



Universidade de Aveiro
Ano de 2019

Departamento de Engenharia Mecânica

Luís Pedro
Rocha Pina

Piezoelétricos para limpeza de sistemas de
tratamento de água



**Luís Pedro
Rocha Pina**

**Piezoelétricos para limpeza de sistemas de
tratamento de água**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Victor Neto, professor do Departamento de Engenharia Mecânica e sob a coorientação científica da Doutora Paula Maria Vilarinho, professora do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos

UID/SEM/00481/2019-FCT – FCT –
Fundação para a Ciência e a
Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 –
Programa Operacional Regional do
Centro (Centro2020), através do
Portugal 2020 e do Fundo Europeu
de Desenvolvimento Regional

Dedicatória

Dedico este trabalho a toda a minha família que sempre de tudo fez para me proporcionar as melhores condições diariamente para o meu desenvolvimento como estudante ao longo dos anos e à minha namorada pelo incansável apoio e paciência ao longo desta jornada.

O júri

Presidente

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutora Paula Celeste da Silva Ferreira
Investigadora e coordenadora do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Co-Orientadora

Prof. Doutora Paula Maria Lousada Silveirinha Vilarinho
Professora Associada do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao professor Doutor Victor Fernando Santos Neto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, pela orientação e ideias para ajudar no projeto.

À professora Doutora Paula Maria Lousada Silveirinha Vilarinho e à professora Doutora Maria Elisabete Jorge Vieira Costa do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, pela orientação ao longo de vários meses e pela disponibilidade sempre prestada no auxílio da realização deste projeto.

Ao meu colega Rui Pereira, do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica, por toda a ajuda e apoio prestado na realização deste projeto, bem como à partilha de conhecimentos e sugestões para as soluções do trabalho.

Ao engenheiro Sérgio Salustio pela proposta apresentada e por me ter dado a oportunidade de poder participar num projeto para a indústria.

À Doutora Alexandra Gonçalves da Bosch Termotecnologia por todo o acompanhamento prestado ao longo de vários meses, pela gestão de trabalho e pelas tarefas a realizar.

Ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão por todo o apoio e incentivo que sempre foi dado, desde iniciado o percurso académico.

Aos meus colegas que sempre estiveram presentes em vários momentos de todo o curso comigo e me ajudaram em diversas ocasiões.

À minha namorada Rita Marques Castro por me ter apoiado e incentivado até aqui e por toda a paciência do mundo que sempre teve comigo.

palavras-chave

Piezoelétricos, Ultrassom, Água, Materiais, Biofilme, Sensor ótico, Membrana de Ultrafiltração, Limpeza de superfícies, Cavitação, Vibração

resumo

Este trabalho realizado vai de encontro a uma necessidade de implementação de novas soluções por parte da empresa Bosch Termotecnologia, que procura novas formas de proceder à limpeza de sistemas de tratamento de água, recorrendo a materiais piezoelétricos. Estes, apresentam uma grande reciprocidade entre a energia mecânica e elétrica, o que lhes permite ter várias áreas de aplicação. A sua sensibilidade e eficiência faz deste um material importante como opção para o seu uso em atuadores, sensores e transdutores nos aparelhos de ultrassom.

Nesse sentido, foram entregues dois casos de estudos para avaliar possíveis soluções de forma a serem inseridas no sistema pretendido.

O primeiro caso de estudo é um casing de um sensor ótico e o segundo é uma membrana de ultrafiltração. Ambos irão ser utilizados num sistema que tem como propósito a purificação de água e como tal, é necessária uma limpeza regular devido ao aparecimento de biofilme nas suas superfícies.

Começou por ser feito um estudo de soluções existentes para a limpeza de superfícies e em simultâneo, foi-se avaliando uma possível incorporação dessas mesmas medidas no atual sistema. É sabido que os equipamentos ultrassónicos têm na sua constituição materiais piezoelétricos e como tal, foram feitos ensaios experimentais em amostras com biofilme de modo a perceber a facilidade com que estes organismos aderem a superfícies e que condições é que têm de ser impostas de modo a conseguir removê-las. De seguida, foram criadas as condições propícias ao desenvolvimento destas bactérias nos dois casos de estudo de modo a se conseguir testar diretamente o efeito ultrassónico na superfície real. Após validado o conceito e por recurso a um sistema CAD, começou por se fazer ajustes nas atuais peças envolventes do projeto de modo a conseguir incorporar um sistema capaz de fazer a limpeza ultrassónica sempre que solicitado, finalizando assim o presente trabalho com uma proposta de implementação de algumas medidas contra o aparecimento do biofilme nas superfícies dos casos de estudo.

Em jeito de conclusão, foi demonstrada a viabilidade de incorporação de dois equipamentos ultrassónicos em ambos os casos de estudo. sendo que um deles se encontra posicionado em frente ao casing do sensor ótico, enquanto que o outro se encontra preso a uma haste que se move verticalmente, sob ordens de um controlador, de modo a que a limpeza seja feita no interior da membrana em toda a sua profundidade.

keywords

Piezoelectrics, Ultrasound, Water, Materials, Biofilm, Optical Sensor, Ultrafiltration Membrane, Cleaning surfaces, Cavitation, Vibration.

abstract

This dissertation develops new approaches to water treatment cleansing systems using piezoelectric materials to be implemented by Bosch Termotecnologia. Piezoelectric materials function efficiently with mechanical and electrical energies, so they are implied in several areas. Their sensitivity and efficiency make them an excellent option to be used in actuators, sensors, transducers and ultrasound devices.

To find solutions to be applied in water treatment systems two case studies were carried out. The first case study is an optical sensor casing and the second one is an ultrafiltration membrane. Both are to be used to purify water in the system, as such regular cleaning is required due to the appearance of biofilm on their surfaces.

Initially, a study of current surface cleaning approaches was made to evaluate the possible incorporation of these into Bosch's system. Experimental tests using ultrasonic equipment were conducted to understand how biofilm behaved and what conditions must be imposed in order to remove them after testing the ultrasonic effect on biofilm surface. After validating this idea, a CAD system was used, adjustments were made to this dissertation in order to incorporate a system capable of ultrasonic cleaning whenever requested. Therefore, this work proposes the implementation of some measures against the appearance of biofilm on the surfaces of the case studies.

In conclusion, it was demonstrated the feasibility of incorporating two ultrasonic equipment in both case studies. One of which is positioned in front of the optical sensor casing, while the other is attached to a vertically moving rod, under the orders of a controller, so that cleaning can be done inside the membrane throughout.

Índice de conteúdos

Índice de conteúdos.....	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
1. Enquadramento	1
1.1. Levantamento do problema e necessidade de implementação de soluções	1
1.2. Proposta apresentada e delineamento dos objetivos	2
1.3. Guia de leitura da dissertação.....	3
2. Estado de Arte: Revisão bibliográfica	4
2.1. Biofilme: Caracterização	4
2.1.1. Definição de biofilme	4
2.1.2. Processo de criação e proliferação do biofilme.....	5
2.1.3. Estrutura e composição do biofilme	7
2.2. Materiais Piezoelétricos.....	8
2.2.1. Fundamentos das propriedades dos materiais funcionais.....	9
2.2.2. Efeito piezoelétrico e coeficiente piezoelétrico	15
2.2.3. Exemplos de alguns piezoelétricos existentes.....	17
2.2.4. Tipos de atuadores.....	20
2.3. Ultrassons.....	22
2.3.1. Fenómeno do ultrassom	22
2.3.2. Geração de ultrassons.....	23
2.3.3. Soluções e tipos de ultrassons.....	24
2.4. Cavitação.....	28
2.4.1. Contextualização do conceito.....	28
2.4.2. Descrição do fenómeno de cavitação	29
2.4.3. Tipos de cavitação.....	30
3. Pré-proposta de soluções aos casos de estudo.....	31
3.1. Caso de estudo I – Sensor Ótico	31
3.2. Caso de estudo II - Membrana de Ultrafiltração	33
3.3. Pré-Proposta	35
4. Ensaio e procedimento experimental.....	37
4.1. Estudo laboratorial	38
4.1.1. Testes realizados em laboratório.....	38
4.2. Imagens do microscópio (lupa)	44

4.3.	Criação de condições para formação de biofilme nos casos de estudo	47
4.4.	Aplicação do método ultrassónico no caso de estudo – casing do sensor ótico	51
4.4.1.	Ponta ultrassónica Hielscher	51
4.4.2.	Ponta ultrassónica comercial.....	53
5.	Discussão de resultados.....	57
5.1.	Disposição equivalente do sensor ótico e da membrana de ultrafiltração	58
5.2.	Proposta para limpeza de biofilme no sensor ótico – caso de estudo I	62
5.3.	Proposta para limpeza na membrana de ultrafiltração – caso de estudo II	66
5.4.	Montagem do circuito final e explicação do seu modo de funcionamento	69
5.5.	Balanço final das propostas	73
6.	Conclusão.....	76
7.	Trabalhos Futuros.....	78
8.	Referências	80
9.	Anexos	82

Índice de Figuras

Figura 1: Processo de criação do biofilme (retirado de [2])	7
Figura 2: Polarização por ação de um campo elétrico: a) domínios orientados aleatoriamente; b) orientação dos domínios numa determinada direção por via de ação de um campo elétrico (retirado de [8])	10
Figura 3: Curva de polarização de materiais piezoelétricos (retirado de [9])	11
Figura 4: Classificação de materiais com base no grupo de pontos de simetria, (adaptado de [10])	13
Figura 5: Ilustração do efeito piezoelétrico: a) Efeito Piezoelétrico direto; b) Efeito Piezoelétrico inverso (retirado de [13]).....	16
Figura 6: Ilustração de um atuador bimorfo (retirado de [19]).....	20
Figura 7: Forças e deslocamentos de atuadores de multicamada (retirado de [19]).....	21
Figura 8: Gama de frequências sonoras (retirado de [20])	22
Figura 9: Processador ultrassónico UP50H (retirado de [21])	25
Figura 10: Processadores ultrassónicos (retirado de [22])	26
Figura 11: Tanque de ultrassons (retirado de [23]).....	27
Figura 12: Banho ultrassónico SW 6H (retirado de [24])	27
Figura 13: Representação do casing do sensor ótico: a) casing do sensor; b) componente eletrónica do sensor.....	31
Figura 14: Ilustração das zonas onde se acumula o biofilme	32
Figura 15: Representação da membrana de ultrafiltração.....	33
Figura 16: Casing da membrana de ultrafiltração.....	34
Figura 17: Filtro de polipropileno.....	37
Figura 18: Amostras do filtro de polipropileno com presença de biofilme	38
Figura 19: Banho ultrassónico SW 6H (retirado de [24])	39
Figura 20: Ponta ultrassónica da marca Hielscher (retirado de [28])	40
Figura 21: Colocação da amostra de biofilme presente no filtro de polipropileno para ser estudada no ultrassom.....	41
Figura 22: Inserção da amostra de biofilme dentro do gobelé com água	42
Figura 23: Registo das amostras do filtro de polipropileno com a presença de biofilme após serem limpas, num intervalo de tempo	43
Figura 24: Amostra do filtro de polipropileno a 1 cm do raio de ação do ultrassom	44
Figura 25: Amostra do filtro de polipropileno a 2 cm do raio de ação do ultrassom	45
Figura 26: Amostra do filtro de polipropileno a 3 cm do raio de ação do ultrassom	45
Figura 27: Amostra do filtro de polipropileno a 1 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês.....	46
Figura 28: Amostra do filtro de polipropileno a 2 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês.....	46

Figura 29: Amostra do filtro de polipropileno a 3 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês.....	47
Figura 30: Representação do sensor de ótico completo após 1 semana em água limpa .	48
Figura 31: Superfície do sensor coberta de biofilme	49
Figura 32: Todas as amostras com presença de biofilme	49
Figura 33: Representação da membrana de ultrafiltração: a) Antes da criação de condições para a formação de biofilme; b) Após a criação das condições para a formação de biofilme	50
Figura 34: Pinça a segurar o casing do sensor ótico para a limpeza ultrassónica	51
Figura 35: Ponta ultrassónica introduzida no gobelé com água para libertar as ondas	52
Figura 36: Casing do sensor ótico após a limpeza	52
Figura 37: Vista de cima da diferença dos dois casings que não foram limpos (esquerda e direita) e o que foi (meio)	53
Figura 38: Vista de cima da diferença dos dois casings que não foram limpos (esquerda e direita) e o que foi (meio).	53
Figura 39: Especificações da ponta ultrassónica (retirado de [29])	54
Figura 40: Ponta American Piezo (retirado de [29]).....	55
Figura 41: Colocação da ponta ultrassónica da american piezo.....	56
Figura 42: Objeto do caso de estudo I – casing do sensor ótico	58
Figura 43: Objeto do caso de estudo II – Membrana de Ultrafiltração.....	59
Figura 44: Casing da membrana de ultrafiltração.....	59
Figura 45: Tampa que completa o casing da membrana de ultrafiltração	60
Figura 46: Ilustração do conjunto de todas as peças do sistema	60
Figura 47: Desenho explodido da combinação de todas as peças envolvidas no sistema	61
Figura 48: Conjunto final montado: Disposição equivalente do sistema	61
Figura 49: Ponta ultrassónica idêntica à que foi utilizada	63
Figura 50: Re design das peças e incorporação do casing do sensor ótico	64
Figura 51: Colocação da ponta ultrassónica na outra extremidade	64
Figura 52: Colocação do suporte da ponta ultrassónica na tampa	65
Figura 53: Colocação do suporte da ponta ultrassónica na tampa	65
Figura 54: Aparelho ultrassónico preso a uma haste de suporte.....	68
Figura 55: Equipamento colocado com o sonotrodo voltado para cima introduzido no casing	68
Figura 56: Representação do suporte do aparelho ultrassónico com haste extensível	69
Figura 57: Resultado final da montagem de todo o circuito bem como a caixa de proteção envolvente	70

Índice de Tabelas

Tabela 1: Propriedades de materiais piezoelétricos (adaptada de [15])	18
---	----

1. Enquadramento

1.1. Levantamento do problema e necessidade de implementação de soluções

A Bosch é uma empresa alemã que se encontra presente em Portugal desde 1911, onde é atualmente, uma das empresas mais reconhecidas do país. Com o foco na inovação, a Bosch Termotecnologia, situada em Cacia (região de Aveiro), desenvolve e produz soluções de aquecimento, de água quente, sensores e multimédia automóvel e sistemas de segurança e comunicação.

O tema abordado nesta dissertação surge como uma nova área que está a surgir dentro da empresa Bosch Termotecnologia, que é o de tratamento de água e, como tal, requer que seja feito um estudo e desenvolvimento de um projeto para uma dada aplicação concreta dando também oportunidade a quem a faz de vivenciar um pouco da experiência de poder trabalhar com uma empresa e ao mesmo tempo apelar ao seu espírito pragmático e direcional.

A problemática que está por de trás deste projeto prende-se com a acumulação de biofilmes e outro tipo de sujidades que residem em equipamentos de tratamento de água e outros componentes. Com o decorrer do tempo, certos equipamentos que estão constantemente em contacto com a água, acabam por criar as condições propícias para que certas bactérias se depositem neles, o que pode, para além de comprometer a fiabilidade desses equipamentos, prejudicar a saúde humana caso a água envolvida seja usada para consumo.

Alguns exemplos de equipamentos envolvidos são as lâmpadas/LED UV, que apresentando biofilme ou outro tipo de sujidade perdem a sua eficiência da radiação pelo simples facto de possuírem partículas nas suas superfícies que bloqueiam as principais funções que as mesmas pretendem desempenhar. Outro dos componentes que também é fortemente afetado por este problema são os sensores, que estando integrados em sistemas, perdem parte da sua funcionalidade onde não se obtém o mesmo tipo de resposta comparando a outros que estejam limpos. Também os filtros são uma grande fonte de acumulação de biofilme, o que por sua vez faz com que percam parte da sua eficiência na filtragem de certas substâncias podendo passar a ser um foco de contaminação para o equipamento onde este está presente.

1.2. Proposta apresentada e delineamento dos objetivos

Pelas informações que foram transmitidas pela Bosch, o que se pretende fazer é chegar à conceção de um produto que mais tarde virá a ser comercializado para poder estar presente em habitações. A ideia consiste nesse produto (máquina) estar ligado ao sistema de água da própria habitação e quando for necessário usá-lo, este irá passar pelo seu interior onde terá um sistema capaz de fazer a filtração e o devido tratamento para que a água saia com melhor qualidade possível. Por de trás de um sistema complexo como o do atual projeto, existem vários mecanismos e circuitos complexos que não são o alvo de estudo. A única parte ativa que é tida em conta para o desenvolvimento do atual projeto centra-se apenas e só na da leitura da qualidade da água que chega numa primeira fase e de seguida segue para um sistema de filtração.

Na primeira abordagem que houve com a empresa para ser feito o enquadramento deste trabalho e a definição dos objetivos, foram dadas 3 componentes distintas com graus de importâncias diferentes para a realização deste trabalho.

O primeiro, e com maior importância, foi um sensor ótico de turbidez que efetua a medição da qualidade da água quando esta passa entre os seus medidores. Este sensor é constituído por um fotodiodo que emite uma luz com o LED e do lado oposto há um recetor que faz uma leitura da informação que chegou. Caso a luz chegue com menos intensidade em relação à que foi emitida, então significa que existe presença de biofilme ou outra sujidade, por mais pequena que esta seja, nas paredes do sensor ótico. Quando isto ocorre, significa que é necessário proceder à limpeza do casing do sensor.

O segundo componente dado foi uma membrana de ultrafiltração, envolvido num casing que tem uma entrada e saída própria para a água, que tem como objetivo, como o próprio nome indica, filtrar qualquer tipo de partículas que até ali tenha chegado. A passagem contínua de água pela membrana de ultrafiltração acaba por levar à criação e crescimento de uma comunidade microbiótica, que por sua vez dificulta a filtração devido à saturação das fibras que compõem o filtro.

Por último, foi mencionada uma terceira componente, membrana de osmose inversa que, desde logo, se considerou que seria uma parte muito ambiciosa a ter em conta devido ao facto de ser bastante compacto e de também ter que ser feito num curto espaço de tempo. Assim, ficou decidido que, optando pelas outras duas primeiras abordagens, que esta apenas serviria para fazer um estudo parcial caso houvesse tempo e para lançar alguma sugestão para num futuro próximo dar inícios a trabalhos com vista a proceder à sua limpeza.

Por fim, é importante de salientar que todas as sugestões dadas e material fornecido pela Bosch foi com o intuito de que o projeto fosse desenvolvido atendendo a uma eventual construção futura do protótipo, para validação do conceito.

Posto isto, com base nas componentes que foram atribuídas pela Bosch e conforme o título do projeto indica, pretende-se que a limpeza do sistema de tratamento de água seja feita com base em materiais piezoelétricos. Nos próximos capítulos serão apresentados alguns estudos feitos de possíveis soluções que poderão ser adaptados para poderem ser enquadrados no projeto.

1.3. Guia de leitura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos, sendo que o primeiro que se encontra a ser apresentado, o enquadramento do trabalho, detalha a problemática envolvida, a proposta apresentada e o delineamento dos objetivos para o trabalho.

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, onde estão apresentados os conceitos associados aos materiais piezoelétricos, suas propriedades, sua estrutura e os que são mais utilizados nestas áreas da limpeza de superfícies. É para além disso, também feito um estudo das soluções presentes no mercado de outro tipo de equipamentos que tenham por base o funcionamento e integração de materiais piezoelétricos, como é, por exemplo, o caso de equipamentos com ultrassons.

