ligação ao suporte de amostras. Este cabo tem a ligação ao sensor de temperatura. O balastro faz a ligação à lâmpada por meio de um orifício que liga a caixa ao armário. O fio de ligação à ventoinha também é colocado dentro da caixa e passa pelo mesmo orifício da ligação do balastro à lâmpada.

3.6. Exaustor

Devido à formação de ozono no interior do armário e sendo um gás potencialmente perigoso, foi necessária a colocação de um exaustor.

A câmara de irradiação tem um volume de $0,328 \text{ m}^3$. Como o fluxo do exaustor é 27 l s^{-1} , isto significa que por segundo, o ventilador retira quase 12 vezes o volume do armário. Desta forma, conclui-se que este ventilador é suficiente para garantir uma atmosfera livre sem ozono no interior do armário. Na figura 3.31 é ilustrado o exaustor utilizado.

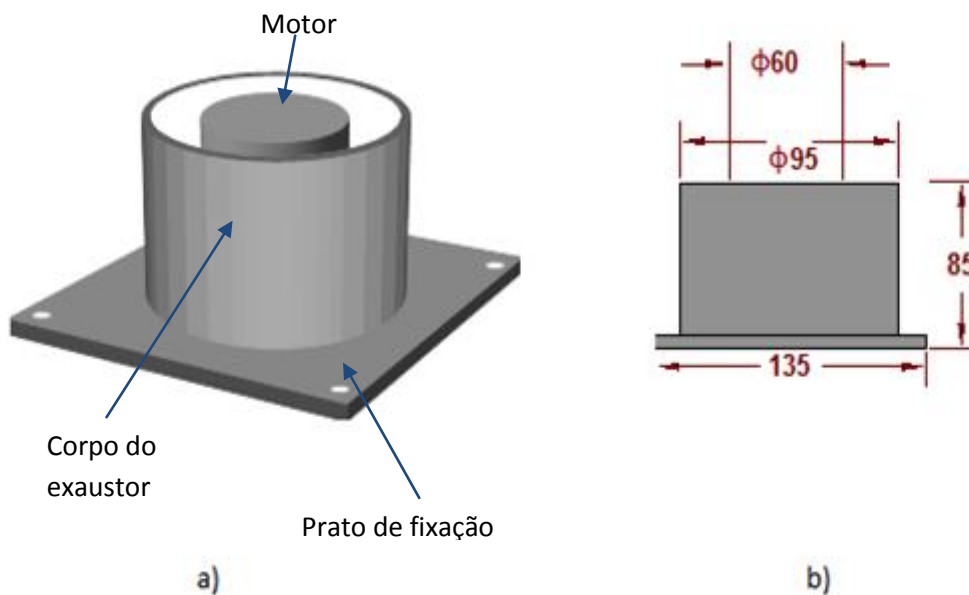


Figura 3. 31 – Esquema tridimensional (a) e cotas (em milímetros) do ventilador (b).

3.7. Segurança do Sistema

Para garantir a segurança do sistema, foram colocados vários mecanismos que não só impedem a saída de radiação para o exterior do armário, como também impedem o funcionamento da lâmpada com a porta do armário aberta. Foi também colocado um sistema sinalizador que permite a qualquer utilizador saber quando é que a lâmpada está em funcionamento.

Nos locais de encaixe das tampas e das faces laterais do armário foram colocados parafusos para unir de forma eficaz todos os constituintes do armário e torná-lo numa peça única. Para vedar os possíveis locais de saída de radiação, foi colocado silicone na parte interior e na parte exterior do armário, garantido assim que não há saída de radiação para o exterior.

Na porta do armário, o trinco da porta foi isolado com uma borracha autocolante para evitar possíveis saídas de radiação. No armário, foi colocado um interruptor que entra em contacto com o trinco da porta. Este interruptor limita o funcionamento da lâmpada, impedindo que esta funcione com a porta aberta.

Para sinalizar o funcionamento da lâmpada de UV-C, foi colocado um LED azul numa posição no armário que permitisse ser bem visível e não ser alvo de confusão. Este LED acende quando a porta está fechada e quando a lâmpada está em funcionamento.

3.8. O sistema

O sistema desenvolvido encontra-se esquematizado nas seguintes figuras 3.32 e 3.33. Na figura 3.32 é exibida a parte superior do interior do armário, sendo visível a lâmpada, os carris e o suporte de amostras.

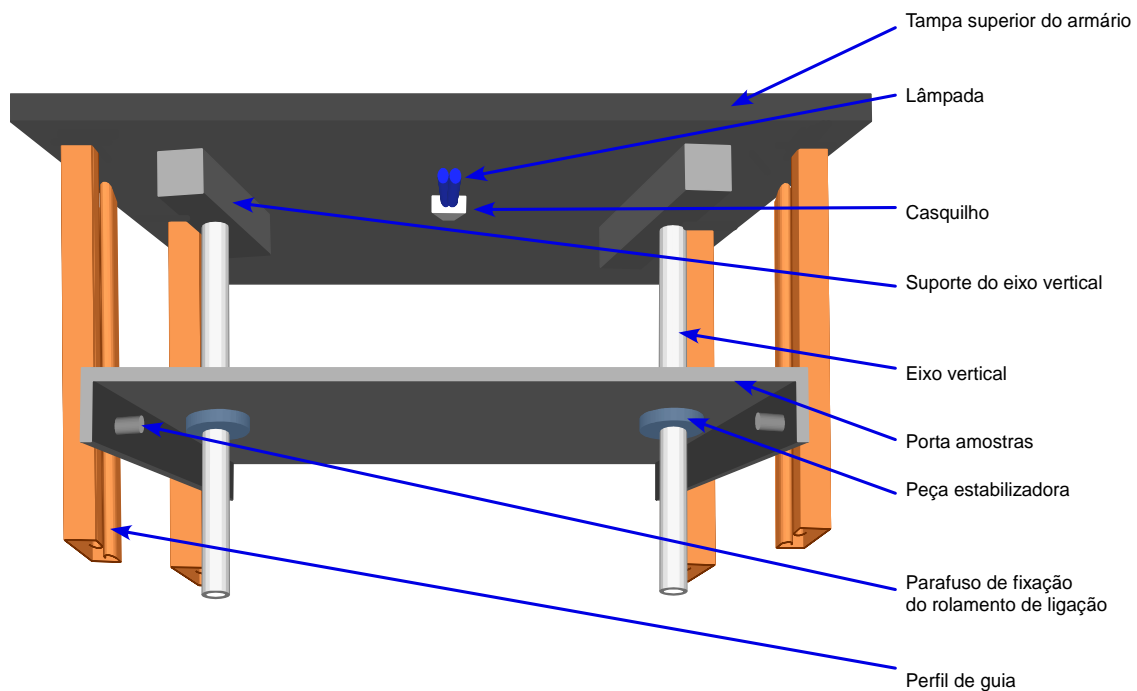


Figura 3. 32 – Esquema da parte superior do interior do armário.

Na figura 3.33, é ilustrada a parte inferior do interior do armário. São visíveis as peças que encaixam no suporte de amostras e que fazem a passagem dos eixos verticais. São também visíveis os rolamentos de passagem do cabo e os orifícios onde os cabos se prendem ao suporte.

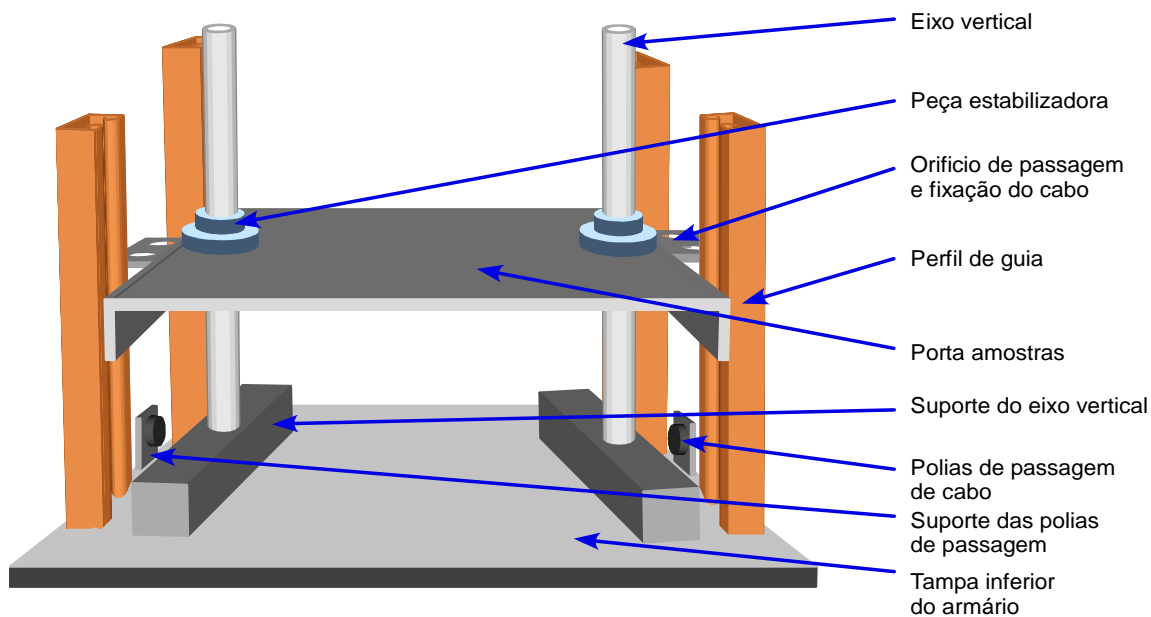


Figura 3. 33 – Esquema da parte inferior do armário.

3.9. Orçamento

Finalmente, é apresentado na tabela 3.4 o orçamento resumido envolvido no desenvolvimento do sistema.

Tabela 3. 5 – Orçamento utilizado na construção do sistema de irradiação por Ultravioleta.

Tipo	Montante (€)
Materiais	400
Equipamento	430
Mão-de-obra	350
	1.180

Em anexo é apresentada uma lista pormenorizada de todos os materiais e equipamentos utilizados.

Capítulo 4. Teste do Sistema e Resultados Experimentais

Para testar o sistema, de forma a verificar se os cálculos efectuados se ajustam ao sistema desenvolvido, foram realizados três testes diferentes a seguir descritos.

4.1. Teste 1 – Variação da distância entre a fonte de luz e a amostra.

Pretendeu-se analisar a diferença entre a curva teórica da irradiância para uma lâmpada de 1,1 W e a curva obtida experimentalmente para a mesma lâmpada. Os valores teóricos permitem construir uma curva muito semelhante a uma curva de decaimento exponencial, sendo que no caso da irradiância o valor vai-se aproximando do zero, para distâncias à lâmpada muito grandes, como é ilustrado na figura 4.1.

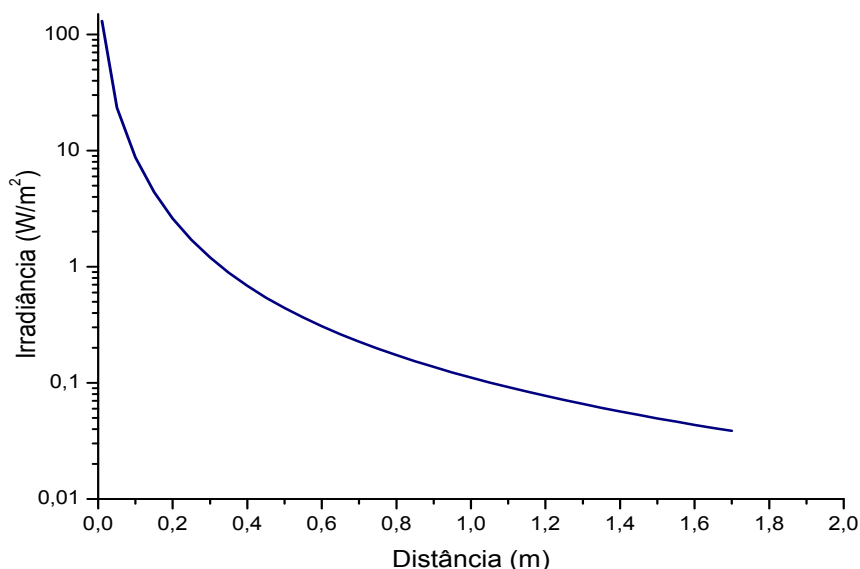


Figura 4. 1 - Curva da irradiância em função da distância à fonte.

Neste teste do sistema, variou-se a distância do suporte de amostras à lâmpada. Na posição central do suporte de amostras, foi colocado o sensor de Ultravioleta-C durante cinco minutos com a lâmpada ligada e foram recolhidos os valores da Irradiância às diferentes distâncias. O comprimento da lâmpada é 0,134 m e foram recolhidos os valores da Irradiância em intervalos de 0,05 m. A comparação entre valores teóricos e experimentais encontra-se na tabela 4.1.

Tabela 4. 1 – Valores teóricos e práticos para a Irradiância em função da distância à lâmpada.

Distância	Teórico	Experimental	Desvio
a (m)	I (W/m²)	I (W/m²)	(W/m²)
0,010	130,470	76,742 ± 6,310	53,728
0,050	23,439	26,131 ± 0,887	-2,693
0,100	8,756	11,019 ± 0,899	-2,263
0,150	4,394	4,371 ± 0,332	0,023
0,200	2,597	2,306 ± 0,174	0,291
0,250	1,703	1,304 ± 0,138	0,399
0,300	1,199	1,040 ± 0,139	0,159
0,350	0,888	0,886 ± 0,126	0,002
0,400	0,684	0,652 ± 0,109	0,031
0,450	0,542	0,537 ± 0,081	0,006
0,500	0,441	0,414 ± 0,081	0,026
0,550	0,365	0,369 ± 0,070	-0,004
0,600	0,307	0,310 ± 0,054	-0,003
0,650	0,262	0,281 ± 0,043	-0,019
0,700	0,226	0,253 ± 0,029	-0,027
0,750	0,197	0,221 ± 0,034	-0,024
0,800	0,173	0,197 ± 0,032	-0,024
0,850	0,154	0,187 ± 0,029	-0,033
0,900	0,137	0,176 ± 0,019	-0,039
0,950	0,123	0,157 ± 0,021	-0,034
1,000	0,111	0,131 ± 0,012	-0,020
1,050	0,101	0,123 ± 0,016	-0,023
1,100	0,092	0,111 ± 0,025	-0,019
1,150	0,084	0,111 ± 0,022	-0,027
1,200	0,077	0,108 ± 0,014	-0,031
1,250	0,071	0,092 ± 0,021	-0,021
1,300	0,066	0,087 ± 0,020	-0,021
1,350	0,061	0,086 ± 0,015	-0,025
1,400	0,057	0,082 ± 0,018	-0,026
1,450	0,053	0,082 ± 0,012	-0,029
1,500	0,049	0,080 ± 0,011	-0,031
1,550	0,046	0,079 ± 0,008	-0,032
1,600	0,043	0,068 ± 0,014	-0,024
1,650	0,041	0,067 ± 0,013	-0,026
1,700	0,039	0,066 ± 0,013	-0,028

Analisando os valores da tabela 4.1 e analisando a figura 4.2, verifica-se a proximidade entre os valores teóricos e os valores obtidos experimentalmente. No entanto, na distância mínima à lâmpada, os valores afastam-se mais. Para distâncias superiores a 1,15 m, os valores experimentais são superiores aos teóricos, embora se mantenha a tendência da irradiância diminuir com a distância à lâmpada.

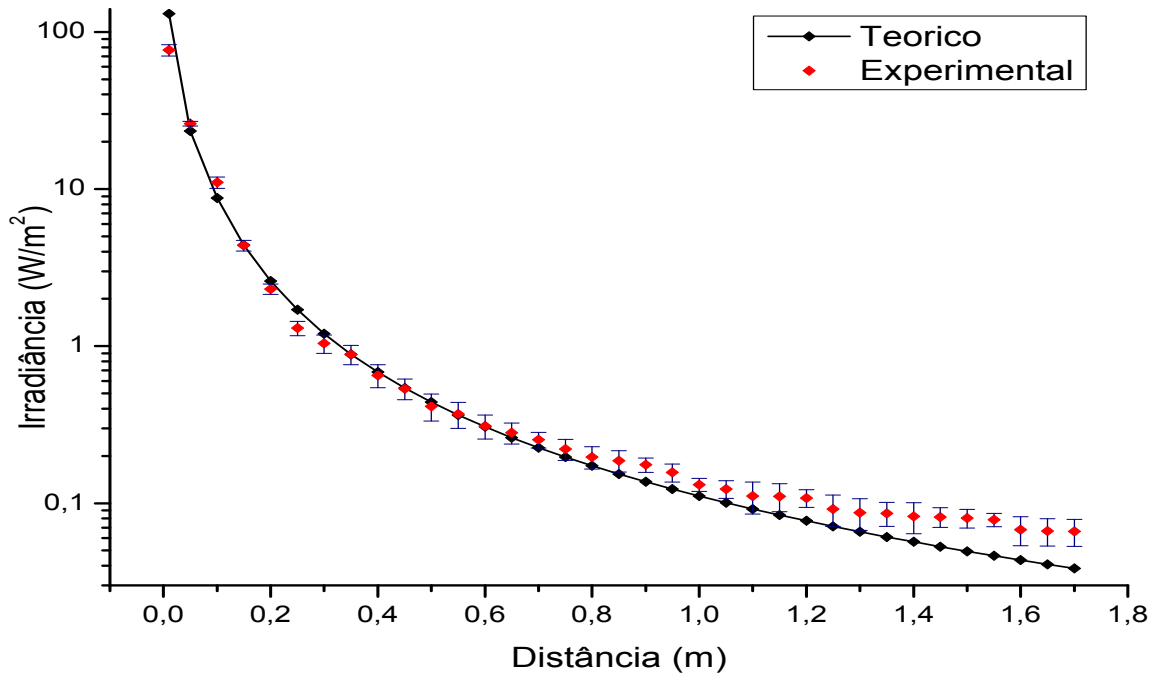


Figura 4. 2– Curva teórica e curva experimental da Irradiância em função da distância.

Verifica-se o desvio nos valores com o aumento da distância, mas no geral os resultados obtidos são coerentes e fidedignos. No entanto, verificam-se diferenças significativas nos valores teóricos e experimentais na distância mínima e para distâncias superiores a 1200 mm. No caso da distância mínima, os valores são distantes possivelmente pela geometria da lâmpada e dos cálculos efectuados. A diferença dos valores com o aumento da distância à lâmpada pode estar relacionada com o aumento de reflexões do Ultravioleta-C nas paredes do armário e a quantidade de radiação que chega ao sensor ser superior.

Para calcular o valor da potência UV-C da lâmpada, utiliza-se o valor da irradiância medida a um metro da lâmpada, e aplica-se a equação 4 em ordem a φ .

$$\varphi = \frac{2\pi^2 \cdot l \cdot a \cdot I}{2\alpha + \text{sen } 2\alpha} \quad (25)$$

Utilizando os valores: $l = 0,134$ m, $a = 1$ m, $I = 0,131$ W/m², $\alpha = 0,067$ rad obtém-se:

$$\varphi = \frac{2\pi^2 \times 0,134 \times 1 \times 0,131}{2 \times 0,067 + (\text{sen}(2 \times 0,067))} \quad (26)$$

$$\varphi = 1,295 \pm 0,168 \text{ W}$$

De acordo com o fabricante, a potência UV-C da lâmpada é de 1,1W. Comparando os resultados, podemos concluir que o valor esperado e o valor experimental estão próximos, sendo que a diferença é de cerca de 15%. No entanto, o fabricante indica que o valor de 1,1 W é obtido depois de 100 horas de funcionamento e o valor obtido experimentalmente foi obtido depois de cerca de 3 horas de funcionamento. Como está mostrado na figura 3.8, após cerca de 100 horas, o decréscimo na potência da lâmpada é de aproximadamente 5% em relação ao valor inicial. Desta forma, retirando 5% ao valor obtido em laboratório, a potência UV-C da lâmpada é de 1,23 W. Este valor é muito próximo do indicado pelo fabricante e como tal, conclui-se que a lâmpada está em pleno funcionamento.