No capítulo 3 é feita uma pré-proposta de soluções aos casos de estudo, com base em informações recolhidas do capítulo anterior. Nessa pré-proposta é incluída a explicação do que é pretendido fazer e de que forma o capítulo seguinte, o 4, ajudará nessa prova de conceito para posteriormente fazer-se a recolha de toda a informação e elaborar a proposta final.

No capítulo 4 são apresentados os ensaios experimentais que foram realizados ao longo do trabalho para provar o conceito das propostas que foram feitas tanto para a membrana como para o sensor, para confirmar a viabilidade das soluções apresentadas.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais relativamente ao que foi apresentado no capítulo anterior, seguindo-se a proposta baseada tudo o que foi feito anteriormente.

Por fim, no capítulo 6, são, finalmente, tiradas as devidas conclusões que podem ser feitas após a realização deste trabalho, seguindo-se o capítulo 7, onde é feita uma breve referência à membrana de osmose inversa e as possibilidades a ter em consideração no futuro para eventuais novos projetos, onde esta se encontre inserida.

2. Estado de Arte: Revisão bibliográfica

Neste capítulo são abordados alguns dos tópicos de maior relevância para atingir os objetivos propostos deste projeto. A utilização de água potável é um requisito mínimo prioritário para qualquer sociedade e é uma necessidade básica para o desenvolvimento humano, para a sua saúde e bem-estar. O primeiro grande desafio com que a indústria se depara é no fornecimento de água que esteja quimicamente e microbiologicamente segura pronta para ser consumida. Quando esta sai de uma estação de tratamento já vem devidamente tratada pronta para ser consumida, mas durante a sua viagem de distribuição, a qualidade vai gradualmente diminuindo devido à elevada quantidade de processos físico-químicos e biológicos que estão envolvidos, dando origem ao aparecimento de certos organismos designados de biofilmes.

2.1. Biofilme: Caracterização

2.1.1. Definição de biofilme

O conceito de biofilme tem vindo a ser implementado e estudado em diversos trabalhos científicos nas últimas décadas e pode-se defini-lo como sendo uma comunidade biológica estruturada e dinâmica de microrganismos facilmente adaptáveis a diversas superfícies, com um elevado grau de organização. Esta comunidade é, frequentemente, composta por várias espécies que interagem entre si e com o seu ambiente podendo ser encontradas em ambientes naturais, clínicos ou industriais. [1]

Maior parte das vezes associa-se o termo de biofilme a superfícies húmidas, mas na verdade estes podem desenvolver-se em qualquer tipo de meio, seja biótico ou abiótico, ou seja, podem estar incluídos em alimentos, plantas e animais ou nouro tipo de ambiente que inclui fatores como o solo, a água, atmosfera e radiações. Esta polivalência dos microrganismos se poderem formar e adaptar a qualquer superfície faz com que sejam designadas de bactérias ubiqüitárias.

Quanto à tipologia dos biofilmes, estes podem ser classificados quanto à sua origem como sendo naturais ou sintéticos. Os naturais são os que acabam por se formar a partir da junção de vários microrganismos que estão dispostas pelas superfícies e quando estas substâncias estão em soluções aquosas com incidência solar, desencadeia uma reação nesses organismos que os torna capaz de utilizar essa radiação como fonte de alimento necessária para o seu desenvolvimento e crescimento. Por outro lado, existem os biofilmes sintéticos, que são criados a partir de polissacarídeos ou proteínas. [2]

Quando este complexo e dinâmico ecossistema microbiano se desenvolve num sistema de tratamento de águas, torna-se num grave problema neste tipo indústria que afeta a qualidade microbiológica da água fornecida levando ao aparecimento de substâncias impróprias na água a distribuir. O termo “*biofouling*” refere-se à indesejável acumulação de matéria biótica e tem vindo a ser provada ao longo do tempo a sua relevância e o impacto que tem não só a nível de higiene e operacional para sistemas de distribuição de água potável, como também para sistemas de abastecimento da mesma. Esta presença de biofilme constitui um dos atuais riscos que afetam a qualidade microbiológica do produto e que pode levar a uma série de efeitos indesejáveis sobre a qualidade da água. De salientar que pelo facto do biofilme ser composto por inúmeras espécies de organismos que interagem entre si (comunidade) podem também arrastar consigo diversas doenças que acabam por ser transmitidas pela própria água. Embora ainda não haja uma forma única de acabar com esta problemática, alguns produtos têm vindo a ser utilizados como desinfetantes para combaterem este problema, como é o caso do cloro. [3]

2.1.2. Processo de criação e proliferação do biofilme

O processo de criação de biofilme é o resultado de um conjunto de eventos sequenciais. Esta formação é iniciada através de um colonizador primário que adere a uma superfície. Este começa por se desenvolver, dando origem a pequenas colónias que sintetizam uma matriz polissacarídea (EPS) (que no fundo, é o elemento-chave para manter os organismos todos juntos, colando-os à superfície que os envolve), que passam a atuar como substrato para a aderência de microrganismos, ou seja, os colonizadores secundários. Estes últimos podem juntar-se aos primários, ou então promovem dinamismo com outros agregados que se formam para depois aderirem ao primário. Por outras palavras, existe uma adesão de bactérias planctónicas à superfície levando, com o tempo, à subsequente proliferação e acumulação das camadas de células bacterianas, culminando na formação da comunidade microbiana, embebida numa matriz polimérica produzida por si mesma. [4]

Passando à fase da sequência de eventos que estão na origem da sua formação, é possível observar de forma mais pormenorizada cada uma delas descrita nos seguintes pontos. [4]

1. Pré-condicionamento da superfície que acabará por servir como colónia por moléculas presentes no líquido envolvente.
2. Transporte das células planctónicas do líquido para a superfície;
3. Adsorção das células à superfície;
4. Desadsorção das células reversivelmente adsorvidas;
5. Adsorção irreversível das bactérias que permaneceram na superfície;
6. Aparecimento de sinais célula-célula;
7. Transporte de substrato
8. Desencadeamento de um metabolismo que facilita a ligação entre as células e o biofilme e ajuda a excretar produtos indesejados contidos no mesmo. Esta etapa é também acompanhada pelo crescimento e replicação das células e ainda pela produção de uma matriz polimérica extracelular;
9. Remoção do biofilme

Os 9 pontos descritos anteriormente de forma mais pormenorizada podem ser divididos em 4 secções (grupos) característicos.

Começando pela 1ª secção, que apenas e só diz respeito à formação/criação do biofilme, tem que ver com a criação das condições necessárias na superfície para que se possa formar e desenvolver o biofilme nela. É englobado apenas o passo 1.

Na 2ª secção é a fase adesão que engloba os passos descritos anteriormente, de 2 a 5, e descreve o transporte e adesão dos microrganismos à superfície. Quando as células se aproximam da superfície, elas interagem umas com as outras através de diversas forças podendo estas serem de longa ou curta distância.

A 3ª secção corresponde aos passos 6 a 8 e descreve o amadurecimento e o crescimento do biofilme após à adesão na superfície. Os microrganismos colados à superfície começam a crescer e formam colónias, libertando polímeros que dão origem à formação da matriz polimérica que serve como alimento para crescerem e se unirem. [5]

A 4ª e última secção corresponde à fase da separação das células e outras componentes do biofilme. Tensões e velocidades dos fluidos podem estar na origem desta libertação das bactérias. Estas separações podem dever-se a alguns mecanismos tais como: a erosão contínua, à descamação de largas crostas de células, ou até mesmo a algumas colisões de partículas que dão origem ao “romper” das células. [2]

Na figura 1, é possível constatar de forma ilustrativa, a representação da sequência de eventos que está na origem do processo de criação do biofilme.

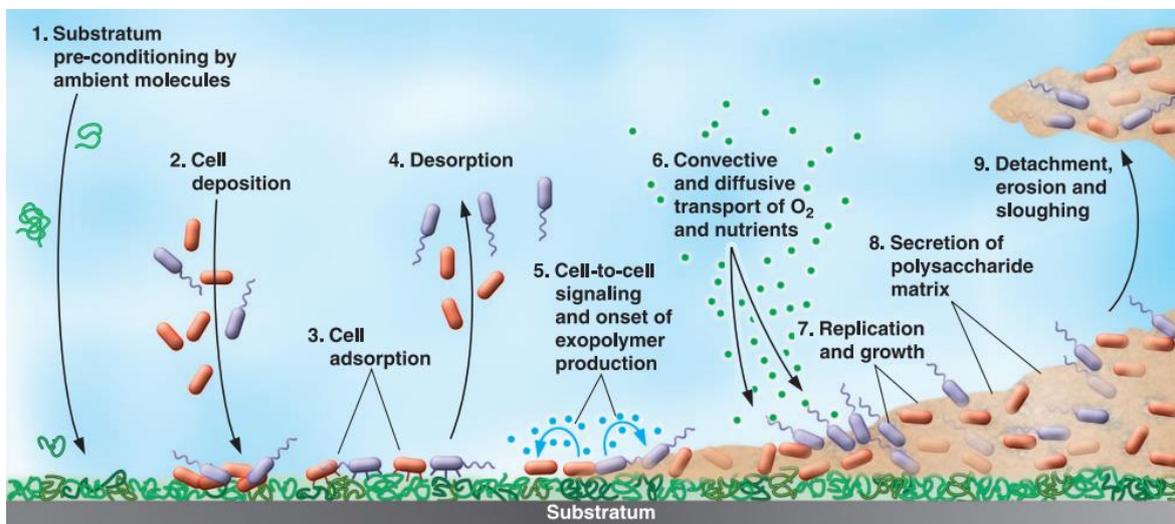


Figura 1: Processo de criação do biofilme (retirado de [2])

2.1.3. Estrutura e composição do biofilme

O conhecimento da estrutura do biofilme permite entender melhor a forma como se desenvolve e de que maneira o seu crescimento é influenciado pelas condições que o rodeiam.

A maior parte dos biofilmes ambientais são comunidades heterogêneas que possuem diferentes comportamentos dependendo das condições onde se encontram inseridos e ainda das interações metabólicas do mesmo estando em constante modificação de forma a otimizarem a utilização dos recursos que se encontram disponíveis.

A estrutura do biofilme, e por consequente o seu desenvolvimento, está relacionada com uma grande variedade de fatores capazes de desencadear reações que os permitam crescer no meio em que se encontram. Um desses fatores é a própria qualidade microbiótica da água, que vai ditar o crescimento do biofilme. A concentração da matéria orgânica e a de nutrientes presente junto às superfícies ditarão a facilidade com que estes se podem desenvolver. Outro fator importante é o tempo de estagnação da água (quanto mais tempo estagnada, mais propício é ao seu desenvolvimento), também os fatores ambientais desempenham um papel preponderante (pH, temperatura, turbidez da água e incidência solar) e por fim, e não menos importante, as características dos materiais em

contacto com a água (composição, porosidade e rugosidade) bem como o estado de conservação dos mesmos. [4]

No que diz respeito à composição do biofilme, a água é sem dúvida o maior componente representando cerca de 70 a 99%, sendo que do restante, 1 a 30%, apenas 10 a 50% são ocupados pelas bactérias enquanto que os restantes 50 a 90% estão associados à matriz polimérica e a produtos excretados pelo próprio metabolismo. O EPS é o que determina a integridade estrutural e funcional do biofilme e contribui significativamente para a organização da comunidade do biofilme. [6] É esta matriz polimérica que permite o desenvolvimento e funcionamento contínuo da estrutura tridimensional, como um gel e altamente hidratada uma vez que atua como um pilar contra tentativas de remoção do biofilme das superfícies, como antibióticos e desinfetantes, esforços mecânicos ou até mesmo predadores.

De um modo geral, é notória a importância e mesmo o impacto que uma simples comunidade microbótica tem em diversos sistemas na indústria, mais concretamente nos de tratamento de água. A procura constante em alcançar uma grande produtividade oferecendo ótima qualidade nos seus produtos está bem presente no dia a dia das empresas e estas batalham diariamente para evitar ter o aparecimento de pequenas situações como estas que à partida parecem insignificantes, mas que podem gerar alguns problemas. Para que isto seja possível é preciso identificar bem a origem do problema e combater desde muito cedo a fonte do mesmo para que não se deixe propagar.

2.2. Materiais Piezoelétricos

A definição de materiais funcionais indica a capacidade do material se poder comportar de uma determinada maneira através de um estímulo. Esta classificação está por norma relacionada com materiais cuja função está associada às suas propriedades elétricas, magnéticas e óticas. Este vasto grupo de materiais funcionais inclui materiais dielétricos, piroelétricos, ferroelétricos, piezoelétricos, que de seguida serão devidamente explicados. Embora a descoberta das propriedades destes materiais já seja conhecida há muitos anos, estes apenas se tornaram bastante úteis durante a 2ª Guerra Mundial. A utilização deste tipo de materiais reflete bem as suas propriedades únicas, tais como a polarização espontânea, a piezoelectricidade, a supercondutividade e magnetorresistência. Todas estas propriedades que lhes conferem características únicas, estão diretamente relacionadas com a sua composição química e a singularidade na estrutura cristalina.

2.2.1. Fundamentos das propriedades dos materiais funcionais

Quando um campo elétrico, E , é aplicado a um material isolador, existe um pequeno deslocamento dos centros de carga positivos e negativos para cada lado que causa o aparecimento de momentos dipolares elétricos, fazendo com que o material, assim, se polarize. Este tipo de material designa-se por dielétrico e faz parte da classe dos materiais funcionais mencionados anteriormente. Os materiais dielétricos são de uma classe de materiais com uma elevada resistência elétrica, ou seja, estes não conduzem a eletricidade devido à baixa densidade de portadores de carga livre e, por causa dessa característica, podem desempenhar funções de isolamento. Num material dielétrico a relação entre o campo elétrico, E , e a polarização, P , induzida no material, é linear e P desaparece quando E é removido. Chamam-se a estes materiais dielétricos lineares, ou seja, quando há um campo elétrico existe polarização, mas quando é retirado o campo elétrico a polarização desaparece.

A carga de superfície que se observa a partir deste fenómeno pode ser descrita pelo vetor de polarização, P [$C.m^{-2}$] de acordo com a equação 1: [7]

$$P = X * E \text{ [}C.m^{-2}\text{]} \quad (1)$$

Onde, X é o elemento do tensor de suscetibilidade dielétrica.

Quando se trata de um caso em que haja total ausência de campo elétrico e uma deformação mecânica provocar o aparecimento de polarização elétrica no material, então estes designam-se por materiais piezoelétricos. Foi no ano de 1880, que um físico francês chamado Pierre Curie, conseguiu demonstrar juntamente com o seu irmão mais velho, Jacques Curie, que era possível gerar um potencial elétrico ao comprimir cristais. Um ano mais tarde, após essa descoberta, Lippman admitiu também a possibilidade de haver o efeito contrário, algo que acabou por ser comprovado pelos irmãos Curie, ou seja, que os cristais podiam ser deformados quando submetidos a um campo elétrico.

Os materiais piezoelétricos tanto podem ser naturais como fabricados pelo Homem. O material natural mais conhecido é o quartzo, no entanto são os fabricados pelo Homem que são capazes de responder melhor às exigências impostas, sendo mais eficientes. Estes materiais são cristais análogos de quartzo, cerâmicos, polímeros e ainda compósitos. De todos estes, podem ser divididos em 32 classes de cristais, tema este que mais adiante será abordado.

Num cristal piezoelétrico existem certas regiões com uma orientação uniforme devido à sua polarização espontânea, sendo estas designadas de domínios. Quando lhes é aplicado um campo elétrico, os domínios desse material tendem a orientar-se segundo o eixo de polarização. Diz-se que o material se encontra polarizado quando o domínio se encontra na mesma direção que o campo que lhe foi imposto. Encontra-se ilustrado na figura 2, uma representação esquemática do fenómeno da polarização, que ocorre sob a ação de um campo elétrico. Esta figura ilustra 2 fases de momentos distintos: A 1ª é uma representação dos domínios polares que se encontram orientados de forma aleatória, antes da polarização. A 2ª ilustra a orientação dos domínios segunda uma determinada direção sob o efeito do campo elétrico que resultará na polarização do material. Por fim, na 3ª imagem está representado o efeito da remoção do campo elétrico e da sua polarização remanescente, em que os domínios se encontram ligeiramente orientados sob a anterior direção do campo, embora haja um certo nível de desordem. [8]

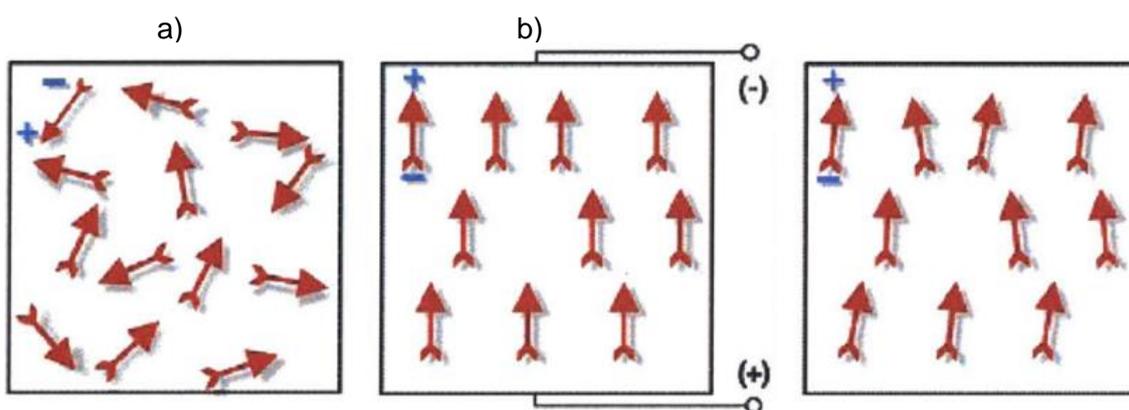


Figura 2: Polarização por ação de um campo elétrico: a) domínios orientados aleatoriamente; b) orientação dos domínios numa determinada direção por via de ação de um campo elétrico (retirado de [8])

Numa situação de ausência de campo elétrico, se os materiais apresentarem momentos dipolares por causa da assimetria da sua estrutura cristalina, exibem polarização espontânea, sendo estes designados por materiais piroelétricos. Estes encontram-se num grupo de materiais piezoelétricos que são polarizados normalmente nas condições naturais de temperatura e pressão. No entanto, o grau de polarização do material muda consoante a variação de temperatura (daí a origem do seu nome, “*piros*”, que em grego significa fogo), ou seja, quando há uma mudança de temperatura (dT), sofrem uma alteração na sua polarização espontânea (dP_s) e desta forma, é possível

descrever isso através de uma equação, onde o efeito piroelétrico, p , é dado pela razão da variação da polarização espontânea pela variação de temperatura.

Alguns dos materiais com propriedades piroelétricos têm uma característica interessante, em que a direção da sua polaridade espontânea pode ser alterada através da aplicação de um campo elétrico. Estes materiais são designados de ferroelétricos. [9] Caso a direção da polarização espontânea mude devido a uma tensão mecânica o material é chamado de ferroelástico.

A polarização elétrica nos materiais piroelétricos e ferroelétricos não varia linearmente com o campo aplicado. Para este tipo de materiais que contém dipolos elétricos, o campo elétrico local irá promover o alinhamento de dipolos numa determinada região contribuindo assim para o aumento da polarização, que, por si só, promoverá o aumento do campo local. Assim sendo, este fenómeno que ocorre irá fazer com que se alinhe o maior número possível de dipolos sob a mesma direção, resultando na já falada polarização espontânea do material. A estes materiais dá-se o nome de dielétricos não lineares. [9]

Ao serem utilizados estes materiais ferroelétricos, é importante ter em conta a relação existente entre o campo elétrico aplicado e a polarização, que é descrita pela histerese. A histerese, define-se como sendo uma tendência que uns sistemas têm em conservar as suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou. A figura 3 ilustra o comportamento de polarização de um piezoelétrico.

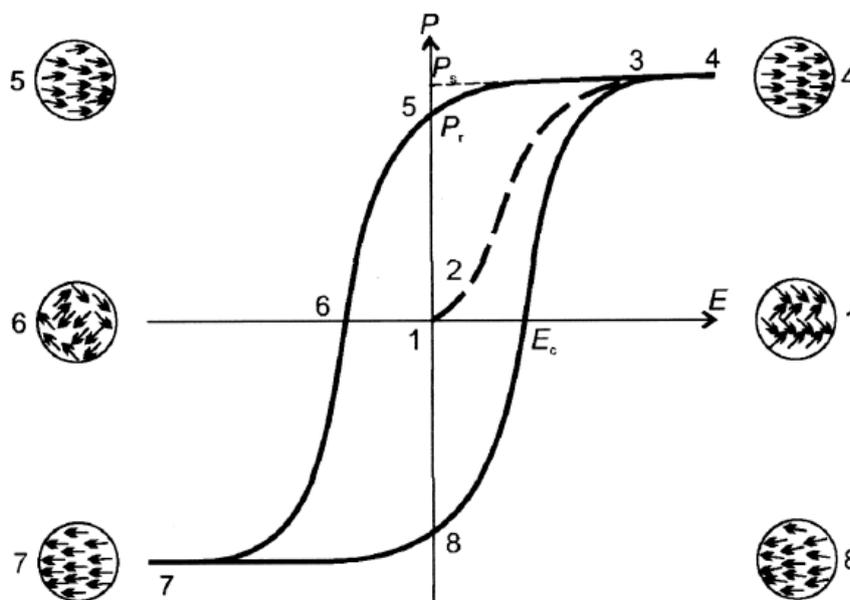


Figura 3: Curva de polarização de materiais piezoelétricos (retirado de [9])

Como referido anteriormente, o estado natural de um material piezoelétrico é caracterizado pela existência de multidomínios, dispostos aleatoriamente, que se cancelam mutuamente resultado numa polarização global nula. Quando se coloca um material piezoelétrico sob ação de um campo elétrico, os domínios, conforme já foi falado anteriormente, orientam-se numa determinada orientação que resulta no aparecimento de uma polarização. Caso esse campo elétrico seja aplicado através de pequenos valores, a polarização tem um comportamento linear, conforme se pode observar no troço 1-2 do gráfico da figura 3, no entanto, nesta fase não é possível observar um alinhamento dos domínios. Porém, com um aumento dos valores do campo elétrico, esses domínios começam a orientar-se de uma melhor forma. Esta parte pode ser observada através do troço 2-3 no gráfico, que descreve o sucedido. A partir desse ponto 3 registado no gráfico, a polarização passa a ser linear sendo este registado pelo troço 3-4, culminando nas condições de polarização de saturação (ponto 4). Estando no ponto máximo, ao ser retirado o campo elétrico variando-o, alguns dos domínios do material retomam a sua orientação que tinham inicialmente, embora o material continue polarizado. Até mesmo quando o campo elétrico é nulo existe sempre um pequeno valor que reside, ao qual é chamado de polarização remanescente que é possível observar na 3ª imagem da figura 2. Para que esse valor seja anulado, desta vez o campo elétrico terá que diminuir no sentido oposto (sentido negativo), onde numa primeira fase, o campo elétrico decresce desde o ponto 4 até ao ponto 5, cujo o eixo das ordenadas atribui um valor nulo de campo elétrico, mas para que não haja qualquer polarização remanescente, é necessário ainda outra diminuição do campo elétrico, representado do ponto 5-6, onde culminando neste último ponto atinge-se assim, uma polarização nula. Este ponto 6 da figura, designa-se por campo coercivo, E_c , e é o valor do campo que é necessário para se anular a polarização do material piezoelétrico. A partir desse ponto, qualquer que seja o aumento da amplitude do campo que lhe for aplicado, ainda no sentido negativo, levará a que haja um novo alinhamento dos domínios, representado pelo ponto 7 da figura 3. Por fim, e para que o ciclo fique completo basta que se aumente o campo elétrico aplicado até que atinja um valor nulo, representado pelo ponto 8. [9]

Quanto à estrutura cristalina dos materiais, estes podem ser divididos em cerca de 32 classes de cristal que são agrupados em sete grupos: Triclínico, monoclínico, ortorrômbico, tetragonal, trigonal, hexagonal e cúbico. Destes 32 grupos de simetria, 21 não possuem centro de simetria, sendo que 20 desses possuem propriedades piezoelétricas. Sobra apenas 1 grupo sem centro de simetria que não apresenta propriedades elétricas, por haver incompatibilidade devido a outros fatores de simetria. Dos

20 grupos de piezoelétricos, metade contém um único eixo em que o momento do dipolo está orientado sem qualquer tipo de restrição, ou seja, exibe polarização espontânea, sendo estes o grupo dos ferroelétricos. [10]

Conforme está representado na Figura 4, este diagrama expõe de forma detalhada os 32 grupos pontuais de simetria.

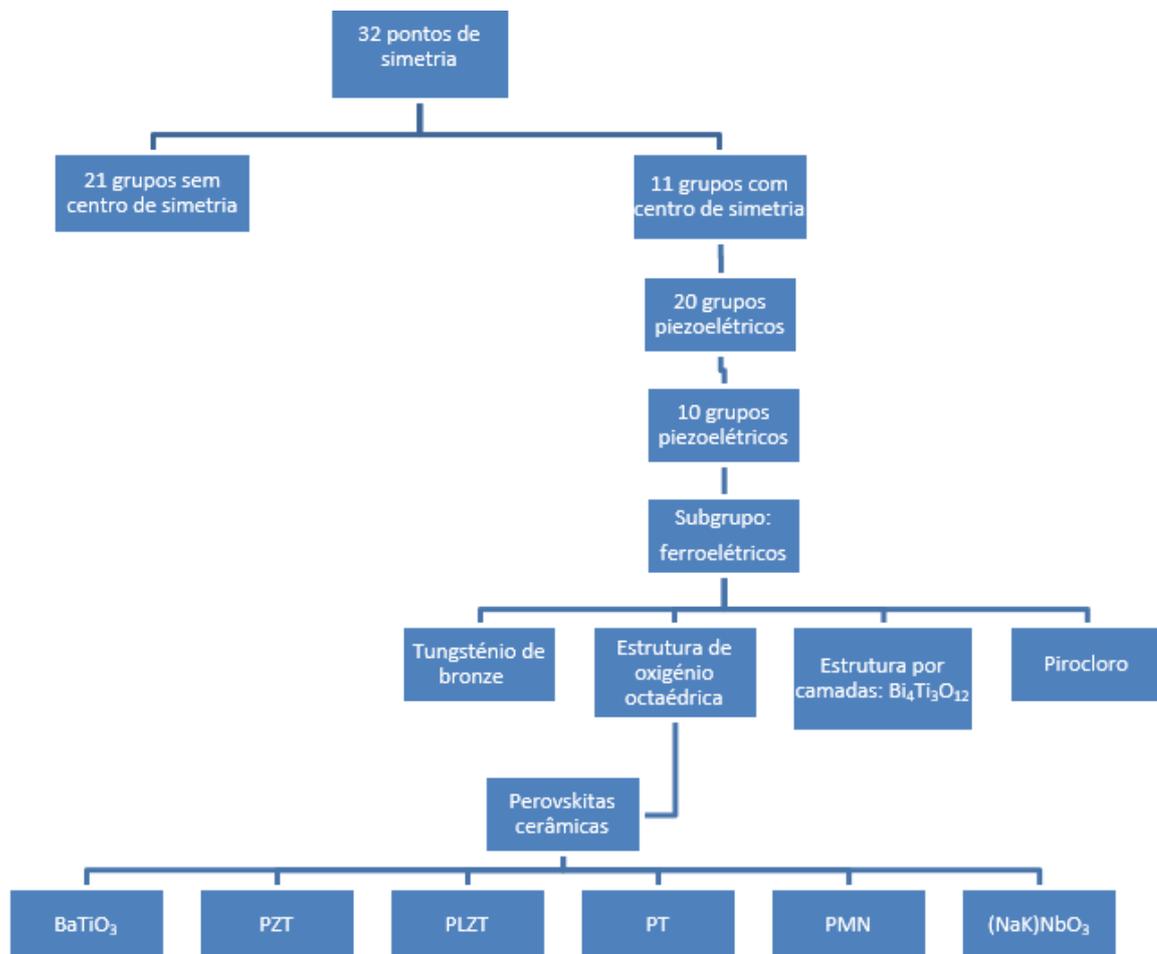


Figura 4: Classificação de materiais com base no grupo de pontos de simetria, (adaptado de [10])

Dos vários materiais apresentados na figura anterior, um dos mais conhecidos e utilizados em diversas aplicações, é o PZT. Para além deste, existem outros semelhantes com uma grande capacidade de resposta eletromecânica. O PZT, é claramente o material que lidera o mercado dos sensores modernos, atuadores e aplicações com transdutores, embora possa suscitar alguns problemas devido à presença de chumbo que pode pôr em causa a saúde humana e o meio ambiente envolvente. Os materiais PZT contêm uma grande percentagem de chumbo e são utilizados há muitos anos devido à facilidade com que se podem adquirir. No entanto, tem inerente a si uma particularidade de que pode ser perigoso em certas ocasiões caso não seja destinado a uma aplicação correta. O chumbo está incorporado no próprio material piezoelétrico e o problema é que está na estrutura e não sai de lá a não ser que seja destruída a barreira, exceto se se colocar uma chama (ou temperaturas do meio bastante elevadas) ultrapassando a temperatura de fusão. Caso isso aconteça o chumbo torna-se volátil e como é sabido, este tem relativa facilidade em se derreter. Posto isto, em termos de legislação, há sempre alguns cuidados a ter. Apesar de se estar ciente das excelentes propriedades que os materiais piezoelétricos baseados em titanato de zirconato de chumbo (PZT) têm, também se está consciente da toxicidade que o compõe. Tem havido nos últimos tempos uma consciencialização geral para o desenvolvimento de materiais isentos de chumbos e neste sentido têm sido várias as classes de materiais que têm vindo a ser exploradas e consideradas como alternativas viáveis para substituir o PZT para certas aplicações.

Atualmente, como alternativa a piezoelétricos isentos de chumbo, está a família de perovskitas. Dentro desta família, os materiais promissores: KNN, onde tem vindo a ser desenvolvido estudos sobre este material e também ainda o titanato de bário. [11]

Quando se pondera utilizar de materiais piezoelétricos, é necessário ter em consideração a temperatura de Curie (T_c). Esta temperatura define, nos piezoelétricos, uma transição de fase. O conceito da temperatura de Curie é importante estar sempre presente, porque distingue fases que se transformam umas nas outras. Quando a T_c é excedida qualquer uma destas duas fases (tetragonal e trigonal) se transforma numa outra fase que possui uma estrutura cúbica, passando assim o material a ter um centro de simetria. Este assunto é de extrema relevância, uma vez que anteriormente já foi visto que apenas os materiais que não têm um centro de simetria, possuem propriedades piezoelétricas, portanto, assim que é ultrapassado o limite da temperatura máxima (temperatura de Curie), o material deixa de evidenciar as tais propriedades piezoelétricas. Uma vez ultrapassada a temperatura, passa-se à fase cúbica (com centro de simetria), a orientação dos domínios culmina numa polarização nula.

Em termos de aplicação, uma das razões pela qual o PZT está presente em diversos aparelhos, deve-se ao facto de este ter uma facilidade de alteração da resposta elétrica através de dopantes. Diferentes composições de PZT na região morfotrópica tanto podem ser “duras” como “macias”. [12] Quanto aos materiais duros, estes possuem um elevado fator de qualidade mecânica e de campo coercivo, comparativamente aos materiais macios. Principalmente por estas razões, os materiais duros são associados à utilização em aplicações comerciais como as limpezas ultrassónicas, transdutores, sonares e soldagem ultrassónica. Já os materiais macios são utilizados em aplicações que já foram mencionadas anteriormente, como é o caso dos sensores, atuadores e geradores de baixa potência. [13]

2.2.2. Efeito piezoelétrico e coeficiente piezoelétrico

O termo piezoelectricidade tem duas formas diferentes de se poder ser associado. Existe o efeito piezoelétrico direto (*generator effect*), que é o mais conhecido, em que quando o material piezoelétrico é sujeito a uma tensão ou deformação mecânica, o mesmo tem a capacidade de poder gerar energia. Na equação 2 pode-se ver a relação existente entre a tensão que é aplicada e a resultante carga gerada. A letra “d” representa o coeficiente piezoelétrico, σ a tensão e por fim, P representa a polarização elétrica no próprio material.

$$P = d * \sigma \quad (2)$$

Para além do efeito direto, existe também o efeito piezoelétrico inverso (*motor effect*), que acaba por ser o contrário. Este efeito é caracterizado pelo facto de o material poder sofrer expansão ou contração, quando lhe é aplicado uma voltagem. A seguinte equação traduz esse efeito de conversão piezoelétrica, onde X representa a deformação e E, o campo elétrico.

$$X = d * E \quad (3)$$

A seguinte figura 5 caracteriza bem os 2 tipos de efeitos anteriormente mencionados, através da sua representação.

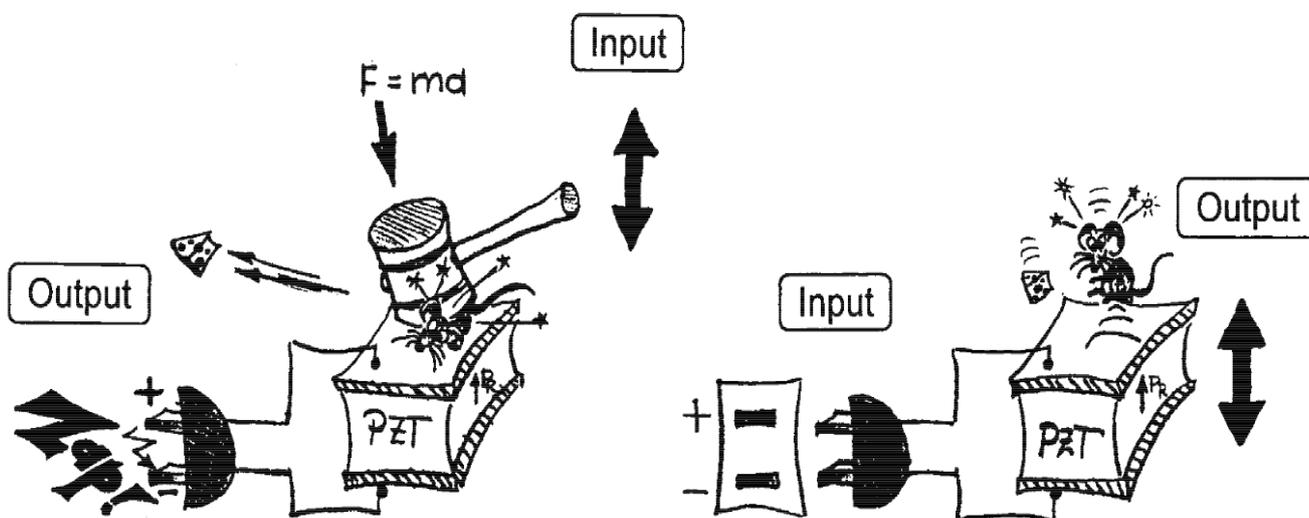


Figura 5: Ilustração do efeito piezoelétrico: a) Efeito Piezoelétrico direto; b) Efeito Piezoelétrico inverso (retirado de [13]).

Tanto no efeito piezoelétrico direto (Figura 5a) e inverso (Figura 5b), o d é o coeficiente piezoelétrico e encontra-se decomposto em duas direções: d_{ij} , em que relaciona um campo ao longo do eixo i e a tensão à direção j . No primeiro eixo, o índice “ i ” refere-se à direção de aplicação do campo elétrico. No segundo, o índice “ j ” refere-se à direção da resposta do sistema. Cada um dos eixos associa um número, sendo o 1 das abcissas (x), o 2 das ordenadas (y) e por último, o 3 da cota (z).

No caso do efeito piezoelétrico direto, o índice i , indica a direção da polarização do material, enquanto que o j , por outro lado, indica a direção de aplicação da tensão mecânica a esse mesmo material.

Em contrapartida, no efeito piezoelétrico inverso, o índice i é referente à direção do campo elétrico a que o material está sujeito e o índice j indica a direção da resposta mecânica do material. [13] Dentro dos vários coeficientes existentes, o d_{33} é o mais citado deles todos e é também o correspondente para a tensão e o campo ao longo do eixo polar. [9] Este coeficiente é desejável que seja elevado para materiais destinados a desenvolver movimento ou vibração, como o sonar ou transdutores de limpeza ultrassónica. [14]

Para além desse, existe outro parâmetro também ele muito importante para avaliar o desempenho de um piezoelétrico, que é o coeficiente de acoplamento efetivo (K_{eff}), que se trata de uma medida da quantidade de energia elétrica que é convertida em tensão e definida com: [9]

$$K_{eff}^2 = \frac{\text{energia elétrica convertida em energia mecânica}}{\text{energia elétrica}} \quad (\text{efeito direto}) \quad (4)$$

$$K_{eff}^2 = \frac{\text{energia mecânica convertida em energia elétrica}}{\text{energia elétrica}} \quad (\text{efeito inverso}) \quad (5)$$

No fundo esta é uma relação da energia mecânica armazenada e a energia elétrica aplicada e vice-versa.

Uma outra constante piezoelétrica importante é a “g”, também designada por constante de voltagem piezoelétrica, que fornece o campo produzido por uma tensão. Esta constante é dada pela razão entre o campo elétrico em circuito aberto e a tensão mecânica aplicada. [13] Uma constante g alta é desejável em materiais destinados a gerar tensões em resposta a um stress mecânico, como por exemplo, na captação fonográfica. [14]

2.2.3. Exemplos de alguns piezoelétricos existentes

Um dos materiais piezoelétricos mais conhecidos é o quartzo, no entanto existem muitos outros que também são utilizados para as mais diversas aplicações. [8] São:

- Quartzo (SiO_2): Devido à sua estrutura cristalina, o quartzo revela propriedades piezoelétricas bem acentuadas;
- Orthofosfato de gálio (GaPO_4): Tem, praticamente, a mesma estrutura cristalina que o quartzo, embora, ao contrário do quartzo, este tem de ser sintetizado;
- Titanato de Bário (BaTiO_3): Este tipo de material é muito utilizado no mundo dos materiais piezoelétricos, sendo um eletrocerâmico. É bastante utilizado em aplicações que envolvam transdutores.
- Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT). É considerado atualmente um dos materiais piezoelétricos que mais tem sido utilizado, muito por culpa de ser bastante económico apresentando excelentes propriedades piezoelétricas. Tal como foi referido anteriormente, um dos principais problemas associado a este piezoelétrico é o facto de conter na sua estrutura índices de chumbo que podem ser prejudiciais para a saúde humana.