4.2. Teste 2 – Distribuição da radiação em função da posição do sensor.

Neste teste, pretende-se medir a distribuição da radiação ao longo do porta amostras a uma distância constante da fonte de luz. Foram escolhidas nove posições no porta amostras, tal como ilustrado na figura 4.3. A lâmpada encontra-se alinhada com a posição 7 (P7).

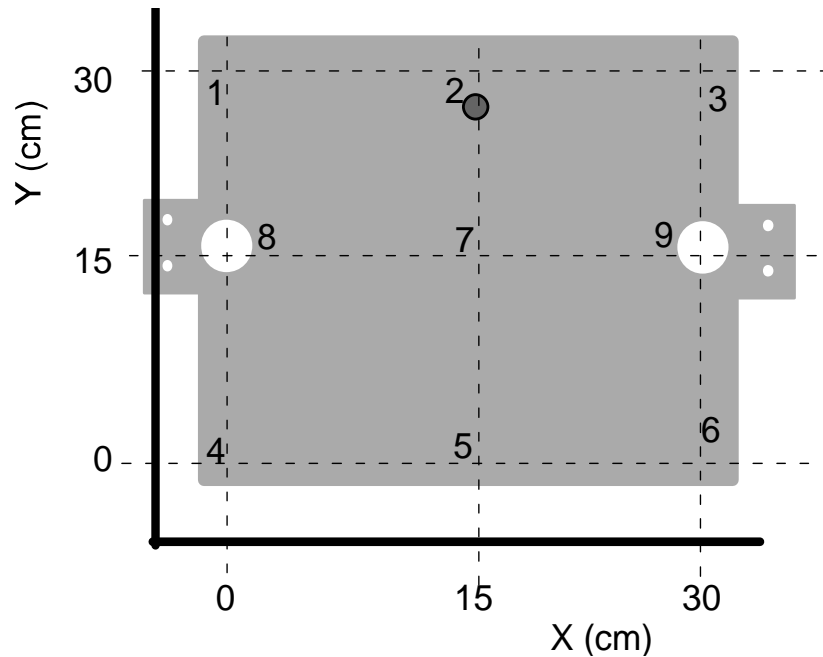


Figura 4.3 - Esquema do posicionamento do sensor de radiação UV-C.

Em cada uma das posições, o sensor foi exposto à radiação UV-C durante cinco minutos. De seguida foram recolhidos os valores da irradiância e obtiveram-se dois gráficos. Um dos gráficos é tridimensional, exibindo-se os máximos de irradiância no suporte de amostras. O segundo gráfico obtido exhibe a distribuição de radiação no suporte. Ambos os gráficos permitem ter a noção da distribuição da irradiância no suporte de amostras em diferentes posições no suporte.

10 mm

Na tabela 4.2 são apresentados os valores da irradiância obtidos nas diferentes posições, sendo apresentada a variação percentual em relação à posição central.

Tabela 4. 2 – Valores da Irradiância para as diferentes posições.

Distância à lâmpada (m)	Posição	I (W/m ²)	Varição em relação a P7(%)
0,010 ± 0,001	1	0,006 ± 0,002	99,99
0,010 ± 0,001	2	0,000 ± 0,000	100,00
0,010 ± 0,001	3	0,000 ± 0,000	100,00
0,010 ± 0,001	4	0,000 ± 0,000	100,00
0,010 ± 0,001	5	0,016 ± 0,001	99,98
0,010 ± 0,001	6	0,003 ± 0,001	100,00
0,010 ± 0,001	7	65,738 ± 7,236	0,00
0,010 ± 0,001	8	0,086 ± 0,003	99,87
0,010 ± 0,001	9	0,059 ± 0,002	99,91

Na figura 4.4 é ilustrada a distribuição da irradiância ao longo do porta amostras. De acordo com a tabela anterior, para um diâmetro de 120 mm centrado na posição 7 do porta amostras, a variação da irradiância é de aproximadamente 20%.

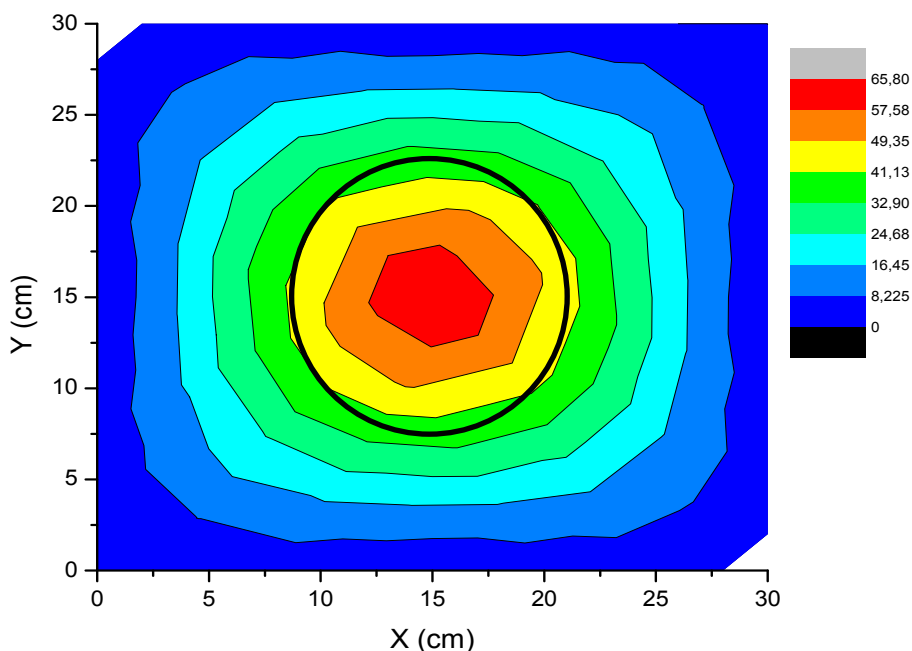


Figura 4. 4 - Distribuição da irradiância no porta amostras a uma distância de 10 mm à fonte.

Na figura 4.5 é apresentado um gráfico tridimensional da distribuição da irradiância ao longo do porta amostras.

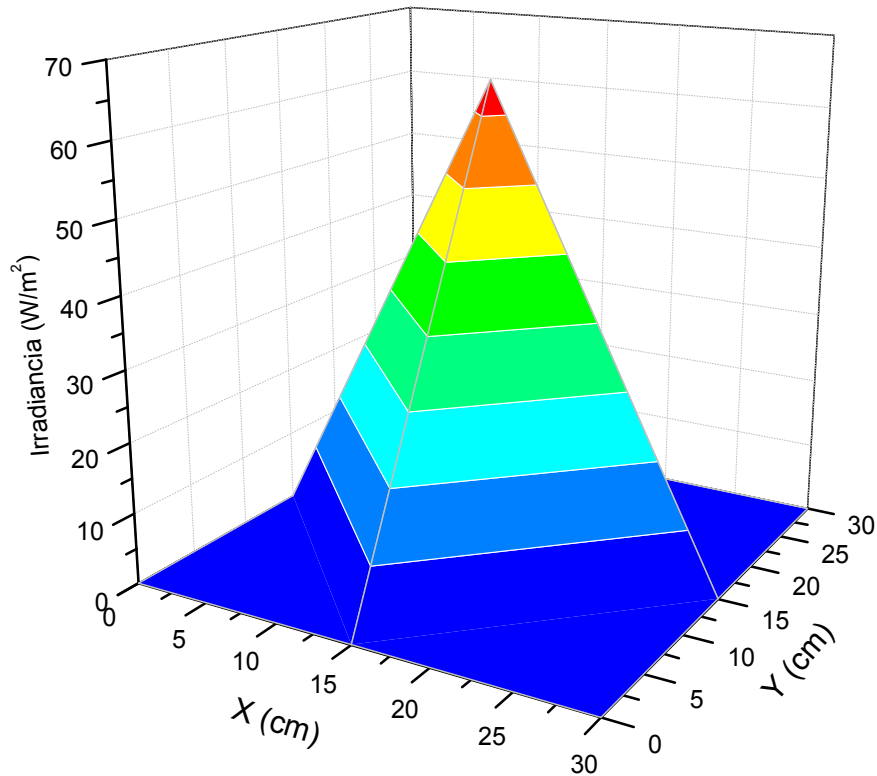


Figura 4. 5 - Gráfico tridimensional da distribuição da Irradiância no porta amostras a uma distância de 10 mm à fonte.

À distância mínima possível neste sistema, os resultados obtidos neste teste, revelam uma distribuição da radiação centrada na posição perpendicular à lâmpada. Analisando a tabela, é notório que o sensor apenas recolhe radiação na posição central, sendo que na periferia desta posição, os valores recolhidos são mínimos e possivelmente são consequência de fenómenos de reflectividade.

200 mm

Na tabela 4.3 são apresentados os valores experimentais da irradiância para as diferentes posições do sensor de radiação no porta amostras.

Tabela 4. 3 – Valores da Irradiância para as diferentes posições.