- Óxido de Zinco (ZnO): Material que contém propriedades que inibem o crescimento de certas bactérias

Na seguinte tabela podemos ver alguns dos principais materiais piezoelétricos, alguns já mencionados anteriormente, e também ver as respectivas propriedades que os caracterizam. [15]

Tabela 1: Propriedades de materiais piezoelétricos (adaptada de [15])

Propriedade	Unidade	Quartzo	BaTiO ₃	PZT A ^b	PZT B ^b	Na _{0,5} K _{0,5} NbO ₃
Densidade	Mgm ⁻³	2,65	5,7	7,9	7,7	4,5
T _c	°C		130	315	220	420
k _p			0,38	0,56	0,66	0,45
k ₃₁			0,21	0,33	0,39	0,27
k ₃₃			0,49	0,68	0,72	0,53
k ₁₅			0,44	0,66	0,65	-
d ₃₁			-79	-119	-234	-50
d ₃₃	pC N ⁻¹		190	268	480	160
d ₁₅			270	335	-	-

Hoje em dia, existem na indústria, diversos sistemas automatizados que exigem resultados com um grau de precisão elevadíssimo com graus de grandeza que vão até aos nanômetros. Como exemplo disso existem vários sistemas, dando especial ênfase aos mecânicos, que talvez sejam os mais comuns, onde são utilizados para efetuar posicionamento de amostras, controlo de posicionamento de pontas de prova para análise e caracterização de determinados dispositivos, entre outras aplicações. Todos estes sistemas de posicionamento têm um termo que está presente e é fundamental para que tudo isto se torne possível, que são os atuadores. [16] Um atuador é um dispositivo que produz movimento, com base em certos comandos que tanto podem ser manuais ou automáticos (programados). Os atuadores, mais concretamente os piezoelétricos, podem gerar oscilações ao nível do nanómetro a altas frequências e uma das principais vantagens,

é que estes são capazes de se mover a altas cargas. Além disso, não requerem uma manutenção tão recorrente como outros tipos de atuadores, muito por culpa de não terem partes “móveis” que provocam o desgaste contínuo. [16]

Os atuadores que usam o efeito piezoelétrico têm vindo a ser comercializados ao longo dos últimos 35 anos e durante este tempo todo transformaram o mundo da precisão de movimentos e do controlo de variações de movimento. [17] Apesar das vantagens já mencionadas na utilização de materiais piezoelétricos, existem também alguns inconvenientes e limitações para esses mesmos materiais, como por exemplo, a temperatura de trabalho, diferença de potencial e tensões mecânicas a que podem ser sujeitos durante os respetivos ensaios e atuações. Essa dependência está relacionada com a composição do cerâmico que poderá causar uma despolarização do material e é com base nisso que uma das soluções para que isso não aconteça é a de formulação de novas composições que pode ser então uma solução para se ultrapassar eventuais problemas. [13].

Os atuadores piezocerâmicos conseguem níveis precisos de posicionamentos em curtos tempos de resposta, de uma forma dinâmica sob grandes forças de atuação. Foi necessário o desenvolvimento de novas soluções dos materiais piezoelétricos para que estes pudessem apresentar melhores propriedades do que aquelas que são evidenciadas nos materiais como o quartzo, turmalina, sal de Rochelle, entre muitos outros que não são tão intensos. O mais conhecido, e também já mencionado anteriormente, como sendo um desses materiais cerâmicos piezoelétricos é o Titanato Zirconato de Chumbo, também designado por PZT. Estes sistemas de movimento baseado em atuadores piezocerâmicos substituem cada vez mais tecnologias clássicas como as válvulas eletromagnéticas, atuadores pneumáticos, entre muitos outros, melhorando assim os produtos em termos de precisão e tempo de resposta. [16] [18]

De uma forma geral, os materiais piezoelétricos são muito utilizados em diversas aplicações que requerem pequenas, mas precisas variações de deslocamentos. Uma dessas utilizações é nos atuadores piezocerâmicos, que através da aplicação de uma carga de um campo elétrico, o material piezoelétrico deforma, tendo como intuito induzir uma deslocação que terá um certo propósito dependendo de qual for a sua aplicação.

Não é só de cerâmicos que são constituídos os atuadores piezoelétricos. Existem muitos outros materiais que apresentados em diferentes composições também servem para esse fim. Cada tipo de configuração que representa o atuador é diferente consoante os materiais que lhe compõe e é essa variedade de materiais que faz com que o atuador possua diferentes ordens de grandeza em termos de deslocamento.

2.2.4. Tipos de atuadores

Apesar de uma grande parte do uso comercial que é dado a atuadores ser à base de cerâmica PZT, existem certas aplicações em que é necessário um deslocamento maior do que aquele que se obtém com o PZT. Cada projeção de um atuador é feita para que este seja capaz de desempenhar determinadas tarefas e existem vários tipos que permitem deslocamentos de uma ordem de grandeza maiores que outras.

Um atuador unimorfo é constituído por uma placa de um material piezoelétrico colada a uma placa de um material inativo. [13]

Um piezoelétrico bimorfo é constituído por duas placas finas piezoelétricas polarizadas e coladas juntas. Caso numa dessas placas seja aplicada uma diferença de potencial, esta irá expandir na direção da sua espessura. Em contrapartida, ao expandir numa das direções, irá contrair nas outras duas perpendiculares ao plano, o que irá culminar numa deflexão da montagem bimorfa. [19]

De uma forma geral, quando são necessários deslocamentos maiores e onde as forças necessárias não sejam tão elevadas, o uso de atuadores bimorfos é uma ótima solução. A título ilustrativo, segue-se a figura 6, que retrata o modo de atuação de um atuador bimorfo. [19]

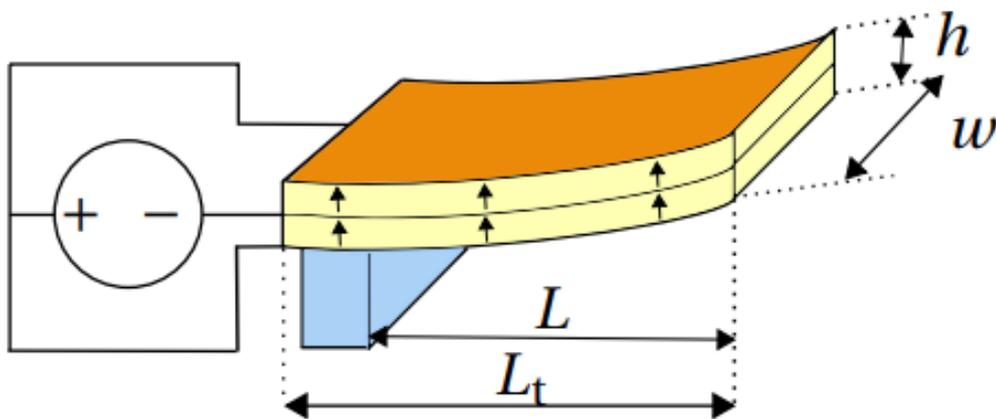


Figura 6: Ilustração de um atuador bimorfo (retirado de [19])

Por vezes, também é possível que ocorra um outro caso em que se adiciona uma terceira placa de fibra de vidro ou de carbono ao bimorfo entre as chapas piezoelétricas já existentes, passando esta montagem a designar-se de trimorfa. Esta medida reforça o atual bimorfo, sendo que ainda é possível serem adicionadas mais camadas piezoelétricas, caso se verifique necessário, de forma a melhorar as propriedades do atuador. Um exemplo onde isto se verifica, é quando se quer reforçar um maior deslocamento, embora medidas como estas tragam um custo acrescido. [19]

Já os atuadores do tipo bender pertencem a uma categoria de dispositivos flexíveis. Estes podem ser vistos sob diversas formas, como é o caso dos discos circulares.[19]

Os atuadores multicamada consegue fornecer forças mais elevadas, contudo apresentam pequenos deslocamentos comparativamente aos anteriores. O uso destes é fundamental na redução da diferença potencial de operação do piezoelétrico. Um atuador cerâmico necessita de elevados valores de campo elétrico para que possa operar corretamente, mas com a colocação de várias camadas cerâmicas piezoelétricas, consegue-se diminuir a diferença de potencial que é necessária para se gerar um determinado campo elétrico. [19]

A seguinte figura 7 mostra o campo em que se inserem estes atuadores que acabaram de ser mencionados. Os maiores deslocamentos são observados em dispositivos unimorfos e bimorfos, mas por outro lado estes não são capazes de gerar forças tão elevadas. Já os atuadores multicamada são precisamente o oposto. Estes tipos de configurações são caracterizados por apresentarem pequenos deslocamentos, mas em contrapartida são capazes de gerar forças bastante elevadas.

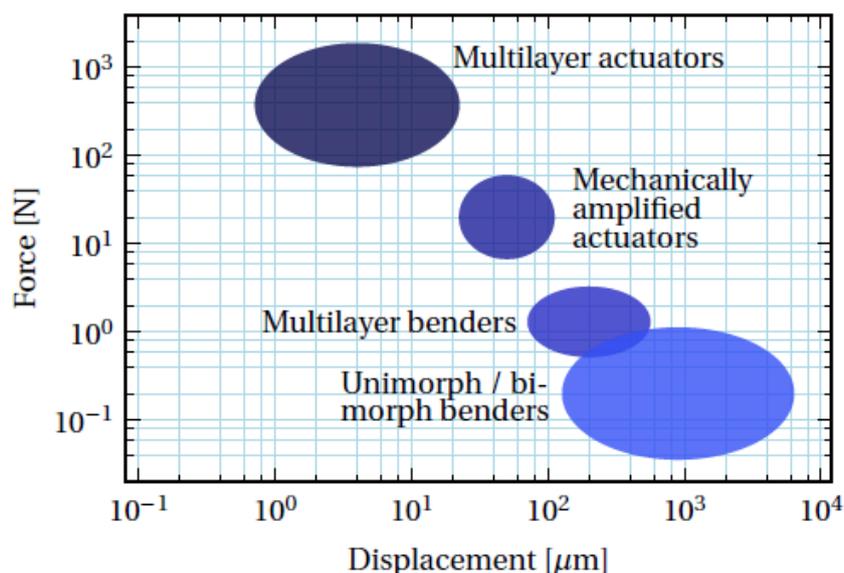


Figura 7: Forças e deslocamentos de atuadores de multicamada (retirado de [19])

2.3. Ultrassons

2.3.1. Fenómeno do ultrassom

Segundo a acústica, pode-se definir o som como sendo uma variação repentina de uma de pressão num determinado meio. Existem vários tipos de sons, podendo estes serem graves ou agudos, que por vezes podem passar por despercebidos pelo ouvido humano, não por alguma falha, mas sim por serem caracterizadas por vibrações de gamas de valores que não nos são perceptíveis.

O ultrassom é um som que é utilizado por alguns animais que têm capacidade de emitir esse tipo de ondas. Conseguem através delas, comunicar entre si, movimentarem-se e encontrar alguns obstáculos no ambiente que os rodeia. Através destas observações, foram estudadas e desenvolvidas ferramentas durante a 2ª guerra mundial, como é o caso do sonar, onde este serviu para detetar submarinos e outro tipo de barreiras sob a água e até aos dias de hoje, o campo destinado a este fenómeno tem sido amplamente explorado e utilizado em diversas áreas. O ultrassom é um som com uma frequência bastante superior à que o ser humano é capaz de ouvir. Na figura 8, encontram-se registadas as gamas de valores de frequências e o tipo de som que lhes é característico.

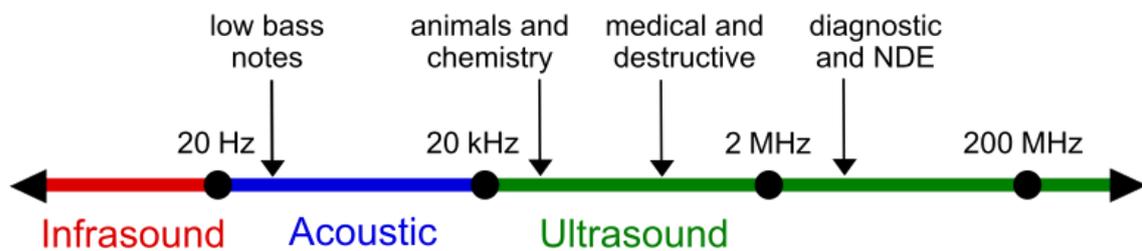


Figura 8: Gama de frequências sonoras (retirado de [20])

Como a figura 8 mostra, a verde, o ultrassom é caracterizado por estar num nível de frequência superior aos 20kHz, sendo que conforme vai aumentando essa frequência, mais formas diferentes de as aplicar aparecem. O ultrassom é usado em vários campos, sendo os de maior relevo acabam por ser os que estão relacionados com a medicina, por serem uma ferramenta importante que vai sustentando o avanço da ciência. Além disso, o ultrassom é também muito utilizado em testes não destrutivos, para detetar potenciais falhas em algumas peças, para limpar, misturar e acelerar alguns processos químicos. Por estar fora da faixa audível do ser humano, tem uma grande vantagem de poder ser utilizado sob gamas de frequências altas. O ser humano, apenas é capaz de distinguir sons que se

encontram dentro da gama que vai desde os 20Hz aos 20 000Hz, como se encontra representado na cor azul na figura 8. Abaixo dessa gama audível, encontra-se representado a vermelho, os infrassons, com baixa frequência.

Começando com uma breve referência histórica ao seu aparecimento, a partir da década de 1920, as ondas ultrassónicas passaram a ser utilizadas, quando foi inventado o transmissor de Langevin, que consistia essencialmente na junção de cristais de quartzo acoplados a eléctrodos que forneciam potenciais eléctricos alternados, gerando assim o fenómeno piezoeléctrico e emitindo ondas de ultrassom. Cerca de uma década depois, apareceram transdutores de ultrassom que rapidamente substituíram os que eram baseados em cristais de quartzo, passando a ser constituídos à base de materiais ferromagnéticos. Anos mais tarde, surgiram os primeiros transdutores baseados em materiais cerâmicos e até aos dias de hoje tem aparecido novos desenvolvimentos de transdutores para os equipamentos de ultrassom. Estes, vão sendo continuamente melhorados, através da adição de materiais cujas propriedades lhe conferem uma maior qualidade, um bom fator de acoplamento eletromecânico, que indica a eficiência na transformação de energia que é captada pelo transdutor e muitas outras propriedades que ditam uma melhoria significativa na sua eficiência.

2.3.2. Geração de ultrassons

Existem diversos tipos de aparelhos, também eles com finalidades distintas, que emitem ondas ultrassónicas e que se propagam num determinado meio. A criação destas ondas, é feita através do uso de um gerador, onde este produz um sinal eléctrico que de seguida ao chegar ao transdutor é convertido em movimento e o transdutor vibra de acordo com a frequência do sinal que recebe. Um transdutor é um dispositivo capaz de converter um determinado tipo de energia noutra, ou seja, converter energia eléctrica em mecânica e vice-versa. Estes transdutores ultrassónicos são constituídos à base de materiais piezoeléctricos, onde através da aplicação de um campo eléctrico, há a polarização das cargas eléctricas na sua rede cristalina originando deformações e tensões mecânicas que induzem o movimento. Os transdutores que são constituídos à base de materiais piezoeléctricos, para melhores desempenhos são feitos de titanato de zirconato de chumbo (PZT) e titanato de bário, podendo ainda estar presente sob outro tipo de material.

O cristal para ser usado como transdutor, deve ser cortado de forma a que um campo eléctrico alternado, quando é aplicado nele, produza variações na sua espessura. Dessa variação irá resultar um movimento nas faces do cristal, dando assim origem às

ondas sonoras. Alguns dos exemplos desses cristais que são utilizados, são o quartzo e a turmalina.

Cada transdutor possui uma frequência natural, tal que quanto menor a espessura do cristal, maior será a sua frequência de vibração. Esta vibração do transdutor irá ser transferida para o meio onde está inserido, provocando o fenômeno de cavitação.

2.3.3. Soluções e tipos de ultrassons

Conforme já foi referido, os equipamentos de ultrassons podem ser destinados a várias problemáticas, mas conseguem-se distinguir dois ramos diferentes no que diz respeito à sua utilização. Existem ultrassons que têm um fim laboratorial e outro industrial.

2.3.3.1. Soluções de ambiente laboratorial

Num ambiente mais confinado e meticuloso, os equipamentos ultrassônicos são utilizados como processadores na preparação de algumas amostras que vão para análises, como acontece no ramo da medicina, biologia e química, onde o uso do ultrassom é utilizado para isso mesmo, na homogeneização de amostras e na separação de algumas células. Ainda dentro do ramo da medicina, mais concretamente para o fim farmacêutico, o ultrassom é utilizado para a separação e extração de certas bactérias de células. Quanto à indústria alimentar, é sobretudo utilizado para processar alimentos. Os processos otimizados existentes nesta indústria, exigem uma grande agilização de processos e recorrem a alguns métodos à base de ultrassons para obterem a preparação de certos produtos. O uso de ultrassons também é importante na eliminação de algumas bactérias. A par destes casos existem muitos outros, mas aquele onde se destaca o uso de ultrassons é nas limpezas. Determinadas tarefas requerem limpezas de diferentes graus e é por isso que o uso do ultrassom é indicado pois pode regular as suas potências para limpar o que for necessário.

Em ambientes mais delicados e para pequenos volumes, existem vários equipamentos que podem ser utilizados. Alguns dos seguintes exemplos podem ser utilizados para algumas das áreas acima mencionadas.



Figura 9: Processador ultrassónico UP50H (retirado de [21])

A figura 9, mostra um exemplo de um processador ultrassónico versátil, utilizado em laboratório, para fins médicos, onde podem fazer o rompimento de células através de ondas ultrassónicas que são emitidas. A homogeneização de amostras também é uma das principais utilizações dadas a este aparelho. Este em específico, é caracterizado por ter uma potência de 50W e uma frequência de 30kHz e é um modelo que tanto pode ser utilizado manualmente como automaticamente. Uma das principais vantagens deste equipamento é que podem ser reguladas as condições de trabalho, como é o caso da frequência e da potência que se ajustam consoante o tipo de utilização que lhe é dado. Como este, existem muitos outros aparelhos semelhantes, com capacidades diferentes (frequências e potência) que se destinam a determinadas amostras. Alguns desses exemplos podem ser observados na figura 10, que mostra outros 2 diferentes tipos de aparelhos ultrassónicos de menor volume que também são utilizados em laboratórios.



Figura 10: Processadores ultrassônicos (retirado de [22])

2.3.3.2. Soluções de ambiente industrial

Contrariamente ao que se passa num laboratório, um ambiente industrial requer uma preparação um pouco diferente. As soluções utilizadas neste campo são principalmente na homogeneização de grandes quantidades de produto e na limpeza de peças, superfícies ou materiais. A homogeneização de produtos alimentares por exemplo, necessita de aparelhos idênticos aos que são utilizados em ambientes laboratoriais, mas só que de maior escala e com uma capacidade de trabalhar com grandes cadências de produto.

Para a limpeza, os equipamentos deixam de ser as pontas ultrassônicas, ilustradas nas figuras anteriores, e passam a ser usadas banheiras ou tanques ultrassônicos. Este tipo de aparelhos, são uma espécie de banheiras que contêm água e que no seu fundo têm incorporados os ultrassons. Estes banhos funcionam através de um processo chamado cavitação, na qual são formadas bolhas de ar microscópicas, num meio aquoso, que de seguida rebentam libertando uma grande quantidade de energia, que ao chegar às superfícies das peças emergidas, os resíduos são removidos. Por vezes são adicionados agentes químicos, que ajudam na aceleração da eliminação dos resíduos indesejáveis, consoante o tipo de limpeza que for necessário e o tipo de peça em questão.