Distância à lâmpada (m)	Posição	I (W/m ²)	Varição em relação a P7(%)
0,200 ± 0,001	1	0,164 ± 0,013	93,15
0,200 ± 0,001	2	0,611 ± 0,013	74,53
0,200 ± 0,001	3	0,176 ± 0,002	92,65
0,200 ± 0,001	4	0,264 ± 0,017	89,00
0,200 ± 0,001	5	1,028 ± 0,011	57,11
0,200 ± 0,001	6	0,253 ± 0,008	89,43
0,200 ± 0,001	7	2,398 ± 0,066	0,00
0,200 ± 0,001	8	1,783 ± 0,026	25,66
0,200 ± 0,001	9	1,557 ± 0,200	35,07

Na figura 4.6 é ilustrada a distribuição da irradiância ao longo do porta amostras. De acordo com a tabela anterior, para um diâmetro de 120 mm centrado na posição 7 do porta amostras, a variação da irradiância é de aproximadamente 6%.

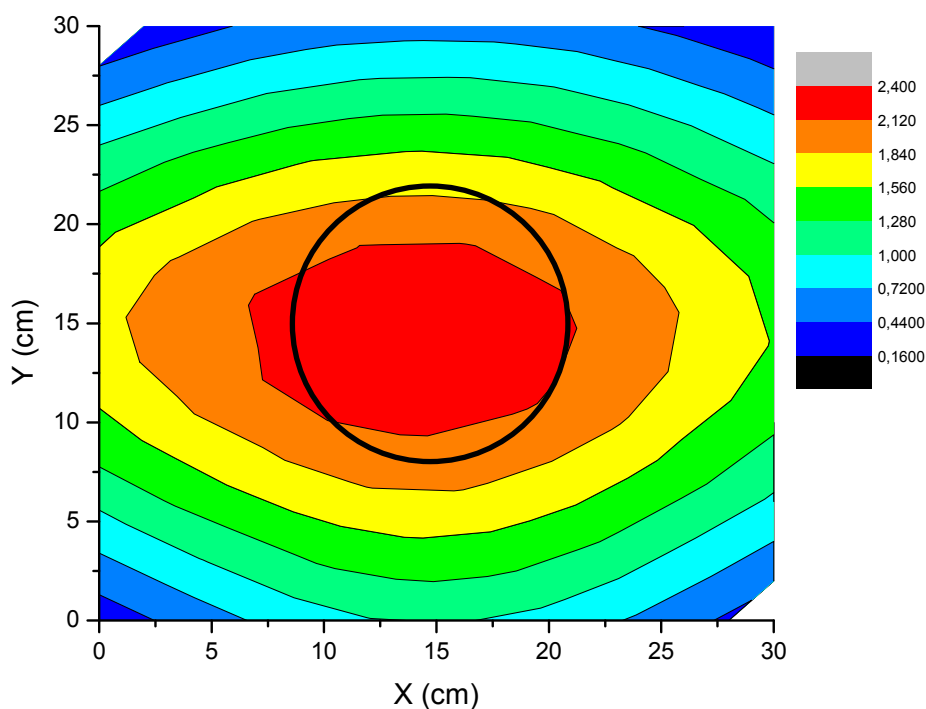


Figura 4. 6 - Distribuição da irradiância no porta amostras para uma distância de 200 mm à fonte.

Na figura 4.7 é apresentado um gráfico tridimensional da distribuição da irradiância ao longo do porta amostras.

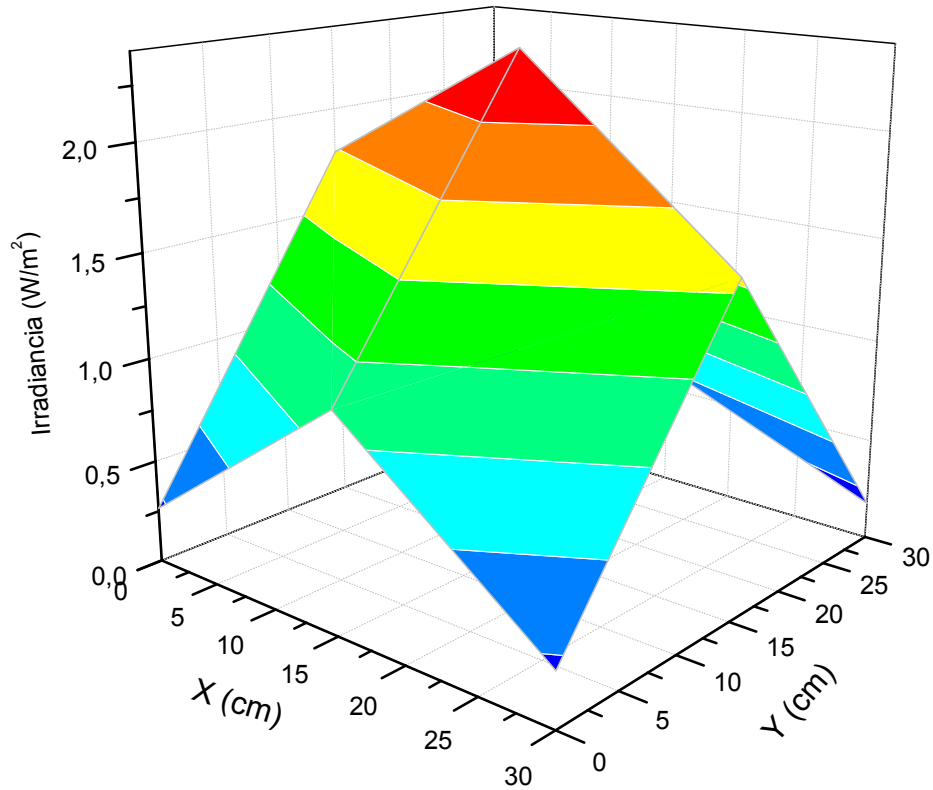


Figura 4. 7 - Gráfico tridimensional da distribuição da Irradiância no porta amostras a uma distância de 200 mm à fonte.

A uma distância de 200 mm da lâmpada, a variação da posição do sensor permite concluir que a irradiância vai-se uniformizando ao longo do suporte, sendo que no centro do mesmo se verifica o valor mais elevado e que na periferia do porta amostras se verifique os valores mais baixos. A esta distância ainda se verifica a existência de um pico de irradiância na posição central. No entanto, comparando com a distância mínima, o valor do máximo não é muito elevado quando comparado com as posições mais próximas.

500 mm

Na tabela 4.4 são apresentados os valores experimentais da irradiância para as diferentes posições do sensor de radiação no porta amostras.

Tabela 4. 7 – Valores da Irradiância para as diferentes posições.

Distância à lâmpada (m)	Posição	I (W/m ²)	Varição em relação a P7(%)
0,500 ± 0,001	1	0,354 ± 0,028	37,05
0,500 ± 0,001	2	0,473 ± 0,015	16,05
0,500 ± 0,001	3	0,352 ± 0,023	37,43
0,500 ± 0,001	4	0,415 ± 0,012	26,34
0,500 ± 0,001	5	0,521 ± 0,062	7,41
0,500 ± 0,001	6	0,464 ± 0,025	17,51
0,500 ± 0,001	7	0,563 ± 0,088	0,00
0,500 ± 0,001	8	0,473 ± 0,060	15,98
0,500 ± 0,001	9	0,462 ± 0,019	17,90

Na figura 4.8 é ilustrada a distribuição da irradiância ao longo do porta amostras. De acordo com a tabela anterior, para um diâmetro de 120 mm centrado na posição 7 do porta amostras, a variação da irradiância é de aproximadamente 2%.

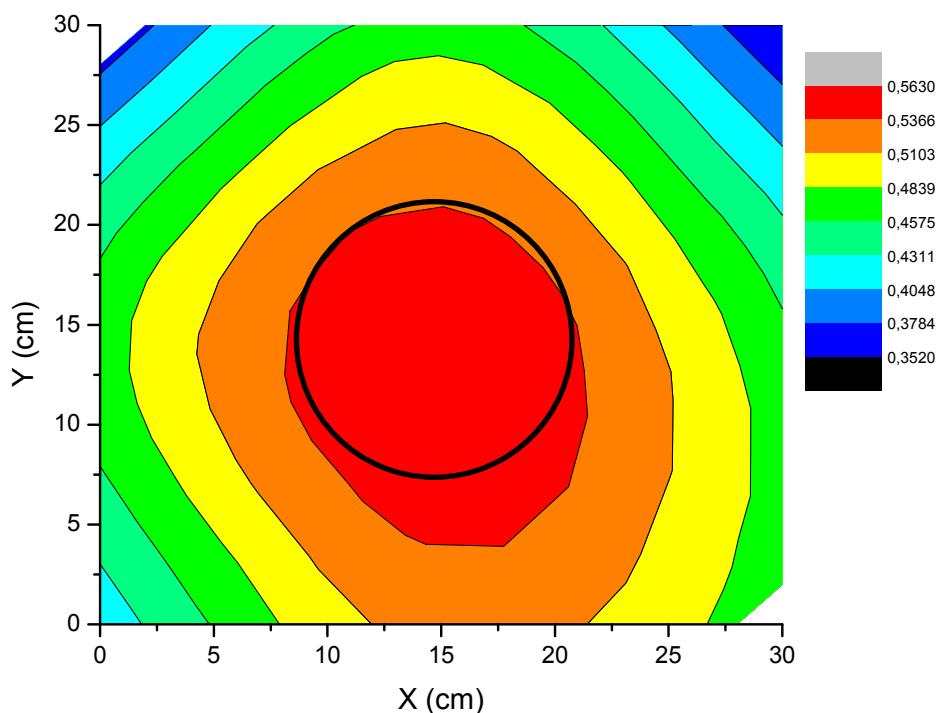


Figura 4. 8 - Distribuição da irradiância no porta amostras para uma distância de 500 mm à fonte.

Na figura 4.9 é apresentado um gráfico tridimensional da distribuição da irradiância ao longo do porta amostras.