Estas bolhas formadas são geradas através da propagação das ondas ultrassônicas, que agitam a água, dando assim origem à formação das bolhas e como tal,

os objetos durante o processo de limpeza não devem estar repousados na parte inferior do dispositivo pois isso impedirá que se desenvolva o fenómeno de cavitação.

Peças de máquinas, ferramentas de trabalho e objetos de grandes dimensões, são alguns dos exemplos utilizados na limpeza ultrassónica através das banheiras. Nas seguintes figuras 11 e 12, é possível observar uma banheira ultrassónica de grandes dimensões e de seguida, outra mais pequena, mas utilizada na mesma para objetos com uma dimensão considerável.



Figura 11: Tanque de ultrassons (retirado de [23])



Figura 12: Banho ultrassónico SW 6H (retirado de [24])

2.4. Cavitação

No seguimento do tema anterior onde foi feita uma referência ao fenómeno de cavitação através de equipamentos ultrassónicos, é importante explicar do que se trata concretamente, descrevendo de forma detalhada todo o seu processo.

2.4.1. Contextualização do conceito

O conceito de cavitação foi registado pela primeira vez em 1704 por Isaac Newton, mas apenas em 1873 é que realmente se percebeu e foi possível ter a descrição deste fenómeno, por Reynolds, quando fazia os seus ensaios no laboratório. Apesar de tudo, o termo cavitação só teve grande relevância quando foi aplicado na engenharia, onde se viam os efeitos causados pelas hélices de navios. Durante vários anos foram surgindo novas teorias que iam explicando melhor este conceito, levando aos aperfeiçoamentos da sua definição e por consequência a novos contributos para diferentes casos de estudo.

Um elevado interesse no domínio geral do estudo deste fenómeno foi bem evidenciado no século XX, pois esta atividade demonstra uma complexidade em si e o vasto leque de problemas que podem ser solucionados se for propositadamente provocado, com o intuito de aproveitar os efeitos para aplicações específicas.

De um modo geral, com os avanços tecnológicos da respetiva época, exigiu uma certa estimulação da exploração desta atividade para retirar o maior aproveitamento das vantagens que tem a cavitação. Uma das grandes áreas onde a cavitação é explorada é em aplicações erosivas, ou seja, as bolhas geradas no processo da sua formação são utilizadas como um meio de atingir superfícies e removerem certas impurezas. Isto é a base do funcionamento de aparelhos de limpeza ultrassónica, onde utilizam o processo da cavitação como o seu agente de limpeza de superfícies. A cavitação tem, também, uma forte capacidade de provocar agitações em fluidos e é utilizada por isso em processos industriais, para dispersar partículas que se encontram presentes em líquidos ou até mesmo de os homogeneizar.

Graças à capacidade de desintegrar microrganismos ou destruir bactérias, a utilização da cavitação tem sido recorrentemente utilizada em aplicações de natureza química e biológica. [25]

2.4.2. Descrição do fenómeno de cavitação

A cavitação é um fenómeno isotérmico, que pode ocorrer em qualquer meio líquido, em zonas onde possa haver uma diminuição local da pressão até um determinado valor crítico, sendo este designado por pressão do vapor saturado.

O fenómeno desencadeia-se quando ocorre uma diminuição local da pressão que seja suficiente para perturbar o equilíbrio dos domínios gasosos existentes no meio líquido, dando origem à formação de bolhas de cavitação. Após o surgimento destas bolhas de vapor, entram numa fase de crescimento (fase de expansão) que se deve à vaporização rápida do líquido, ou seja, o vapor existente no líquido difunde-se para a bolha.

Ao longo deste processo de crescimento, se as bolhas de vapor estiverem sujeitas a uma pressão superior ao valor crítico que corresponde à pressão do vapor saturado, o seu desenvolvimento é interrompido, iniciando-se uma fase seguinte, a da implosão da bolha, que se caracteriza pelo aumento da pressão interior da bolha, levando a que de seguida, se dê o colapso da mesma.

Em suma, para que todo este processo de formação, crescimento e colapso das bolhas de cavitação seja possível desencadear-se, são necessárias algumas condicionantes para que tudo decorra sem qualquer entrave. A primeira é a existência de núcleos gasosos que servirão como embriões das bolhas de cavitação. Outra, é, conforme já foi mencionado, a presença de uma zona de redução localizada de pressão, pois só assim será possível haver um desequilíbrio nos micro domínios gasosos, que proporcione as condições necessárias para o aparecimento das bolhas de cavitação. Por último, e não menos importante, é necessária uma interrupção da fase de expansão da bolha, através de um restabelecimento da pressão, para provocar o colapso da mesma.

Embora na descrição do processo não tenha sido mencionado, o fenómeno da cavitação tanto pode ocorrer no seio do líquido ou também, junto a uma superfície sólida e pode também manifestar-se em líquidos que se encontram em repouso ou dinâmicos.

2.4.3. Tipos de cavitação

Quando se aborda o conceito de cavitação, este pode ser dividido em quatro tipos diferentes: [26]

→ A cavitação hidrodinâmica, que resulta de uma variação de pressão num escoamento de um líquido. Este tipo de cavitação é sobretudo frequente ocorrer quando existe uma variação de velocidades do escoamento do líquido, que por vezes está associado a mudanças de geometria de condutas. Além disso, a existência de objetos que perturbem o estado do líquido, também provocam a cavitação hidrodinâmica e um exemplo onde isto é possível observar é nas hélices dos navios.

→ A cavitação ultrassónica, ao contrário da hidrodinâmica que resulta devido à variação de velocidade do escoamento, resulta devido à variação de pressão que se faz sentir no líquido através da passagem de ondas sonoras (ultrassónicas) pelo mesmo. Este tipo de cavitação é um dos modos mais recorrentes usados em ensaios laboratoriais para gerar a cavitação.

→ A cavitação ótica, é um tipo de cavitação que é produzida por fótons de alta intensidade, através do uso de um laser, onde são quebradas as ligações moleculares no líquido.

→ O último tipo de cavitação é o de partículas, que é produzido por um feixe de partículas como os neutrões e prótons, que rompem um líquido.

Dos quatro tipos de cavitação mencionados, a ultrassónica e a hidrodinâmica são as que revelam um maior interesse em termos académicos e a nível industrial, pelo simples facto de possuírem um nível de operação mais ajustado às dimensões dos materiais com que se trabalha diariamente. Em termos práticos, numa escala maior de produção e de trabalho, são as que mais se adequam e se conseguem encontrar soluções para poder trabalhar com elas.

3. Pré-proposta de soluções aos casos de estudo

Tal como já foi abordado anteriormente, o presente projeto tem como principal objetivo explorar novas soluções para resolver o problema da limpeza da membrana de ultrafiltração e do casing do sensor ótico, que irão estar instalados num sistema completo para tratamento de água. As limpezas de ambos os componentes terão que ser feitas através de algo que tenha uma base piezoelétrica.

No capítulo 2, ao longo do estado de arte, foram apresentados dados que explicam esse fenómeno da piezoelectricidade e sob que forma é que esta pode aparecer em diversas aplicações. Tendo isso em conta, nas secções que se seguem, são apresentadas as propostas para ambos os casos de estudo e o motivo que as levaram a ser escolhidas.

3.1. Caso de estudo I – Sensor Ótico

O primeiro caso de estudo trata-se de um sensor ótico de turbidez que tem como objetivo efetuar medições da qualidade da água quando esta passa entre os seus medidores. Este sensor é constituído por um fotodíodo que emite uma luz com o LED e do lado oposto há um recetor que faz uma leitura do que chegou. Caso a luz tenha chegado com menos intensidade em relação à que foi emitida, então significa que existe presença de biofilme ou outra sujidade, por mais pequena que esta seja, nas paredes exteriores do sensor ótico. Caso isto ocorra, significa que é necessário proceder à limpeza do casing que envolve o sensor para poder efetuar medições e leituras corretamente.

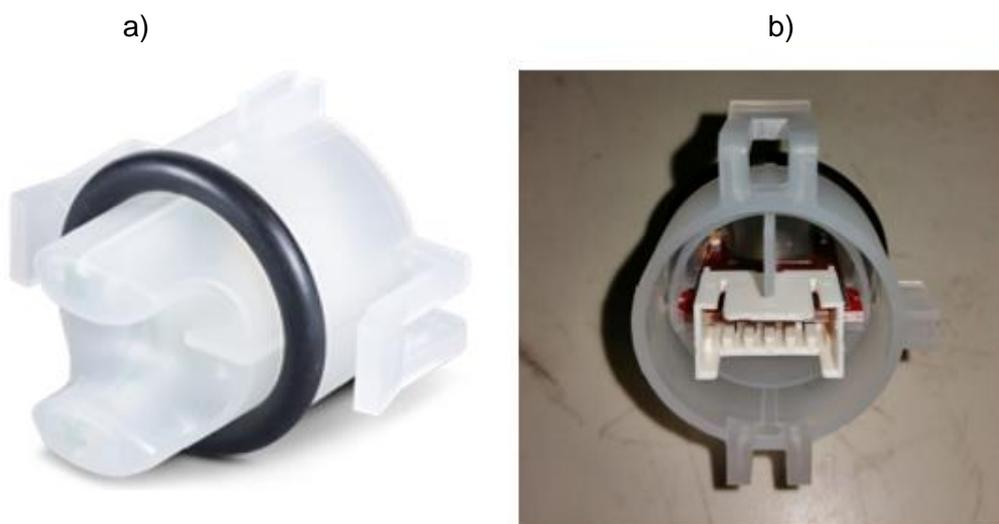


Figura 13: Representação do casing do sensor ótico: a) casing do sensor; b) componente eletrónica do sensor

Na figura 13 a) encontra-se representado o casing que envolve o sensor ótico, onde tem 2 pegas que permitem que esteja seguro de modo a poder fazer a medição da qualidade da água. A constituição deste casing é de polipropileno. A figura 13 b) mostra a parte que não é perceptível observar na figura a), onde se encontra protegida (pelo casing) a parte eletrónica que permite fazer as leituras e medições da qualidade da água.

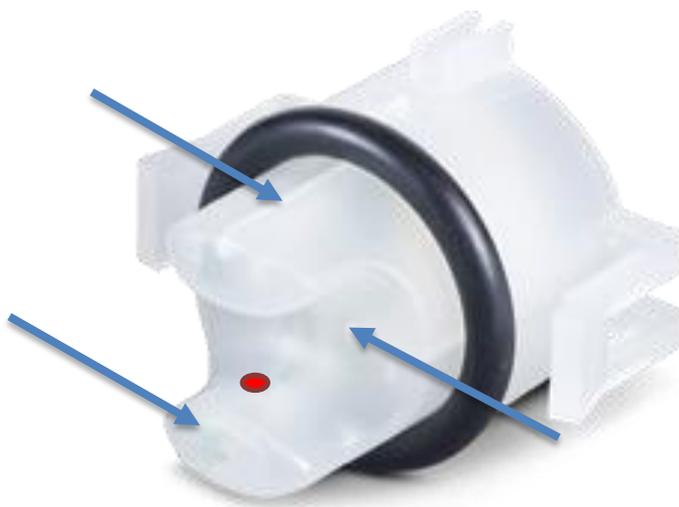


Figura 14: Ilustração das zonas onde se acumula o biofilme

Após feita a montagem de todas as peças, a parte que irá estar em contacto com a água, é toda aquela área que está depois do anel de borracha preto, representada com as setas azuis na figura 14. Essa zona é pretendida que esteja devidamente limpa para poder efetuar a medição correta da água. Representado a vermelho, é a zona onde se encontra o fotodiodo (só que na parte interior), que também existe na extremidade oposta, onde num é feita a emissão e no outro a receção/leitura.

Sabendo isto, uma das soluções que foi inicialmente pensada, era a de colocar um disco piezoelétrico na parte interior do casing, com o mesmo diâmetro, ou até mesmo de pequenas placas piezoelétricas, de forma a que encaixassem sem nenhum constrangimento. Desta forma, iriam vibrar por ação da aplicação de uma diferença de potencial, onde essa vibração acabaria por fazer com que do lado oposto o biofilme depositado nas paredes do casing se libertasse. Rapidamente, esta solução da incorporação do disco/placa, foi descartada, uma vez que não sugeria muita facilidade do acoplamento desse atuador no seu interior. O facto de o espaço ser bastante reduzido, levaria a que a variação do seu deslocamento não fosse a suficiente para conseguir atingir os objetivos pretendidos. Além do mais, a vibração teria que ser tal, de modo a surtir o efeito do lado contrário do casing e dadas as condições em que estaria colocado,

difícilmente seria possível. Não podendo colocar este atuador em contacto direto com a água teve que se abordar uma nova forma de solucionar este problema, que será apresentada numa das secções seguintes.

3.2. Caso de estudo II - Membrana de Ultrafiltração

O segundo caso de estudo trata-se de uma membrana de ultrafiltração que serve, tal como já foi referido, fazer a filtração das partículas que lá passam. Com a passagem de água, certas substâncias podem ser inconvenientes e ficam lá retidas e com o tempo, acabam por se acumular certos organismos que aderem às paredes dificultando a passagem contínua de água.

Na seguinte figura 15, encontra-se representado a membrana de ultrafiltração, onde está definida o sentido da passagem de água.



Figura 15: Representação da membrana de ultrafiltração

Antes de explicar de que forma foi inicialmente abordada esta, é importante mencionar a caixa que envolve esta membrana (casing), que lhe confere uma proteção e serve como meio de passagem de uma fase do sistema de tratamento, para o seguinte



Figura 16: Casing da membrana de ultrafiltração

Este casing que envolve a membrana contém 3 pequenas válvulas. Este pode ser observado através da figura 16. A primeira, encontra-se na tampa, que é a válvula de entrada que permite a passagem da água de um estágio anterior para o do processo de filtração. As outras duas encontram-se no fundo do casing, em que uma delas serve para fazer a passagem da água filtrada e a outra apenas é utilizada para drenar a água que contém as sujidades. Ao fim de algum tempo de uso, é necessário que o filtro seja limpo e é nesse momento que é feita uma lavagem no seu interior em que a água residual dessa lavagem não poderá ir para a válvula normal da água tratada, mas sim para a outra.

O princípio de funcionamento deste sistema requer que seja feita regularmente uma limpeza do filtro, sem que para isso seja necessário removê-lo do casing. Tendo isto em consideração, a ideia inicialmente pensada, seria a de colocar no exterior do casing, junto às paredes, pequenas placas ligadas a um sistema que ao ser ativado faria vibrar o casing de forma a que este agitasse a água no seu interior e por consequência, removesse pequenos resíduos acumulados no filtro. Para fazer esta limpeza, isto iria exigir que a água enchesse por completo o casing e que ficasse lá estagnada de forma a proporcionar uma melhor propagação das ondas por ação de uma vibração. Face às dimensões exigidas, todo este processo traria dificuldades na sua implementação pois teriam que ser incorporadas várias placas e não uma só, pois provavelmente não seria suficiente. Além disso, devido à sua forma circular do casing bem como a sua espessura, não facilitaria o acoplamento deste sistema. Assim, esta solução foi descartada.

3.3. Pré-Proposta

Face a tudo o que já foi mencionado anteriormente, acerca da revisão bibliográfica e da descrição dos materiais de ambos os casos de estudo, culminou numa fase do trabalho que requer que seja proposto algo que permita solucionar o problema conhecido. Chegou-se assim, a uma primeira proposta que passa pela colocação de mecanismos ultrassónicos em determinadas zonas do sistema que permitam fazer a limpeza sempre que seja solicitado. O produto que será concebido numa fase final, que terá como alguns dos elementos essenciais para o seu correto funcionamento o sensor ótico e a membrana de ultrafiltração, terá que estar preparado com um sistema que sempre que seja necessário efetuar uma limpeza, o faça.

Surgiu assim então a ideia de utilizar um aparelho ultrassónico que permitisse chegar ao objetivo proposto.

A limpeza ultrassónica é já uma técnica muito conhecida que utiliza um aparelho, onde por norma a sua frequência geralmente se encontra entre os 20 a 50kHz. O ultrassom pode ser apenas utilizado com a água, mas nem sempre é suficiente e para isso recorre-se também a solventes próprios para cada determinado tipo de equipamento a ser limpo. Em termos de tempo de execução da ação da limpeza, o aparelho pode diferir consoante o tipo de objeto em questão, demorando sempre um pouco mais para objetos de maiores dimensões.

A limpeza está entre uma das mais comuns aplicações dos ultrassons, pois a sua eficiência é determinada por vários níveis de intensidade que lhes é imposta. Os aparelhos ultrassónicos podem ser utilizados para limpar diversos objetos, como por exemplo, peças de maquinaria, joias, relógios, moedas e muitos outros. Existem objetos que podem ser colocados em máquinas industriais, que no fundo são banheiras com água que quando são ativadas, emitem ondas através dos seus transdutores piezoelétricos que fazem com que a sujidade se liberte das peças, tudo isto feito por ação da cavitação. Caso se tratem de objetos mais pequenos e com menos cadência, que não justifique o uso de uma industrial, são utilizados pontas ultrassónicas em que têm o foco direcionado ao detalhe da peça que está a ser limpo. É comum ver-se estes aparelhos em alguns laboratórios ou oficinas, podendo os mesmos serem utilizados de forma automática, com o auxílio de um suporte, ou de modo manual.

Após alguma pesquisa realizada nos últimos anos, foi admitida a possibilidade de se aplicar o fenómeno de cavitação a áreas relacionadas com a proteção do meio ambiente. Como já foi referido anteriormente, a cavitação tem um poder de estimulação

muito forte com efeitos físico-químicos, que podem ser aproveitados para eliminar ou degradar certas substâncias em meios líquidos. A cavitação pode servir como mecanismo de desinfecção ou limpeza, quando são combinados alguns efeitos que a caracterizam. Os efeitos mecânicos através das correntes e turbulência e os efeitos térmicos através do aparecimento de zonas quentes que são propícias para o desenvolvimento e conseqüente colapso das bolhas, combinados com o processo de cavitação, facilitam a limpeza. [27]

A limpeza é um termo que está dependente do fenômeno de cavitação em fluidos. A atividade da cavitação não só produz energia cinética como também a usa para poder dispersar ou até mesmo dissolver partículas que se encontram em determinadas superfícies.

Uma vez que o atual projeto pressupõe a utilização de piezoelétricos e tendo sido já feita referência aos ultrassons, que onde uma das suas principais componentes é feita à base de materiais piezoelétricos, ponderou-se e decidiu-se avançar com a utilização de um aparelho ultrassônico para ambos casos de estudo. Através de um correto design e ligeiras alterações em termos técnicos de algumas das componentes, é possível criar um modelo de sistema de atuação que sempre que seja solicitado avance e proceda à limpeza do biofilme.

Tendo chegado à decisão da utilização de ultrassons, foi importante proceder a análises experimentais que pudessem comprovar a eficiência de um método semelhante que servisse de base para se poder utilizar na situação real. No próximo capítulo serão mostrados esses ensaios que foram realizados e o procedimento tomado, de forma a se poder chegar a uma prova de conceito que sustente a pré-proposta.