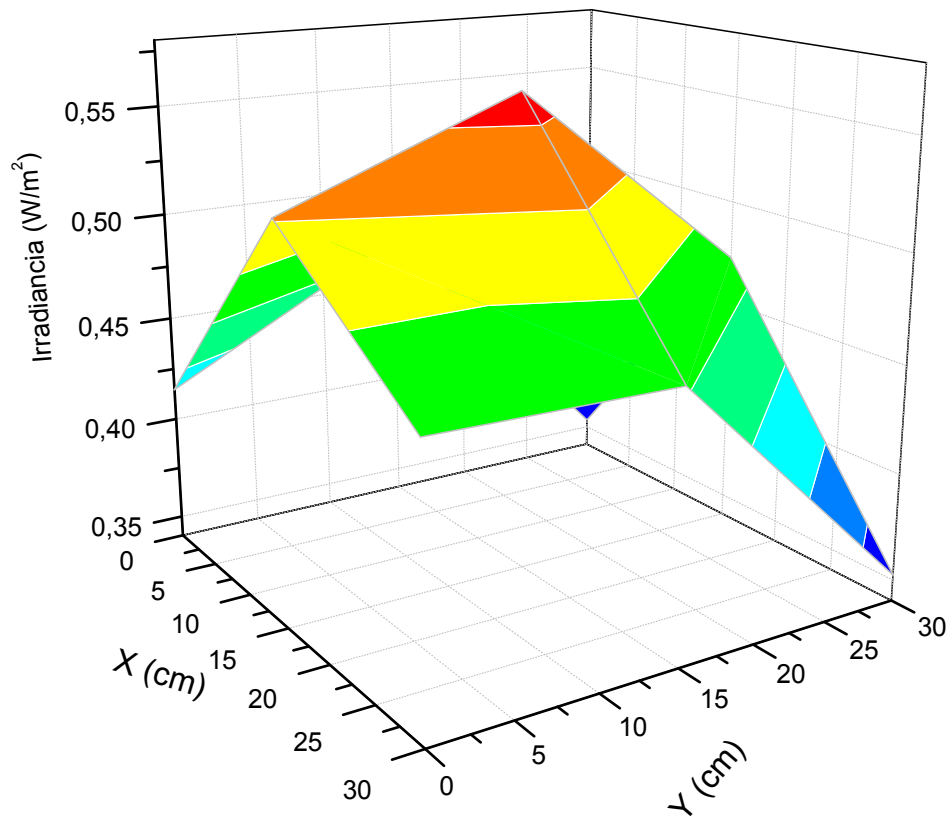


Figura 4. 9 - Gráfico tridimensional da distribuição da Irradiância no porta amostras a uma distância de 500mm à fonte.

Com o aumento da distância à lâmpada será expectável que os valores da irradiância diminuam e que se distribuam de uma forma praticamente uniforme ao longo do suporte de amostras. Como é possível analisar na tabela 4.4 os valores da irradiância nas diferentes posições não são muito díspares entre si, sendo que nas posições centrais se verificam os valores mais elevados. Este resultado está de acordo com o esperado, uma vez que na região central, a distância à lâmpada é menor.

1000 mm

Na tabela 4.5 são apresentados os valores experimentais da irradiância para as diferentes posições do sensor de radiação no porta amostras.

Tabela 4. 8 – Valores da Irradiância para as diferentes posições.

Distância à lâmpada (m)	Posição	I (W/m ²)	Varição em relação a P7(%)
1,000 ± 0,001	1	0,148 ± 0,025	19,72
1,000 ± 0,001	2	0,156 ± 0,011	15,29
1,000 ± 0,001	3	0,152 ± 0,014	17,65
1,000 ± 0,001	4	0,161 ± 0,013	12,78
1,000 ± 0,001	5	0,173 ± 0,011	5,99
1,000 ± 0,001	6	0,166 ± 0,009	9,64
1,000 ± 0,001	7	0,184 ± 0,019	0,00
1,000 ± 0,001	8	0,176 ± 0,011	4,29
1,000 ± 0,001	9	0,181 ± 0,007	1,56

Na figura 4.10 é ilustrada a distribuição da irradiância ao longo do porta amostras. De acordo com a tabela anterior, para um diâmetro de 120 mm centrado na posição 7 do porta amostras, a variação da irradiância é de aproximadamente 2%.

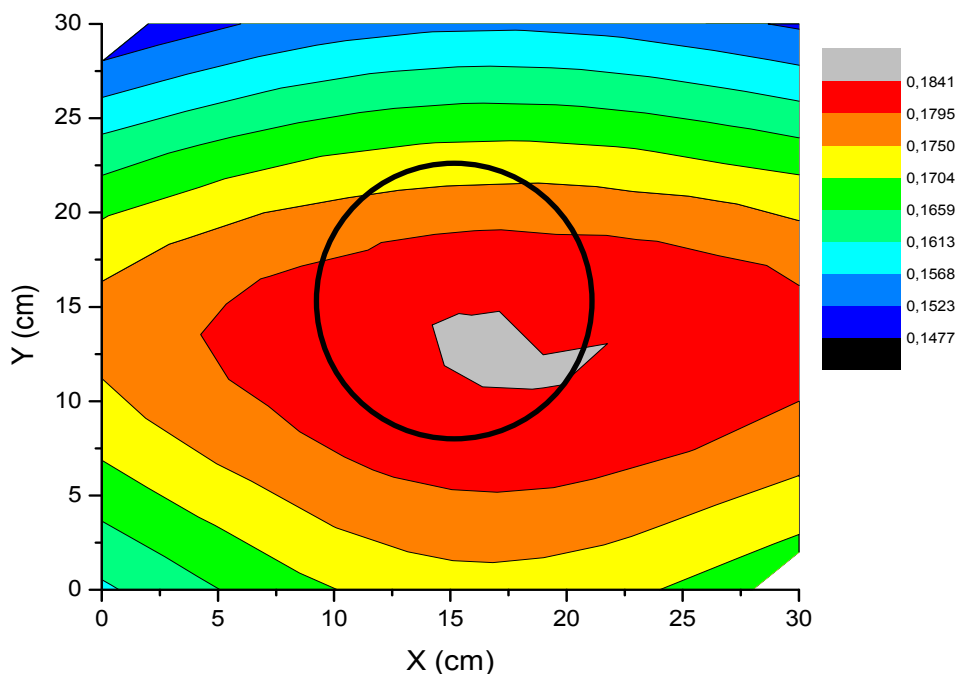


Figura 4. 10 - Distribuição da irradiância no porta amostras a uma distância de 1000 mm à fonte.

Na figura 4.11 é apresentado um gráfico tridimensional da distribuição da irradiância ao longo do porta amostras.

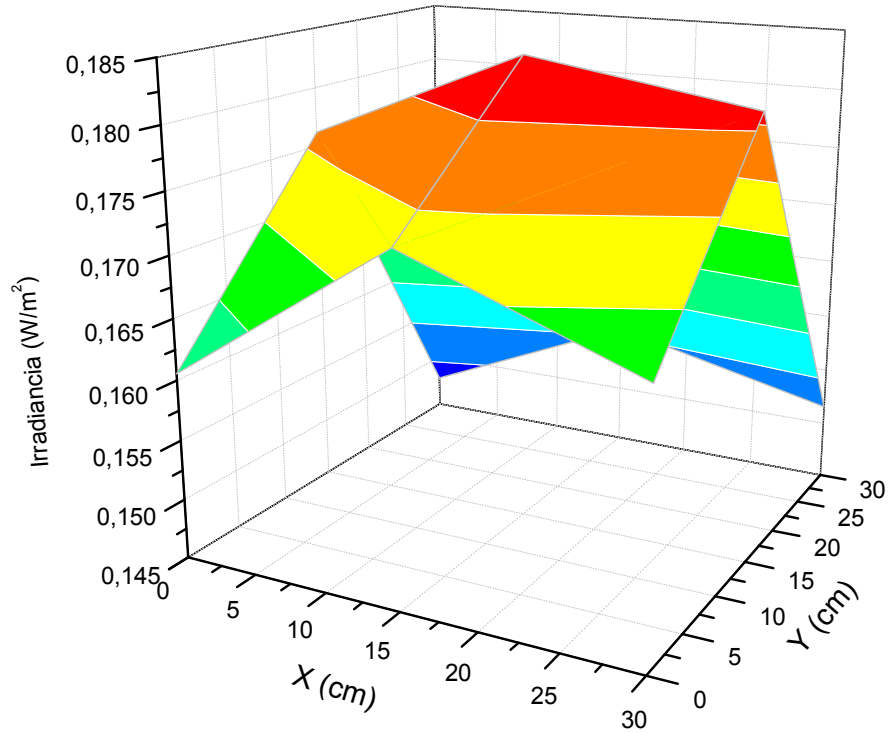


Figura 4. 11 - Gráfico tridimensional da distribuição da Irradiância no porta amostras a 1000mm à fonte.

Na posição considerada como base de estudo deste tipo de sistemas, podemos verificar a existência de uma distribuição da radiação praticamente de forma homogênea ao longo do suporte de amostras.

1700 mm

Na tabela 4.6 são apresentados os valores experimentais da irradiância para as diferentes posições do sensor de radiação no porta amostras.

Tabela 4. 6 – Valores da Irradiância para as diferentes posições.

Distância à lâmpada (m)	Posição	I (W/m ²)	Varição em relação a P7(%)
1,700 ± 0,001	1	0,073 ± 0,010	25,81
1,700 ± 0,001	2	0,077 ± 0,011	21,47
1,700 ± 0,001	3	0,076 ± 0,010	22,61
1,700 ± 0,001	4	0,085 ± 0,010	13,06
1,700 ± 0,001	5	0,086 ± 0,005	12,35
1,700 ± 0,001	6	0,086 ± 0,013	12,27
1,700 ± 0,001	7	0,098 ± 0,004	0,00
1,700 ± 0,001	8	0,092 ± 0,004	5,69
1,700 ± 0,001	9	0,088 ± 0,006	10,21

Na figura 4.12 é ilustrada a distribuição da irradiância ao longo do porta amostras. De acordo com a tabela anterior, para um diâmetro de 120 mm centrado na posição 7 do porta amostras, a variação da irradiância é de aproximadamente 3%.

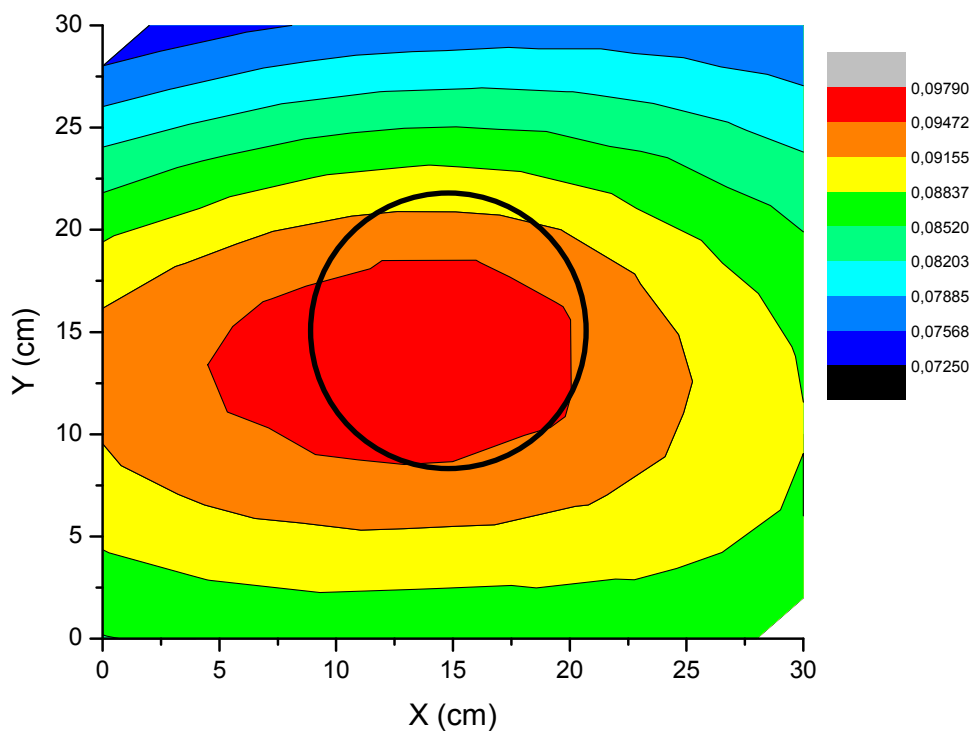


Figura 4. 12 - Distribuição da irradiância no porta amostras para uma distância de 1700 mm à fonte.

Na figura 4.13 é apresentado um gráfico tridimensional da distribuição da irradiância ao longo do porta amostras.

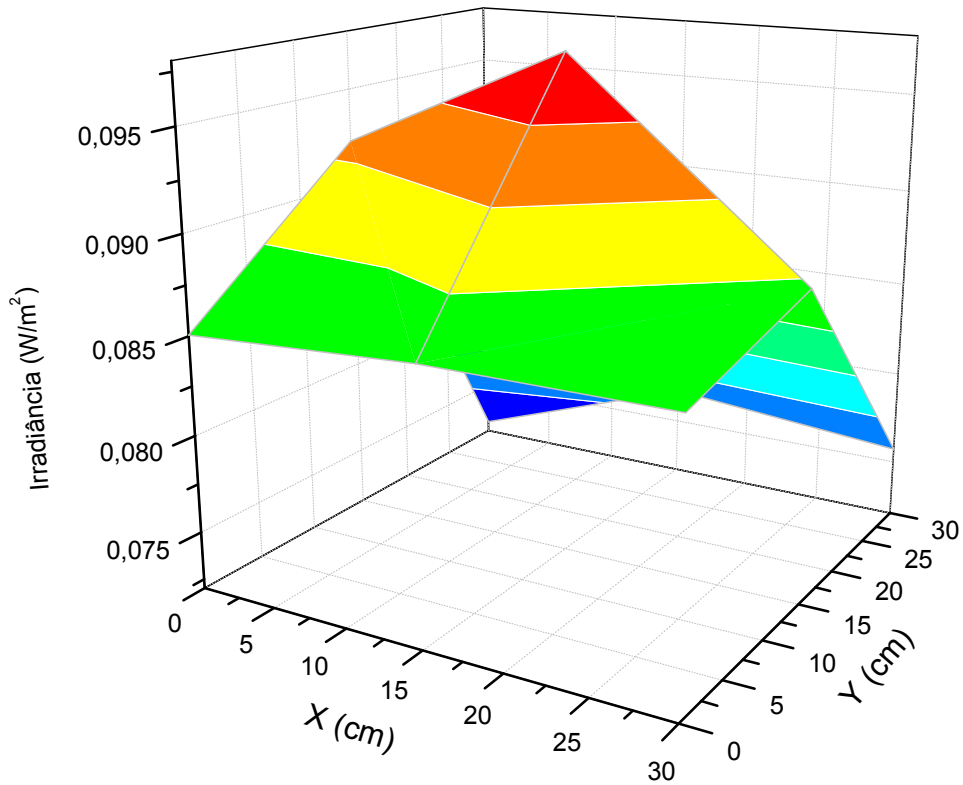


Figura 4. 13 - Gráfico tridimensional da distribuição da Irradiância no porta amostras a 1700mm à fonte.

Para a distância máxima possível neste sistema, é possível verificar que os valores da irradiância são muito baixos, sendo que na posição central o valor é o mais elevado.

Analisando os dados obtidos para as diferentes distâncias à lâmpada, pode-se concluir que o diâmetro útil (onde a variação de irradiância é inferior a 5%) tem o seu máximo na distância de 1000 mm, tal como está ilustrado na figura 4.14.

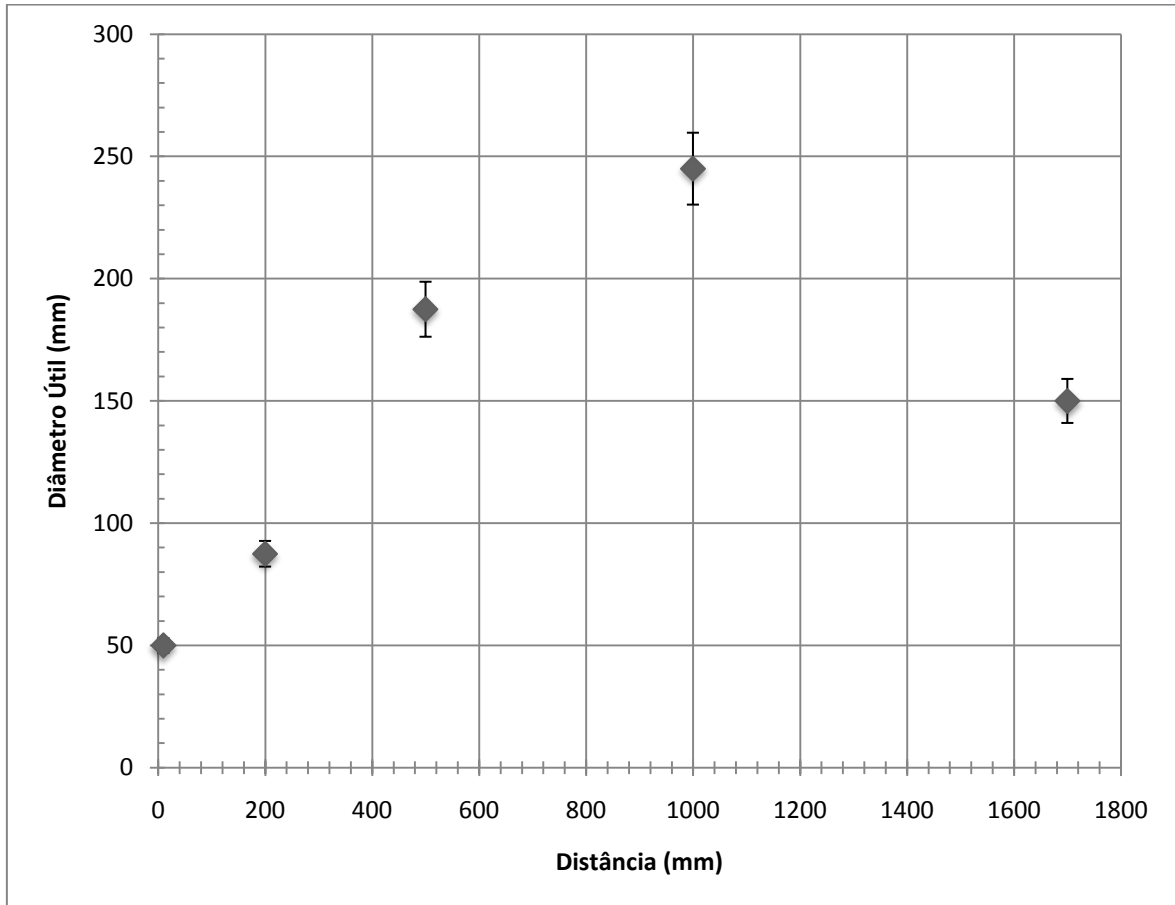


Figura 4. 14- Diâmetro útil em função da distancia à lâmpada.

4.3. Teste 3 – Distribuição da irradiância em função do tempo de exposição.

Neste teste do sistema pretende-se verificar a existência do transitório que se observa desde que se liga a lâmpada. De acordo com a figura 3.9, a lâmpada tem o seu máximo de emissão quando atinge os 40°C. Até atingir esta temperatura, observa-se um crescimento gradual da irradiância. A curva da irradiância em função do tempo ocorrido com a fonte UV-C ligada é ilustrada na figura 4.15. Esta curva é comum a todas as lâmpadas germicidas, sendo que o valor da irradiância e o tempo ocorrido até à estabilização dependem do tipo de balastro e da lâmpada utilizada. Este tempo pode variar entre poucos segundos e alguns minutos.