4. Ensaio e procedimento experimental

Quando foram entregues os casos de estudo, por parte da Bosch, para iniciar o trabalho com os mesmos, estes vinham limpos sem quaisquer vestígios de biofilme. Isso deve-se ao facto de, para já, o sistema pretendido no final de tudo ainda não se encontrar completo, o que explica o facto de virem sem qualquer vestígio de biofilme.

Idealmente, as peças que foram entregues viriam cobertas de biofilme para que pudessem ser logo testadas e trabalhadas sob essas condições e para poderem ser feitos diversos ensaios. Como isso não foi possível, foi entregue ainda uma outra componente, que nada tem que ver com o trabalho, para que servisse como auxílio no desenvolvimento do trabalho. Essa peça entregue trata-se de um filtro composto por malhas de polipropileno e foram dadas duas delas, onde uma continha o biofilme já num estado avançado e a outra estava totalmente limpa. Este filtro no seu estado inicial pode ser observado na figura 17.



Figura 17: Filtro de polipropileno

Em suma, foram entregues ao todo, quatro unidades do sensor ótico, uma membrana de ultrafiltração bem como o seu casing e por fim duas dessa tal peça que não pertence aos quadros do atual projeto, sendo apenas considerada uma ferramenta auxiliar de trabalho para os testes a serem realizados.

4.1. Estudo laboratorial

Conforme foi mencionado anteriormente, o estudo efetuado ao longo do capítulo anterior, permitiu perceber que existem diferentes métodos de eliminação do biofilme. Um deles, envolvendo materiais piezoelétricos, trata-se de um atuador ultrassónico, que recorre a ondas que são propagadas através de um meio para poder chegar a uma superfície e limpá-la. Tendo em consideração tudo o que foi dito em capítulos anteriores, procedeu-se à fase de execução experimental, onde se pretendeu validar a pré-proposta que se tratava de utilizar um ultrassom como o equipamento principal na ação de combate ao biofilme presente nas superfícies. Neste presente capítulo, encontra-se exposto todo o procedimento experimental utilizado ao longo da realização deste trabalho, iniciando-se nos testes que foram realizados no laboratório, seguindo-se uma análise ao microscópio das amostras analisadas e por fim a um enquadramento que diz respeito à criação de condições ideais para a formação de biofilme nos objetos de ambos os casos de estudo.

4.1.1. Testes realizados em laboratório

Uma vez delineado o procedimento a ser seguido, pegou-se no filtro de polipropileno que já continha o biofilme num estado avançado e recortou-se em pequenas parcelas do mesmo para que estas pudessem ser devidamente analisadas e trabalhadas, como assim o demonstra a figura 18.



Figura 18: Amostras do filtro de polipropileno com presença de biofilme

No laboratório onde foi realizada a parte experimental do atual projeto, havia 2 tipos de equipamentos de ultrassom, sendo um deles um pequeno reservatório de ultrassom da marca da Sono Swiss 6H, que contém uma potência de 550W e uma frequência de 37kHz. O outro equipamento que foi utilizado, trata-se de uma ponta ultrassônica, da Hielscher, que é um dos principais fornecedores de ultrassons para o laboratório do Departamento de Materiais da Universidade de Aveiro, onde foram realizados alguns testes. Este último tem uma potência de 200W e uma frequência de 24kHz.

4.1.1.1. Sono Swiss 6H

Após terem sido recortadas as amostras do filtro que continha biofilme, as mesmas foram analisadas no primeiro tanque, SW 6H, representado na figura 19. Este equipamento tem uma profundidade considerável, onde podem ser utilizados instrumentos ou ferramentas de maiores dimensões. Com uma capacidade de até cerca de 5,75litros foram colocadas no seu interior as amostras para serem limpas. Através do fenómeno de cavitação anteriormente falado e de se saber como este se processa, foram esperados aproximadamente cerca de 10 minutos para que a amostra fosse limpa e os resultados obtidos não foram os desejáveis.

Com uma potência de 550W e uma frequência de 37kHz foram retirados dados a três distâncias diferentes do transdutor instalado neste aparelho, que se encontra na base. A altura do tanque é de cerca de 15 cm e tendo sido colocadas as amostras praticamente encostada à base, a meio e perto da superfície, onde em todas essas análises que demoraram 10 minutos cada uma, praticamente nenhuma diferença se viu.



Figura 19: Banho ultrassónico SW 6H (retirado de [24])

4.1.1.2. UP200S

Após se ter observado o método anterior referido e os resultados não esperados, decidiu-se utilizar outro equipamento, também ele existente no laboratório, que se trata de uma ponta ultrassônica que tem como objetivo principal atingir com as ondas ultrassônicas certos pontos pretendidas do objeto em análise, tratando-se assim de uma ponta focalizada. Por outras palavras, ao contrário do banho de ultrassons, em que a amostra é mergulhada e as ondas são emitidas pela área toda, esta ponta ultrassônica laboratorial tem como foco apenas certas zonas que são apontadas.



Figura 20: Ponta ultrassônica da marca Hielscher (retirado de [28])

Remetendo à figura 20, foram realizados dois ensaios experimentais com a ponta ultrassônica, identificada na figura anterior, com um intervalo de um mês entre eles. Pouco tempo após ter sido disponibilizado o filtro de polipropileno com vestígios de biofilme, rapidamente foi feito o ensaio da propagação de ondas através da ponta ultrassônica para ver o efeito da remoção dos microrganismos e da sua facilidade.

O ensaio consistia em retirar uma pequena folha da camada superior, de uma das amostras, ainda elas frescas por serem relativamente recentes, e colocá-las no interior de um gobelé cheio de água com a ponta ultrassônica por cima delas. É possível ver na seguinte figura 21, a forma como foi montado todo o processo.



Figura 21: Colocação da amostra de biofilme presente no filtro de polipropileno para ser estudada no ultrassom

Na figura 21, pode-se ver um gobelé cheio de água e o aparelho ultrassónico ligado à corrente, onde tem a sua ponta colocada no interior da água. Este encontra-se sobre um apoio para que possa ser feita a propagação das ondas de uma forma mais precisa, sem movimentos, isto porque este aparelho pode ser operado de forma manual. Na mão, está uma pinça que foi utilizada para conseguir prender bem a amostra para que esta pudesse ser analisada dentro de água.



Figura 22: Inserção da amostra de biofilme dentro do gobelé com água

Na figura 22, está o resultado da montagem experimental. Utilizou-se a pinça sempre no mesmo nível em que se furou a amostra para que esta ficasse presa. Após tudo estar pronto iniciaram-se, assim, os ensaios.

Primeiro, começou por se fazer uma limpeza da amostra a uma distância de 1 cm do final da ponta ultrassônica, durante cerca de 60 segundos. Registaram-se os resultados e de seguida, voltou novamente a fazer-se o mesmo com outra amostra só que a uma distância ligeiramente maior à anterior, de 2 cm. Uma vez que os resultados estavam a ser satisfatórios, analisou-se ainda uma outra amostra a uma distância de 3 cm, tendo sido esta a última da análise. Registaram-se os resultados e esperou-se cerca de 1 mês para realizar exatamente a mesma experiência.

O objetivo desta 2ª análise após 1 mês, foi de tentar perceber se se iria obter exatamente os mesmos resultados, ou se pelo facto de haver um maior tempo de espera para se proceder à limpeza se o biofilme se adaptava mais às condições, sendo este mais difícil de o remover. O filtro perdeu humidade, tendo secado um pouco e a facilidade em remover o biofilme de amostras semelhantes às que foram analisadas na experiência inicial não foi a mesma. De seguida, encontram-se ilustrados na figura 23 os resultados observados após ter sido feito o mesmo procedimento com um mês de intervalo.

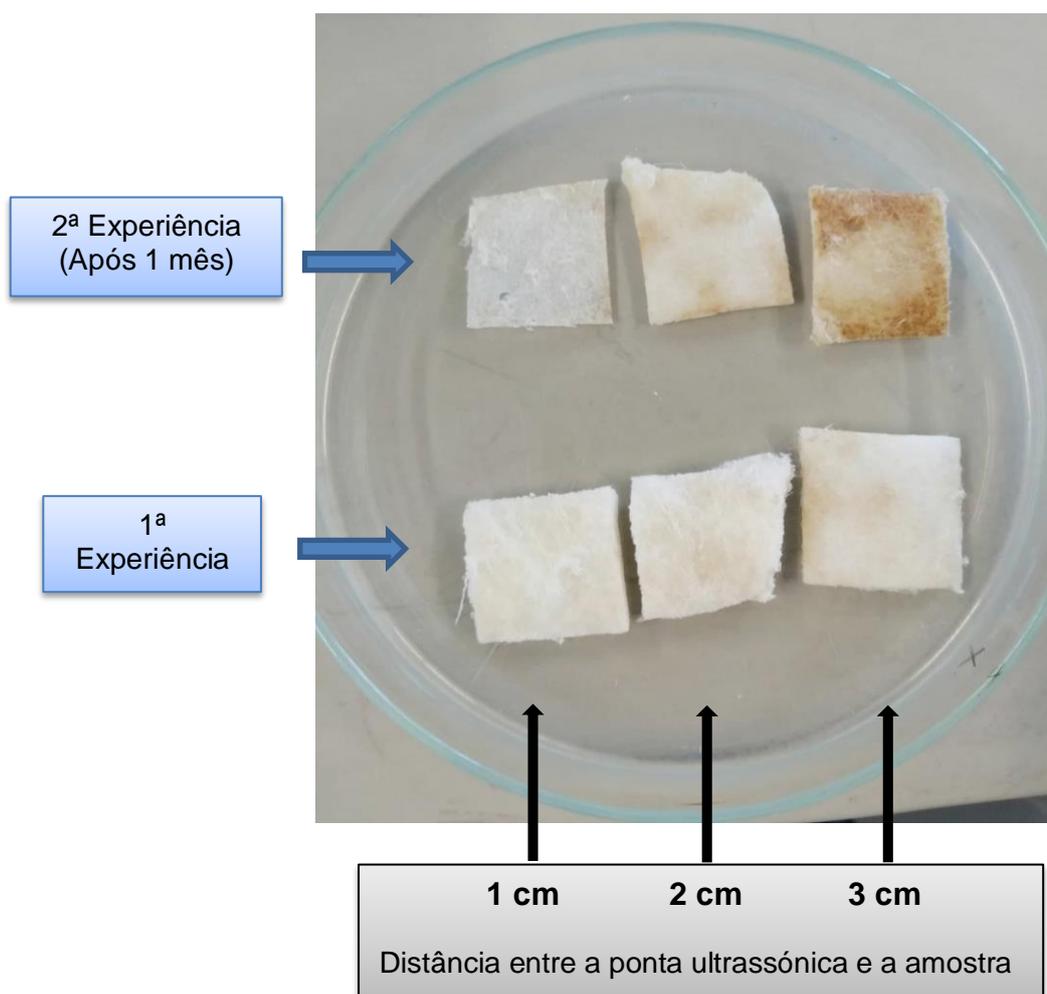


Figura 23: Registo das amostras do filtro de polipropileno com a presença de biofilme após serem limpas, num intervalo de tempo

É facilmente perceptível a diferença existente entre a limpeza que foi feita em ambas as experiências com um intervalo de diferença. As condições usadas para ambos os casos foram de uma potência de 200W, uma frequência de 24kHz e durante 60 segundos.

Relativamente à 1ª experiência, os resultados são bastante semelhantes, não havendo praticamente nenhuma diferença entre as análises que foram feitas às amostras que estiveram a 1, 2 e 3 cm de distância do foco da ponta ultrassônica. De realçar que ainda se experimentou afastar mais a ponta ultrassônica, até perto dos 5 cm de uma nova amostra, mas não foram obtidos resultados.

Já na 2ª experiência, é notória a diferença existente entre amostras analisadas à mesma distância da ponta ultrassônica, mas com um intervalo de 1 mês de diferença. A maior diferença é evidenciada na amostra mais amarela, que a uma distância de 3 cm não foi possível remover muito do biofilme nela presente.

De uma forma geral, notou-se que a distância é um fator importante, uma vez que influencia diretamente a eficiência da limpeza, sobretudo com um estado mais avançado do biofilme, onde se torna mais complicado de fazer a sua remoção quanto mais desenvolvido estiver.

4.2. Imagens do microscópio (lupa)

Após realizadas as experiências, foi-se observar a um microscópio (lupa), a qualidade da limpeza que foi efetuada, para perceber também como é que está disposto o biofilme sobre as malhas do filtro.

Relativamente à 1ª experiência, as imagens podem ser vistas nas seguintes figuras 24, 25 e 26, que dizem respeito às distâncias 1, 2 e 3 cm, respetivamente.



Figura 24: Amostra do filtro de polipropileno a 1 cm do raio de ação do ultrassom

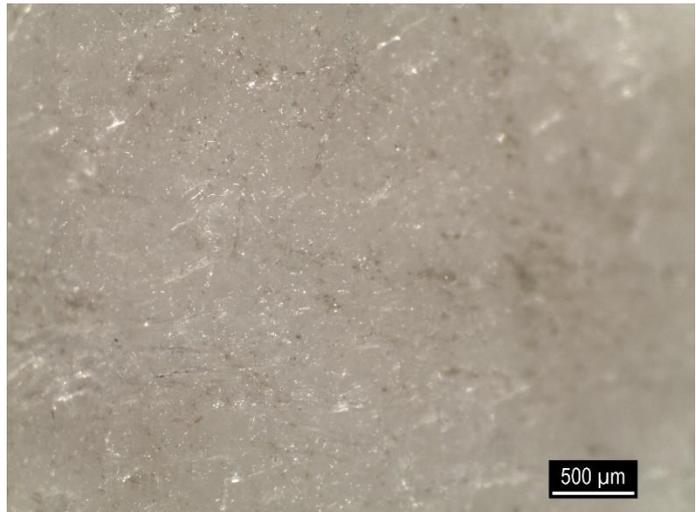


Figura 25: Amostra do filtro de polipropileno a 2 cm do raio de ação do ultrassom



Figura 26: Amostra do filtro de polipropileno a 3 cm do raio de ação do ultrassom

Com o auxílio da lupa microscópica, é possível ter uma visualização dos pormenores que não são tão perceptíveis a olho nu, e tal como já foi referido, a uma distância de 1 cm está totalmente limpa a superfície do filtro. A 2 cm nota-se uma ligeira mancha com biofilme na superfície, embora esta seja praticamente inexistente. Por fim, na amostra que foi colocada a 3 cm, existe alguma presença de biofilme que é possível observar ainda a olho nu, no entanto, não é algo que seja muito significativo, podendo mesmo até dizer-se que o resultado da limpeza é satisfatório.

Quanto à última experiência, realizada 1 mês depois da primeira, os resultados na lupa para cada amostra colocada a 1, 2 e 3 cm, respectivamente, da ponta ultrassônica, encontram-se nas seguintes figuras 27, 28 e 29.



Figura 27: Amostra do filtro de polipropileno a 1 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês

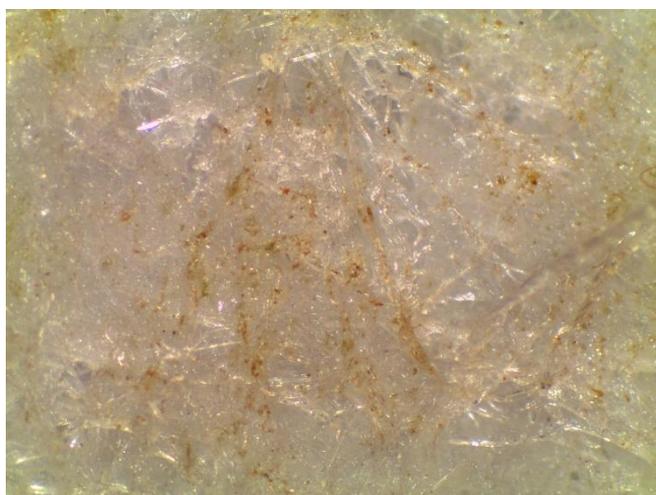


Figura 28: Amostra do filtro de polipropileno a 2 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês

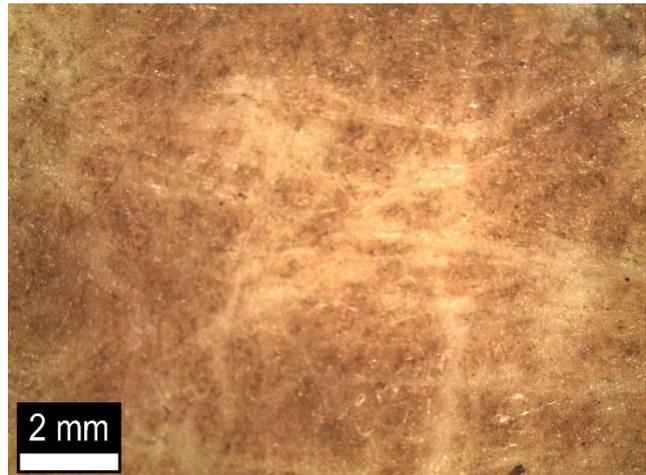


Figura 29: Amostra do filtro de polipropileno a 3 cm do raio de ação do ultrassom após 1 mês

No caso da 2ª experiência, a tendência mantém-se. Quanto mais afastado é feita a propagação das ondas, menos precisa é a limpeza. Ainda assim, e comparando a experiência realizada com a que foi feita 1 mês antes, nota-se uma ligeira ineficiência em remover a totalidade do biofilme nos 3 ensaios feitos a cada centímetro, ainda que tenha sido feita sob as mesmas condições de operação que a primeira. Esta diferença acentua-se mais na de 3 cm, onde a remoção foi pouco eficaz.

4.3. Criação de condições para formação de biofilme nos casos de estudo

É possível ocorrer adesão bacteriana e formação de biofilmes em praticamente todas as superfícies, sendo que umas são mais propícias a outras. É bastante comum associar-se o termo de biofilme apenas a superfícies húmidas por estas serem um local apropriado para a formação e desenvolvimento dessas comunidades, mas na verdade podem desenvolver-se em qualquer tipo de meio.

O processo de criação do biofilme é o resultado de um conjunto de eventos que se desencadeiam tendo início num colonizador primário. Este começa por se desenvolver onde dá origem a pequenas colónias que sintetizam uma matriz polissacarídea que faz com que adiram à superfície em questão e os mantenham unidos nela e que sirvam como uma ponte para novos organismos se juntarem e desenvolverem, sendo estes designados por organismos secundários.

Há determinados fatores que ditam a estrutura final do biofilme e que condicionam o modo como estes se desenvolvem. O principal fator, tal como já foi mencionado

anteriormente no capítulo referente à revisão de literatura, a ter em conta é a qualidade da água envolvida, que dita a forma como se dá o crescimento do biofilme. Juntando a isso, a presença de matéria orgânica e por vezes de alguns nutrientes junto às superfícies, ajuda a uma maior facilidade de desenvolvimento. O tempo é um fator crucial, pois é ele que define a rapidez no seu desenvolvimento, ou seja, quanto mais tempo estiver parada a água, mais fácil se torna um rápido crescimento sem comprometer o seu natural processo de desenvolvimento. Temperatura e incidência solar são outras duas formas de se agilizar o processo. Quanto maior e mais forte forem, respetivamente, mais simples se torna.

Com base nestas informações que se encontram no estado de arte do presente trabalho, tentou-se recriar todo o processo da formação do biofilme nos dois casos de estudos para este projeto, uma vez que não existia nenhum deles que contivesse o biofilme. Tanto a membrana de ultrafiltração como o sensor ótico foram disponibilizados, sem qualquer tipo de sujidade, portanto foi necessário colocá-los sob condições que possibilitassem o seu aparecimento para serem realizados alguns ensaios.