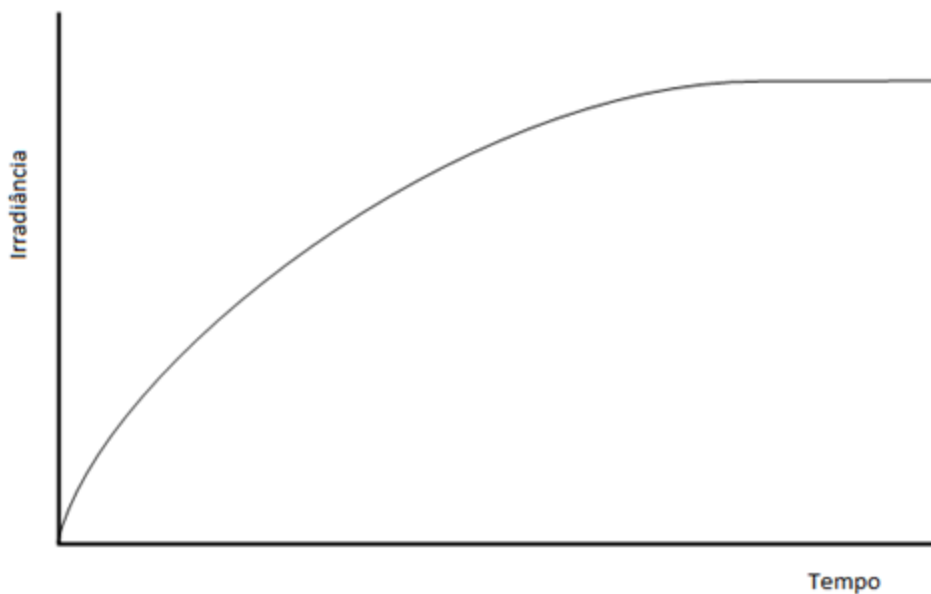


Figura 4. 15 - Curva da Irradiância em função do tempo ocorrido com a fonte de luz UV-C ligada.

Analisando a figura 4.15, verifica-se que a partir de um determinado tempo (que depende directamente da lâmpada utilizada), depois de acender a lâmpada, a irradiância estabiliza. Isto significa que a lâmpada atingiu a temperatura óptima.

Neste teste pretende-se comprovar a existência desta curva e confirmar assim que a lâmpada atinge a temperatura óptima de funcionamento. Na figura 4.16 é apresentada a curva da irradiância para uma distância de 1000 mm.

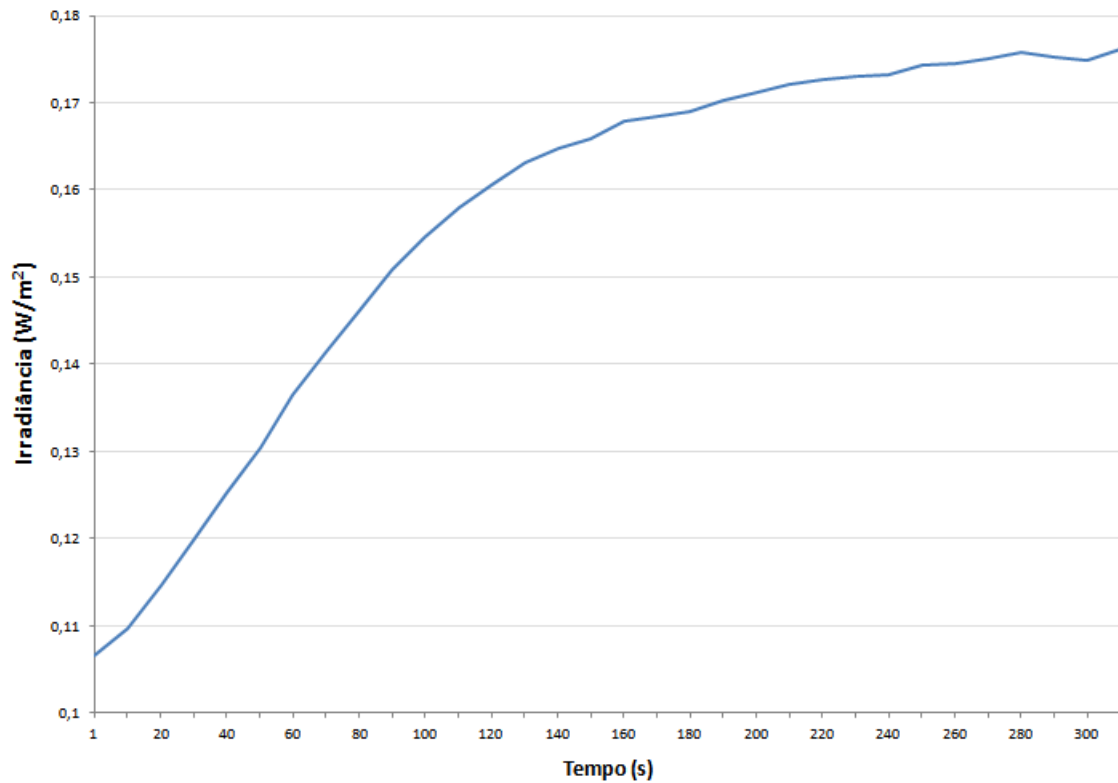


Figura 4. 16 - Curva experimental obtida para uma distância de 1000 mm à fonte.

Analisando a curva obtida, verifica-se um crescimento gradual do valor da irradiância, estabilizando por volta do valor $0,175 \text{ W/m}^2$. Esta estabilização é conseguida cerca de 240 segundos após se acender a lâmpada.

Comparando com a curva esperada, pode verificar-se que a lâmpada demora algum tempo a atingir a temperatura óptima, estabilizando quando atinge esse valor. A curva da irradiância em função do tempo é semelhante à esperada e pode-se concluir que a lâmpada está em pleno funcionamento.

Capítulo 5. Conclusões

5.1. Conclusões e trabalhos futuros.

Foi desenvolvido um sistema de irradiação de amostras biológicas com radiação Ultravioleta-C, que fornece valores de Irradiância entre 0,07 e 70 W/m². Depois de construído, foram realizados três testes específicos de forma a verificar a variação da irradiância em função da distância à fonte, a variação da irradiância em função da posição do sensor de radiação e finalmente a variação da irradiância em função do tempo de exposição.

A irradiância na região central do porta amostras segue o comportamento experimental esperado, com uma variação percentual média de 10%. A reflexão nas superfícies do armário está na origem dos desvios observados. Analisando os dados para distâncias superiores a 1000 mm, verifica-se que a irradiância diminui com o aumento da distância à fonte, sendo no entanto uma diminuição menos gradual do que a expectável. Este desvio dos valores pode estar também relacionado com as reflexões nas superfícies, que resultam num valor de irradiância superior ao esperado. O valor calculado para a potência UV-C da lâmpada utilizada é próximo do valor esperado, sendo que a variação é de cerca de 15%.

No que diz respeito à distribuição da radiação ao longo da superfície do porta amostras, esta assemelha-se à distribuição de uma superfície cilíndrica virtual centrada na fonte de luz. Analisando os resultados experimentais, a distribuição da radiação ao longo do porta amostras é uniforme, sendo que num diâmetro de cerca de 120 mm posicionado no centro do porta amostras, a variação de radiação não excede 5%.

A irradiância emitida varia no tempo após se ligar a lâmpada Ultravioleta, facto que se atribui à estabilização da temperatura no tubo da lâmpada, a uma temperatura de cerca de 40°C. Comparando a curva obtida para uma distância de 1000 mm com a curva esperada, pode-se verificar a semelhança entre elas e concluir que a lâmpada está em pleno funcionamento.

O sistema desenvolvido apresenta robustez mecânica e segurança na operação. No entanto, é merecedor de algumas melhorias futuras. De entre outras, destacam-se: a cobertura das superfícies internas do armário com camada anti-reflexo para se evitar o efeito da radiação reflectida; a substituição do sistema de cabos de aço para elevação do porta amostras por correia de transmissão; a construção de um sistema de controlo de temperatura numa gama de 0-100 °C para permitir a realização de testes a diferentes temperaturas e a

introdução de um sensor de radiação interno para monitorizar a irradiância em tempo real, durante os ensaios.

Uma outra sugestão consiste na substituição do sistema de elevação do porta amostras por um sistema de focagem da luz proveniente da lâmpada. Um conjunto de lentes e espelhos com um sistema mecânico de ajuste do foco que permite alterar a área de exposição à radiação evitando alterar a distância à lâmpada.

Finalmente, pode-se concluir que os objectivos deste trabalho foram atingidos, desenvolvendo-se assim um sistema robusto, fiável e seguro. Os resultados dos testes permitem concluir que a lâmpada Ultravioleta está em perfeito funcionamento, bem como todos os instrumentos necessários à manipulação do sistema. Obteve-se assim um sistema que se pode revelar importante no estudo da radiação Ultravioleta-C em amostras biológicas.

Referências bibliográficas

- [1] Bernhard G.; Booth, C. R.; Ebrahimian, J. C.; *Comparison of UV irradiance measurements at Summit, Greenland; Barrow, Alaska; and South Pole, Antarctica*. Biospherical Instruments, San Diego, USA, 2008
- [2] Valer, M.; Begum, S. L.; Leong, A. D. et al; *Effect of germicidal UVC light on fungi isolated from grapes and raisins*. University of Lleida, Av Alcalde Rovira Roure, 2007
- [3] Coelho, M.; *Estudo do efeito da radiação UV em filmes de DNA com intercalante*. Tese de Mestrado em Engenharia Biomédica, Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008
- [4] Willy J. M., (Ph.D). *Ultraviolet Light in Water and Wastewater*. LEWIS PUBLISHERS. E.U.A., 2002
- [5] Vecchia, P. Et al; *Protecting Workers from Ultraviolet Radiation. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*. ICNIRP 14/2007
- [6] Kundu, L.M.; *Investigation of UVC Induced DNA Damage Formation and Photolyase Catalyzed Repair of Cyclobutane Pyrimidine Dimers*. Hooghly, West Bengal, India, 2005
- [7] Britt, A. B.; *Repair of DNA Damage Induced by Ultraviolet Radiation*. Section of Plant Biology, University of California, Davis, California. 1995
- [8] Eisberg, R.; Resnick, R.; *Física Quântica - Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas*. Elsevier Editora Lda. Rio de Janeiro, Brasil, 1979
- [9] Hecht, E.; *Óptica*. 2ªedição. Serviço de Educação e Bolsas, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. Abril, 2002.
- [10] *Ionizing Radiation*. Argonne National Laboratory, EVS. Human Health Fact Sheet, August 2005
- [11] Aquafine Corporation, 11:42 de 17 de Janeiro de 2011, <<http://www.chlorineremoval.com/uvtechnology/index.shtm> >
- [12] Araujo, T. S.; Souza, S. O.; *Protetores solares e os efeitos da radiação ultravioleta*; Scientia Plena, Vol. 4, Num. 11, Brasil, 2008
- [13] Ravanat, J.; Douki, T.; Cadet, J.; *Direct and indirect effects of UV radiation on DNA and its components*. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 63, 2001
- [14] Kowalski, W.; *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- [15] Corrêa, M. P.; *Índice ultravioleta: avaliações e aplicações*. São Paulo, Brasil. Junho 2003
- [16] Campos, L. S.; *Entender a Bioquímica*. 4ªed. Escolar Editora. Lisboa 2005

- [17] Montagner, S. ; Costa, A.; *Bases biomoleculares do fotoenvelhecimento*. Anais Brasileiros de Dermatologia, Vol.84 Num.3, Rio de Janeiro, Julho 2009
- [18] Philips; UV Disinfection - Application Information; *Perfection Preserved by the purest of light*. 2004
- [19] Sleight, P.A.; Beggs, C.B.; *A quantitative method for evaluating the germicidal effect of upper room UV fields*. Journal of Aerosol Science, 2002
- [20] Alexandre, F. e tal; *Avaliação da eficiência da radiação ultravioleta na esterilização de embalagens plásticas*. Brasil, 2008
- [21] Maruga, J. et al; *Kinetics of the photocatalytic disinfection of Escherichia coli suspensions*. Applied Catalysis B: Environmental 82, 2008
- [22] Unluturk, S. Et al; *Modeling inactivation kinetics of liquid egg white exposed to UV-C irradiation*. International Journal of Food Microbiology. Turquia, 2010
- [23] Clark M.; *E. coli bacteria: what are they, where did they come from, and why are some so dangerous?*. Seattle, E.U.A., 2011
- [24] RSPortugal, *O Catálogo – Outubro 2009*. Espanha, 2009
- [25] Bahnfleth, W.; *Annual Simulation of in-duct ultraviolet germicidal irradiation system performance*. Eleventh International IBPSA Conference. Escócia, Julho, 2009
- [26] *Apêndice - O Tubo de Geiger – Müller*; Física Nuclear e Partículas <https://woc.uc.pt/fisica/getFile.do?tipo=2&id=1271>
- [27] Lin, C.; *Excitation out of Metastable Levels of Atoms*. University of Wisconsin Atomic Collisions Group. E.U.A., 2008
- [28] Philips; *The power to purify water and air with light – Philips purification lamps and drivers, protecting our world*. Holanda, Novembro, 2008
- [29] Agência Portuguesa do Ambiente. *Relatório do Estado do Ambiente 1999 – Camada de Ozono*. 1999
- [30] Pollet Water Group. *Catálogo de preços de tratamentos de água 2008/2009 – Capítulo 7.Ultra-Violeta*. Sintra, 2008
- [31] California Air Resources Board; *Facts about ozone and health overview of the harmful health effects of ground level ozone*. California Environmental Protection Agency. E.U.A. 2008
- [32] Datasheet da Lâmpada Philips TUV PL-S 5W/2P 1CT
- [33] Philips; *Appareillages pour Tubes Fluorescents*

Anexos

1 – Doses de inativação para alguns microrganismos

Tabela 1 – Doses (J/m^2) para uma inativação de 90% da população inicial exposta a uma radiação UV-C de comprimento de onda de 254nm e respectivas constantes de inativação k (m^2/J)

Bacteria	Dose	k	Yeasts	Dose	k
Bacillus anthracis	45.2	0.051	Bakers' yeast	39	0.060
B. megatherium sp. (spores)	27.3	0.084	Brewers' yeast	33	0.070
B. megatherium sp. (veg.)	13.0	0.178	Common yeast cake	60	0.038
B. paratyphosus	32.0	0.072	Saccharomyces cerevisiae	60	0.038
B. subtilis	71.0	0.032	Saccharomyces ellipsoideus	60	0.038
B. subtilis spores	120.0	0.019	Saccharomyces sp.	80	0.029
Campylobacter jejuni	11.0	0.209			
Clostridium tetani	120.0	0.019	Mould spores		
Corynebacterium diptheriae	33.7	0.069	Aspergillus flavus	600	0.003
Dysentery bacilli	22.0	0.105	Aspergillus glaucus	440	0.004
Eberthella typhosa	21.4	0.108	Aspergillus niger	1320	0.0014
Escherichia coli	30.0	0.077	Mucor racemosus A	170	0.013
Klebsiella terrifani	26.0	0.089	Mucor racemosus B	170	0.013
Legionella pneumophila	9.0	0.256	Oospora lactis	50	0.046
Micrococcus candidus	60.5	0.038	Penicillium digitatum	440	0.004
Micrococcus sphaeroides	100.0	0.023	Penicillium expansum	130	0.018
Mycobacterium tuberculosis	60.0	0.038	Penicillium roqueforti	130	0.018
Neisseria catarrhalis	44.0	0.053	Rhizopus nigricans	1110	0.002
Phytomonas tumefaciens	44.0	0.053			
Pseudomonas aeruginosa	55.0	0.042	Virus		
Pseudomonas fluorescens	35.0	0.065	Hepatitis A	73	0.032
Proteus vulgaris	26.4	0.086	Influenza virus	36	0.064
Salmonella enteritidis	40.0	0.058	MS-2 Coliphase	186	0.012
Salmonella paratyphi	32.0	0.072	Polio virus	58	0.040
Salmonella typhimurium	80.0	0.029	Rotavirus	81	0.028
Sarcina lutea	197.0	0.012			
Serratia marcescens	24.2	0.095	Protozoa		
Shigella paradysenteriae	16.3	0.141	Cryptosporidium parvum	25	0.092
Shigella sonnei	30.0	0.077	Giardia lamblia	11	0.209
Spirillum rubrum	44.0	0.053			
Staphylococcus albus	18.4	0.126	Algae		
Staphylococcus aureus	26.0	0.086	Blue Green	3000	0.0008
Streptococcus faecalis	44.0	0.052	Chlorella vulgaris	120	0.019
Streptococcus hemoliticus	21.6	0.106			
Streptococcus lactus	61.5	0.037			
Streptococcus viridans	20.0	0.115			
S.entertidis	40.0	0.057			
Vibrio cholerae (V.comma)	35.0	0.066			
Yersinia enterocolitica	11.0	0.209			

2 – Lista do material utilizado

Tabela 2 – Listagem de todo o material utilizado para o desenvolvimento do sistema. É apresentado o preço unitário e a quantidade, bem como o preço final.

Tipo	Preço Unitário	Qtd.	SubTotal
Contador	42,70 €	1	42,70 €
Relé	57,86 €	1	57,86 €
Interruptores	1,71 €	1	1,71 €
	1,55 €	2	3,10 €
Parafusos	7,97 €	1	7,97 €
	10,86 €	1	10,86 €
Separadores	4,05 €	1	4,05 €
Fim de curso	4,43 €	2	8,86 €
	0,71 €	1	0,71 €
Suportes para interruptores	2,05 €	1	2,05 €
	3,93 €	1	3,93 €
Botões inversores momentâneos	3,27 €	1	3,27 €
Chupa-solda	18,10 €	1	18,10 €
Potenciómetro	5,48 €	1	5,48 €
Controlo para potenciómetro	1,03 €	1	1,03 €
Sinalização de lâmpada UV	17,46 €	1	17,46 €
Rodas	2,20 €	2	4,40 €
Armário	70,00 €	1	70,00 €
Perfis de guia	20,59 €	4	82,36 €
Chumaceiras de suporte de eixo	7,07 €	2	14,14 €
Eixos	20,57 €	1	20,57 €
Anilhas e porcas	3,00 €	1	3,00 €
Sensor de temperatura	11,85 €	1	11,85 €
Cabo para sensor de temperatura	5,00 €	1	5,00 €
Parafusos para cabo de aço	2,00 €	4	8,00 €
Cabo de aço	5,00 €	1	5,00 €
Polias	5,00 €	2	10,00 €
Caixa da unidade de controlo	54,00 €	1	54,00 €
Exaustor	20,00 €	1	20,00 €
Fusíveis	0,25 €	30	7,50 €

Porta fusíveis	1,10 €	5	5,50 €
Termómetro	49,29 €	1	49,29 €
Lâmpada UV-C	18,90 €	1	18,90€
Balastro electromagnético	20,00€	1	20,00 €
Porta amostras	40,00 €	1	40,00 €
Silicone	9,00 €	1	9,00 €
Casquilho	2 €	1	2 €
Passa fios	2 €	1	2 €
Braçadeiras	0,5 €	10	5 €
Cabos eléctricos	5,00 €	1	5,00 €
Conectores	1,00 €	30	30,00 €
Solda	1,00 €	1	1,00 €
Fonte de tensão	50,00 €	1	50,00 €
Resistências	5,00 €	1	5,00 €
Rodas do suporte	2,00 €	4	8,00 €
Suportes para chumaceiras	4,00 €	2	8,00 €
Mão-de-obra	1,00 €	360	360,00 €
Motor elevador	45,00 €	1	65,00 €
Outros consumiveis	10,00 €	1	10,00 €

Total = 1.178,9 €