Recorreu-se a uma água que se encontrava num estado próprio e ideal para ser utilizada. Esta foi água que estava diariamente sob o efeito de radiação solar e estagnada. Para ambos os casos de estudo, utilizou-se da mesma água e ambos foram colocados das seguintes formas: O casing do sensor ótico foi mergulhado em água limpa no dia 16 de abril de 2019 e lá permaneceu por cerca de 7 dias. Ao longo dessa semana, não houve nenhuma alteração no estado da superfície e a figura 30, é uma fotografia tirada que retrata essa mesa não evolução no seu estado de presença de biofilme ao longo da sua superfície.



Figura 30: Representação do sensor de ótico completo após 1 semana em água limpa

Após essa semana à prova, no dia 23 de abril, foi feita uma mudança da água limpa para a tal água que continha as condições propícias de forma a promover um melhor e mais rápido desenvolvimento do biofilme. Do dia 23 de abril até ao dia 7 de maio, 21 dias depois, começaram a observar-se vestígios de biofilme, como assim o ilustra a figura 31.



Figura 31: Superfície do sensor coberta de biofilme

Do dia 7 de maio ao dia 23 do próprio mês, deixou-se estar sob as mesmas condições para verificar se o estado apresentado se desenvolvia. Na figura 32, é possível observar que após esse tempo houve um ligeiro desenvolvimento. Foram colocadas os 4 casings para que mais tarde estes pudessem ser todos tratados, se necessário, sob as mesmas condições.



Figura 32: Todas as amostras com presença de biofilme

Ainda lá continuaram por mais 15 dias, só que já não era possível obter melhores resultados do que aqueles que se tinham no dia 23 de maio.

A membrana de ultrafiltração foi colocada sob o mesmo processo que o casing do sensor ótico, mas infelizmente os resultados não foram os esperados. Inicialmente, teve desde o dia 16 de abril até ao dia 23 mergulhado em água limpa, e após esses 7 dias foi colocado mergulhado na mesma água do rio, durante cerca de 60 dias, onde os resultados foram praticamente inexistentes.

A única diferença relevante que foi possível observar foi que durante todo esse tempo sob análise, as fibras que constituem o filtro, que inicialmente eram duras, começaram a amolecer um pouco. A fotografia inicial da membrana, antes da formação de biofilme é como está representado na figura 33a) e na figura 33b), é o resultado de vários dias após a introdução da membrana na água do lago para que fosse criado o processo de crescimento do biofilme.

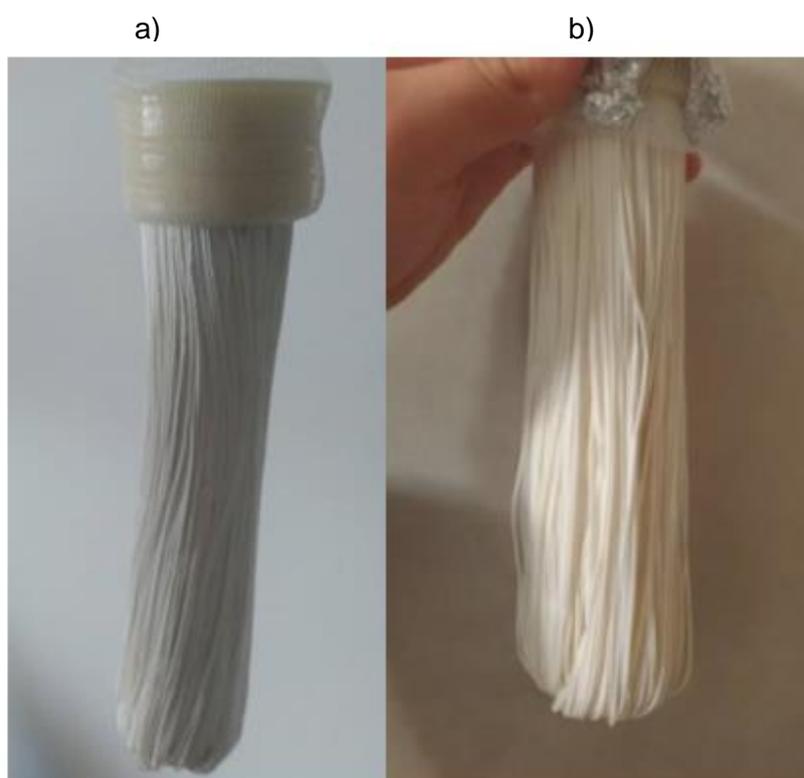


Figura 33: Representação da membrana de ultrafiltração: a) Antes da criação de condições para a formação de biofilme; b) Após a criação das condições para a formação de biofilme

4.4. Aplicação do método ultrassónico no caso de estudo – casing do sensor ótico

Com a atribuição de ambos os casos de estudo e conforme foi descrito na secção 4.3, o modo como se procedeu para criar as condições necessárias para que se desenvolvesse biofilme nas suas superfícies, os resultados apenas foram visíveis num deles, mais concretamente no casing do sensor ótico. Tendo por base esses resultados, optou-se por realizar ensaios através da ponta ultrassónica no casing para estudar a eficácia da sua remoção.

4.4.1. Ponta ultrassónica Hielscher

O procedimento adotado para o casing não diferiu muito daquele que foi tido em consideração quando se utilizaram as amostras do filtro de polipropileno que já continha o biofilme. Primeiro, começou por se encher um gobelé com água, e utilizou-se uma pinça grande para agarrar o casing, ficando este com a parte que se quer atacar, virada para cima. A figura 34, ilustra essa disposição.



Figura 34: Pinça a segurar o casing do sensor ótico para a limpeza ultrassónica

De seguida, colocou-se a ponta ultrassónica mergulhada em várias posições para testar a capacidade de remoção a diferentes distâncias, tendo estas sido de 1 a 3 cm e os

resultados obtidos foram rapidamente visíveis. Na figura 35 é possível observar a introdução da ponta ultrassônica no raio de ação para efetuar a limpeza nessas posições.



Figura 35: Ponta ultrassônica introduzida no gobelé com água para libertar as ondas

Foram entregues 4 exemplos de casings para serem estudados e após se criarem as condições para a formação de biofilme foram todos colocados sob as mesmas circunstâncias para poderem ser alvo de uma análise experimental mais rigorosa. Nesta experiência realizada, não foi necessário proceder à utilização de mais nenhum casing, para além do que se encontra presente nas imagens anteriores, visto que o resultado foi bem claro. Na figura 36, está o casing que foi limpo e como é possível constatar encontra-se limpo na sua totalidade.



Figura 36: Casing do sensor ótico após a limpeza

Nas duas figuras que se seguem, está a comparação do único que foi limpo e dos restantes que não foram alvo de qualquer ensaio experimental.

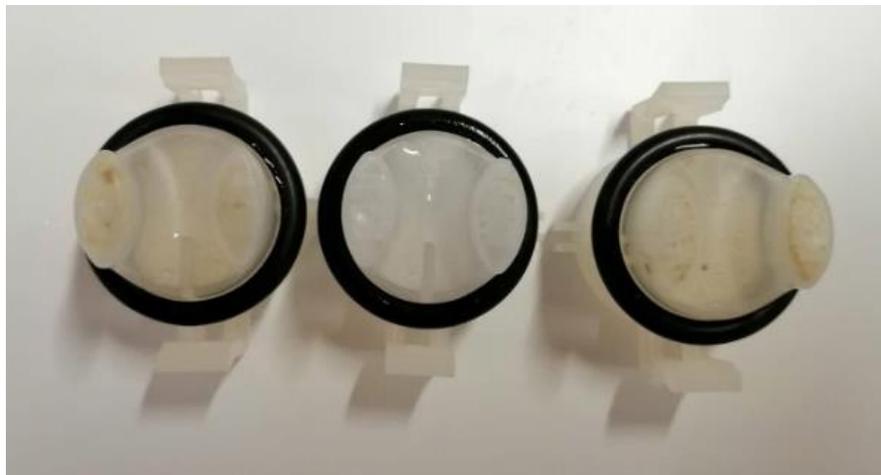


Figura 37: Vista de cima da diferença dos dois casings que não foram limpos (esquerda e direita) e o que foi (meio)



Figura 38: Vista de cima da diferença dos dois casings que não foram limpos (esquerda e direita) e o que foi (meio).

4.4.2. Ponta ultrassónica comercial

Durante a fase do trabalho em que se esperavam resultados do crescimento de biofilme em ambos os casos de estudo, foi encomendada uma nova ponta ultrassónica para realizar alguns ensaios. Uma vez que as dimensões do casing do sensor são reduzidas, e que o método ultrassónico até ver, era um método eficaz na remoção de

biofilme nas amostras disponibilizadas pela Bosch, optou-se por encomendar uma pequena ponta ultrassônica para que esta pudesse ser incorporada no sistema. Assim, foram feitas algumas pesquisas e abordagens a empresas que são especializadas na comercialização de piezoelétricos e também equipamentos ultrassônicos e acabou por se optar por uma solução que se adequava às dimensões exigidas, estando esta ilustrada na figura 39.

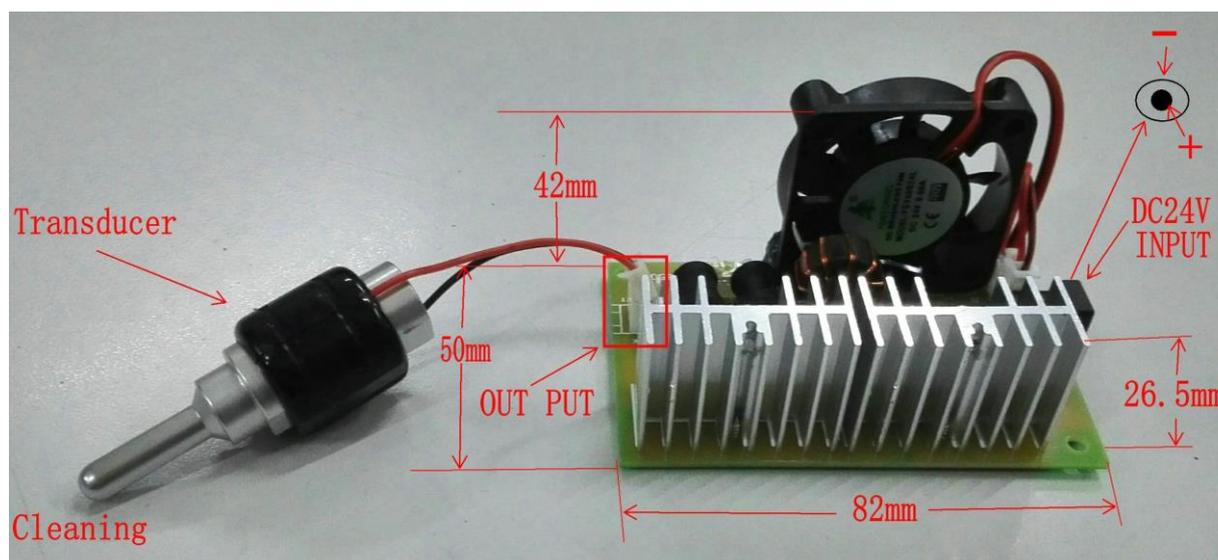


Figura 39: Especificações da ponta ultrassônica (retirado de [29])

Esta solução faz parte dos quadros da empresa american piezo. Para mais informações detalhadas acerca de algumas das suas soluções e aplicações de produtos disponíveis, a página da web deste fabricante encontra-se disponível. [30]

Atentando à documentação das características do produto, sabe-se que o gerador transforma os 24V à entrada (DC24V INPUT), numa determinada onda AC (OUTPUT) com uma potência 8W e frequência 50kHz, que irá alimentar o transdutor piezoelétrico. É importante salientar que a aquisição desta ponta ultrassônica se prende com uma necessidade de provar um conceito. Dados os materiais que existiam no laboratório para serem limpos, a compra deste produto teve como propósito testar a sua viabilidade e o seu comportamento numa análise.

A chegada deste equipamento teve alguns contratemplos, tendo demorado mais do que inicialmente era previsto, mas quando chegou, já o biofilme no casing do sensor ótico se tinha desenvolvido e sendo assim não foi necessário realizar testes nas amostras do filtro de polipropileno.

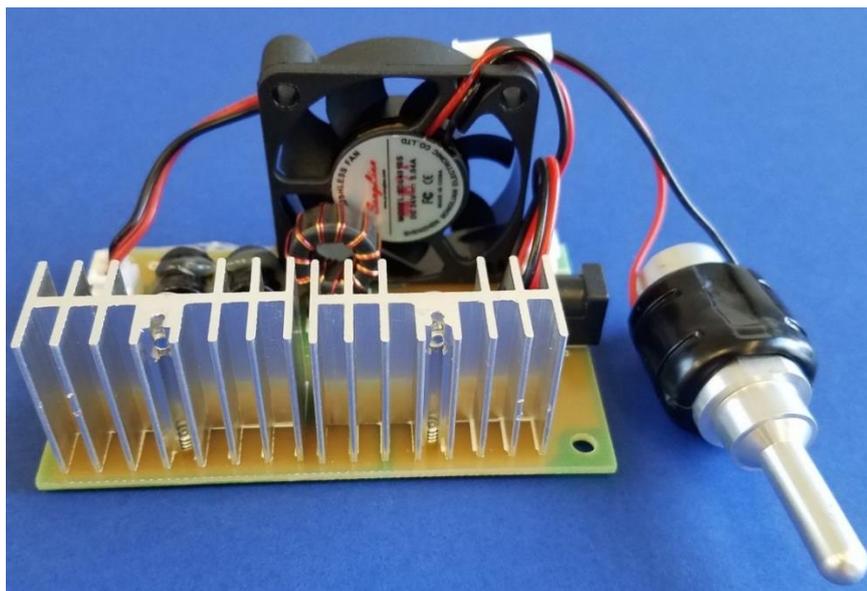


Figura 40: Ponta American Piezo (retirado de [29])

Dos 4 casings existentes, um foi limpo pela ponta ultrassônica da marca Hielscher, restando apenas 3 para se realizar alguns ensaios. Uma vez mais, o procedimento adotado foi semelhante a todos os outros em termos de preparação das condições de trabalho, no entanto, após ter sido mergulhada a ponta ultrassônica num gobelé com água, rapidamente se percebeu que não havia força suficiente que fizesse com que as ondas ultrassônicas gerassem uma turbulência suficiente na água para que o biofilme fosse removido. Isto tudo, tendo sido feito mesmo encostado ao casing e também afastado. Na seguinte figura 41, está representada a forma como foi introduzida a ponta no gobelé com água, direcionando o seu foco para o casing. De notar que não foi necessário fotografar o resultado da limpeza do biofilme, pois não existe nenhuma diferença entre a pré-limpeza e o pós-limpeza.



Figura 41: Colocação da ponta ultrassónica da american piezo

5. Discussão de resultados

No presente capítulo analisar-se-ão os resultados obtidos aos ensaios experimentais e de que forma os mesmos contribuem como uma proposta de solução para o sistema de tratamento de água implementados na empresa Bosch Termotecnologia. De um modo geral, estes resultados são fundamentais para caracterizar o desempenho da ponta ultrassónica e estabelecer potenciais estratégias de atuação face à proposta exigida, com a utilização de piezoelétricos.

Fazendo um breve resumo ao capítulo anterior, pode-se dizer que de um modo geral, que os ensaios tenham sido úteis para a análise de resultados. Ao logo das várias experiências realizadas, utilizaram-se 3 métodos diferentes de atuação ultrassónica com base em piezoelétricos. A primeira tentativa foi através de um banho ultrassónico, onde foram colocadas amostras de biofilme num filtro de polipropileno. A segunda foi uma ponta ultrassónica que se encontra no laboratório do Departamento de Engenharia dos Materiais e Cerâmica, da marca Hielscher, onde esta foi utilizada numa primeira instância para estudar o efeito da remoção de biofilme da superfície do filtro de polipropileno enquanto o biofilme se desenvolvia no casing do sensor ótico e da membrana de ultrafiltração. Após o crescimento do biofilme num desses casos de estudo, procedeu-se à limpeza através da mesma ponta que já tinha sido utilizada para ensaios anteriores. Por último, utilizou-se uma pequena ponta ultrassónica comercial que foi encomendada no decorrer do presente projeto para que esta servisse como prova de conceito e auxílio no estudo da remoção de biofilme das mesmas superfícies.

Infelizmente, dos dois casos de estudos que foram entregues pela Bosch, apenas se conseguiu obter resultados em termos de desenvolvimento de biofilme no casing do sensor ótico. Na membrana de ultrafiltração, não se conseguiu reproduzir o mesmo efeito e por isso, não foi utilizado em nenhum dos ensaios. Assim, apenas foi apenas possível aplicar em termos práticos o método ultrassónico no casing.

A necessidade de obter resultados em termos de limpeza é uma medida fundamental em qualquer sistema, mas neste caso em particular, torna-se ainda mais importante pois envolve um produto que acabará por ser consumido, a água.

Assim, com base nos testes que foram realizados e após uma análise dos resultados, concluiu-se que a aplicação de ultrassons neste sistema é uma solução viável e que obedece aos parâmetros exigidos para este projeto, onde este requer a utilização de materiais piezoelétricos. No capítulo 3, foi abordada uma pré proposta que antevia a utilização de equipamentos de ultrassom numa possível incorporação dos mesmos no

sistema final, mas antes de passar a essa fase, foi necessária a comprovação através de alguns ensaios experimentais para validar essa pré proposta, que se encontram descritos no capítulo seguinte, o 4. Após feita essa validação, segue-se este capítulo onde é descrita a proposta final para solucionar o problema presente.

5.1. Disposição equivalente do sensor ótico e da membrana de ultrafiltração

Neste capítulo, encontram-se representadas algumas das figuras que mostram as peças que estão envolvidas no presente projeto e para uma melhor percepção do sistema pretendido, com recurso à ferramenta Solidworks (2017-2018 Student Edition), desenhou-se o referido esquema que demonstra a disposição equivalente do sensor ótico e da membrana de ultrafiltração. De notar que nas seguintes figuras apenas se encontram as peças desenhadas, sem qualquer alteração feita no seu design inicial estando apenas estas a serem representadas da mesma forma que quando foram entregues.

Uma vez que não havia ficha técnica de nenhuma das peças, recorreu-se a um paquímetro para tirar as dimensões com o máximo detalhe possível, havendo sempre a possibilidade de haver ligeiros desvios em relação às cotas reais. A utilização deste sistema CAD torna-se não só importante na construção de um potencial sistema, como também na medida em que expõe de forma clara a ideia pretendida com a disposição equivalente. As figuras seguintes demonstram as peças existentes que foram desenhadas e o modo como as mesmas estão colocadas segundo a orientação pretendida.

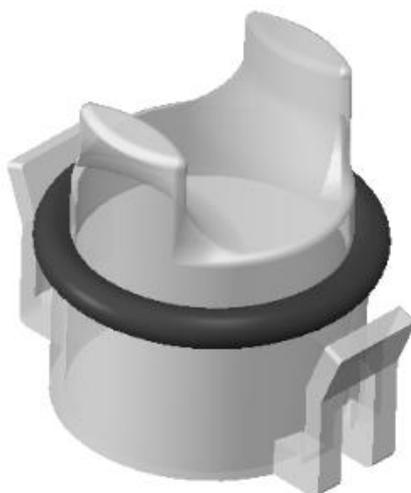


Figura 42: Objeto do caso de estudo I – casing do sensor ótico

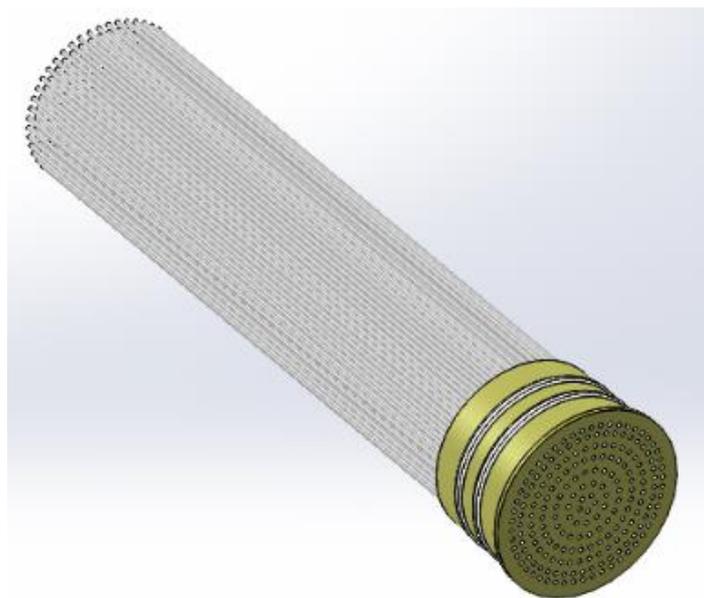


Figura 43: Objeto do caso de estudo II – Membrana de Ultrafiltração

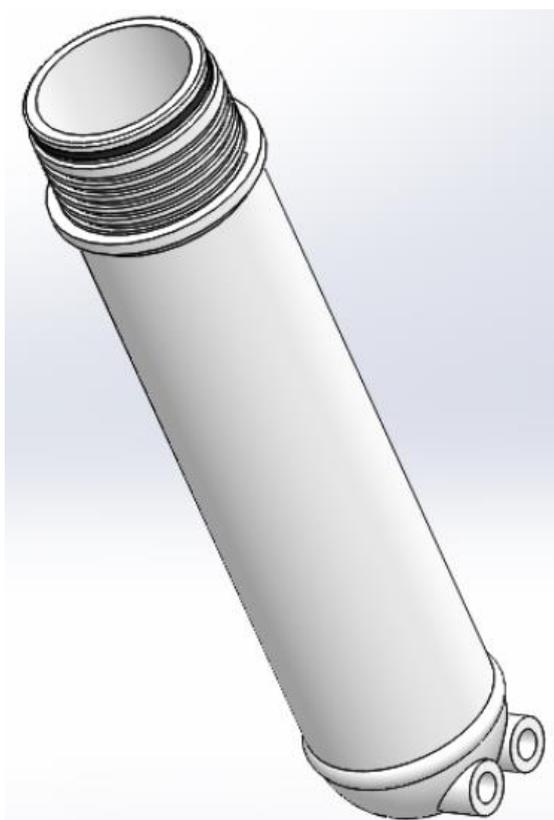


Figura 44: Casing da membrana de ultrafiltração

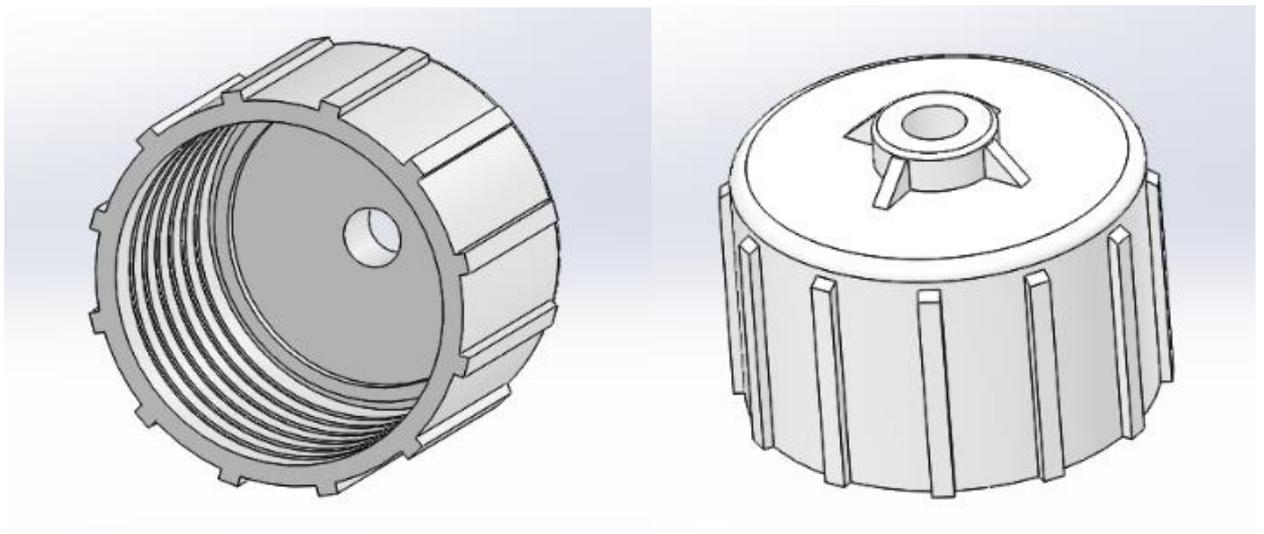


Figura 45: Tampa que completa o casing da membrana de ultrafiltração

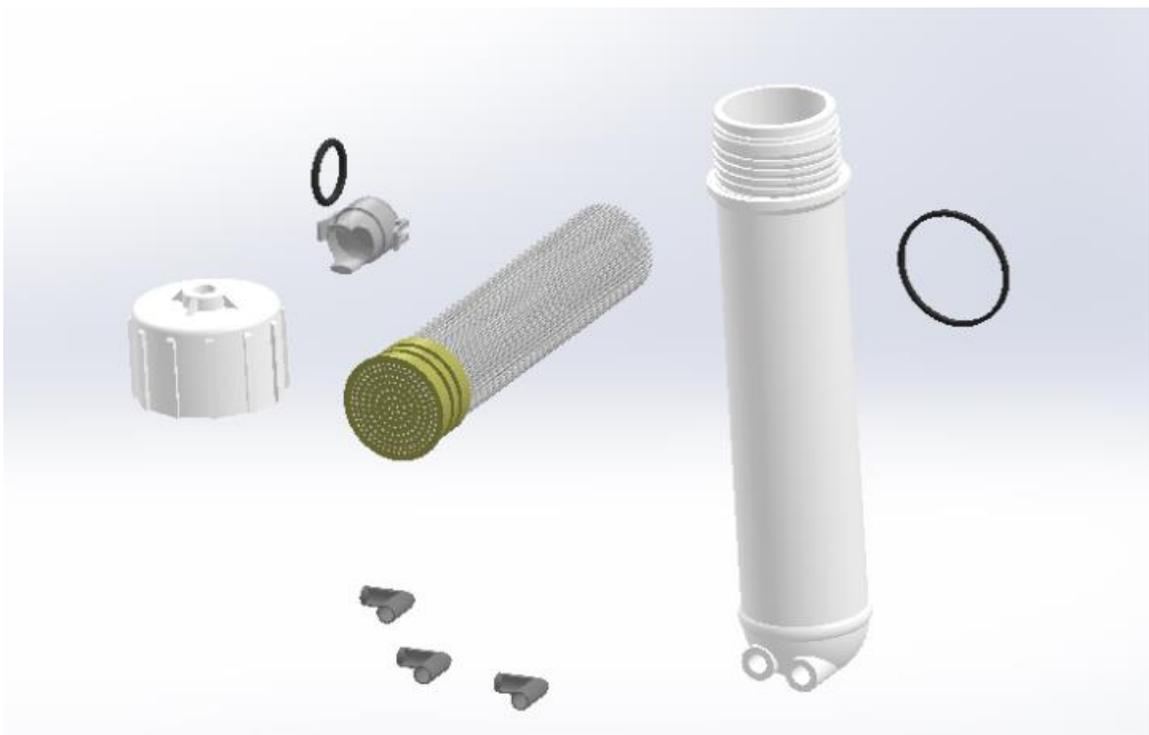


Figura 46: Ilustração do conjunto de todas as peças do sistema

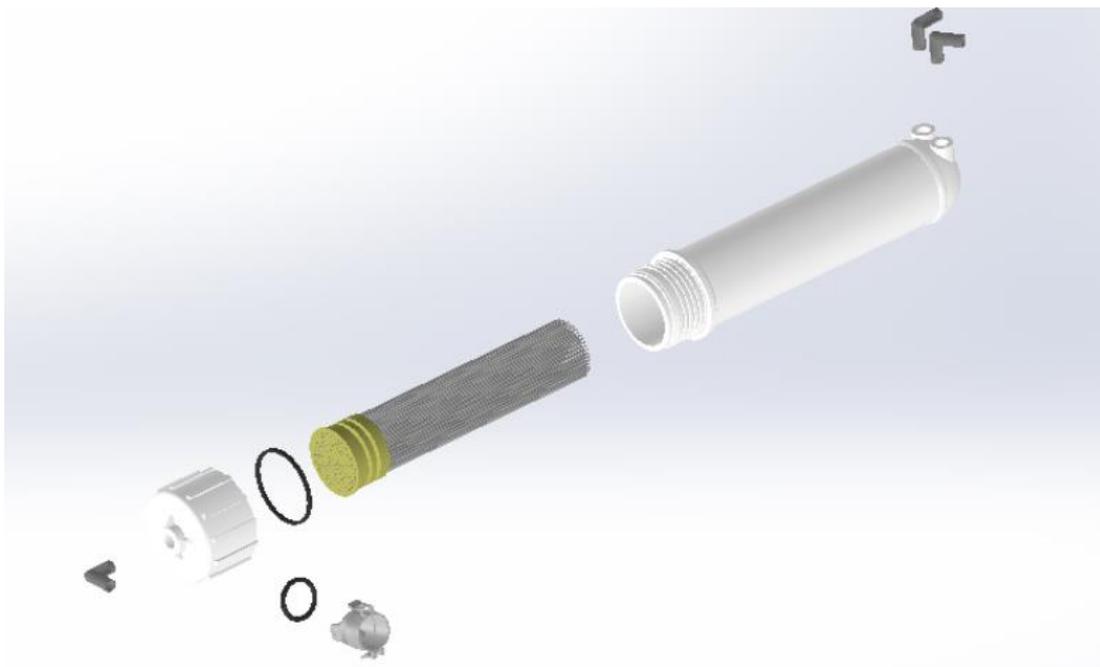


Figura 47: Desenho explodido da combinação de todas as peças envolvidas no sistema



Figura 48: Conjunto final montado: Disposição equivalente do sistema

A partir desta montagem, começou por se abordar algumas ideias que pudessem satisfazer os requisitos impostos de modo a ter um sistema viável e exequível. Assim, nas próximas secções, serão mostradas as abordagens feitas, tendo sempre por base os ensaios realizados e demonstrados anteriormente.

5.2. Proposta para limpeza de biofilme no sensor ótico – caso de estudo I

Relativamente ao casing do sensor ótico, a solução pensada passa por uma limpeza ultrassónica focalizada. Os ensaios práticos demonstraram que o ato ultra ultrassónico em si, remove eficazmente o biofilme da superfície que envolve o sensor, mas para isso acontecer é necessário que lhe sejam impostas condições de atuação semelhantes às que foram observados na prática.

O funcionamento do sistema inicia-se em fases anteriores que não dizem respeito ao atual trabalho, acabando por passar pela válvula de entrada que transporta água. Esta vai sendo constantemente medida em termos qualitativos por parte do sensor ótico e, em simultâneo, arrasta consigo com o decorrer do tempo, nutrientes e outro tipo de substâncias que propiciam a origem de formação de comunidades de microrganismos que acabam por se depositar nas superfícies quando as condições são ideais. Surge assim, a necessidade de se ter que efetuar uma limpeza e foi através dos ensaios experimentais que se provou que a aplicação de um método ultrassónico que tem por base a presença de materiais piezoelétricos, é uma medida apropriada para resolver tal problema.

Tendo como base estas informações, a proposta que se apresenta, passa pela utilização da mesma água que passa pelo sistema como um meio de propagação utilizado para ajudar a que as ondas ultrassónicas emitidas pelo aparelho introduzido no sistema sejam eficazes. A ideia seria que quando fosse necessário efetuar a limpeza do casing, deixar a água fluir pelo sistema e bloquear qualquer saída nas válvulas que se encontram por baixo da membrana de ultrafiltração. Desta forma, com a água a ocupar todo o sistema, seria possível colocar a tal ponta ultrassónica em funcionamento. O grande entrave aqui, prende-se com a ausência de espaço para a colocação do aparelho, pois quando as peças foram concebidas não se teve em consideração a incorporação de um novo sistema adaptado. Assim sendo, foi necessário ter que se fazer alguns reajustes dimensionais e estruturais no atual projeto para que fosse possível conciliar todas as medidas a serem impostas.

Após os ensaios experimentais verificou-se que apenas a ponta ultrassónica da Hielscher resultou e a ponta ultrassónica da American Piezo não. Dadas as dimensões do

casing do sensor ótico bem como do espaço disponível que existe para fazer a limpeza, considera-se que a melhor solução passa por incorporar na extremidade oposta ao casing, uma ponta ultrassónica de reduzidas dimensões à semelhança da que foi utilizada nos ensaios. Para tal ser possível, é necessário que esse aparelho possua condições de operação semelhantes à ponta ultrassónica maior utilizada, da marca Hielscher. No fundo, trata-se uma conjugação dos melhores atributos de cada um.

O ideal seria possuir uma eficiência próxima da primeira em que tenha uma frequência e potência semelhante e, por outro lado, ser uma ponta ultrassónica de reduzidas dimensões que tenha um menor peso tal como a segunda que também foi utilizada de modo a ser possível colocá-la de forma concêntrica à frente do casing.

Passando agora para a prática, para fazer a incorporação, tiveram que ser feitos alguns ajustes e um redesign inicial da parte da tampa para conseguir de um lado estar o casing do sensor ótico e na extremidade oposta estar a ponta ultrassónica, com um suporte que ajude a segurar o aparelho bem como a parte eletrónica para que a mesma não corra o risco nem de cair nem de ficar molhada.

Na seguinte figura 49, encontra-se ilustrada a ponta ultrassónica utilizada, de forma a ser mais perceptível transparecer a ideia pretendida.

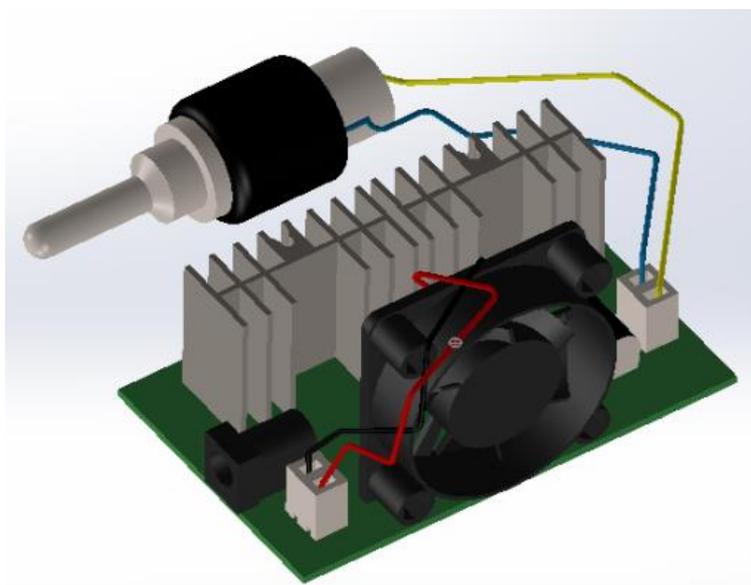


Figura 49: Ponta ultrassónica idêntica à que foi utilizada

De seguida na figura 50, está ilustrado o ajuste que foi realizado na parte da tampa, tendo sido adicionado uma pequena passagem na fase superior, com um aspeto de um chapéu. De um lado, tem um furo que será para o encaixe do casing do sensor, do outro o furo para incorporar a ponta ultrassónica idêntica à que se encontra representada na figura

anterior e por fim, no canal superior, um furo para colocar a pequena válvula de entrada por onde se fará a passagem da água.

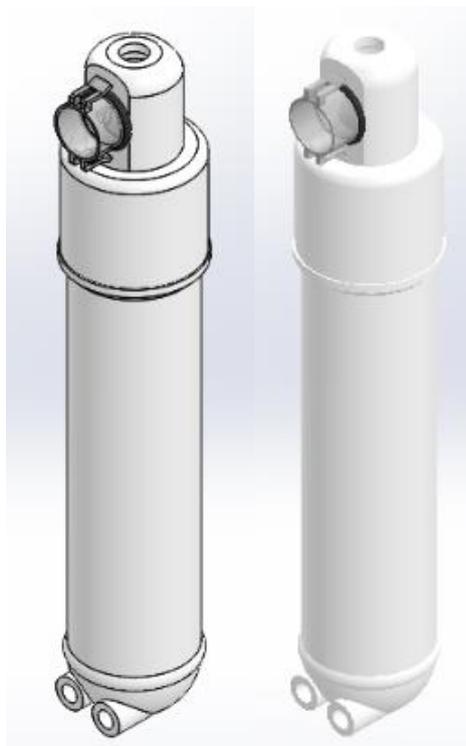


Figura 50: Re design das peças e incorporação do casing do sensor ótico

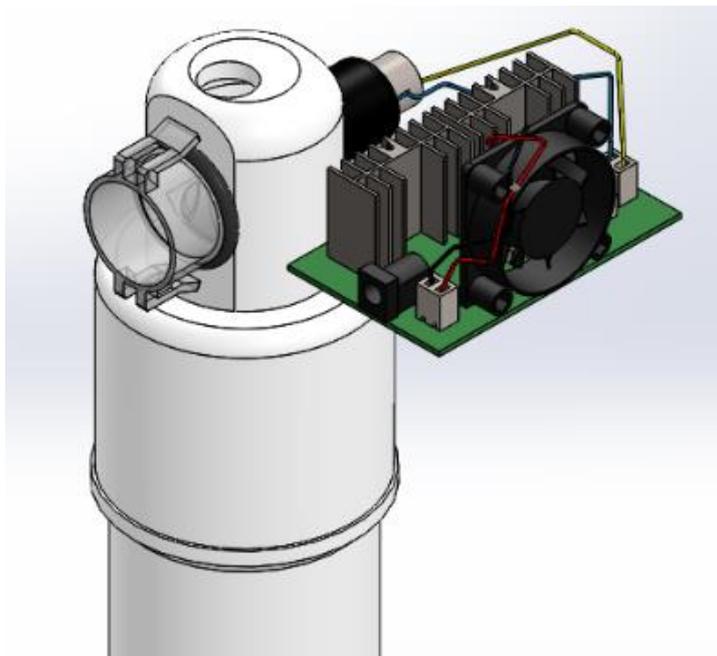


Figura 51: Colocação da ponta ultrassônica na outra extremidade

Foi adicionada à tampa que está enroscada ao casing que envolve a membrana de ultrafiltração, uma espécie de suporte para apoiar a ponta ultrassônica, conferindo-lhe estabilidade ao lado donde esta atua. A figura 52, demonstra isso.

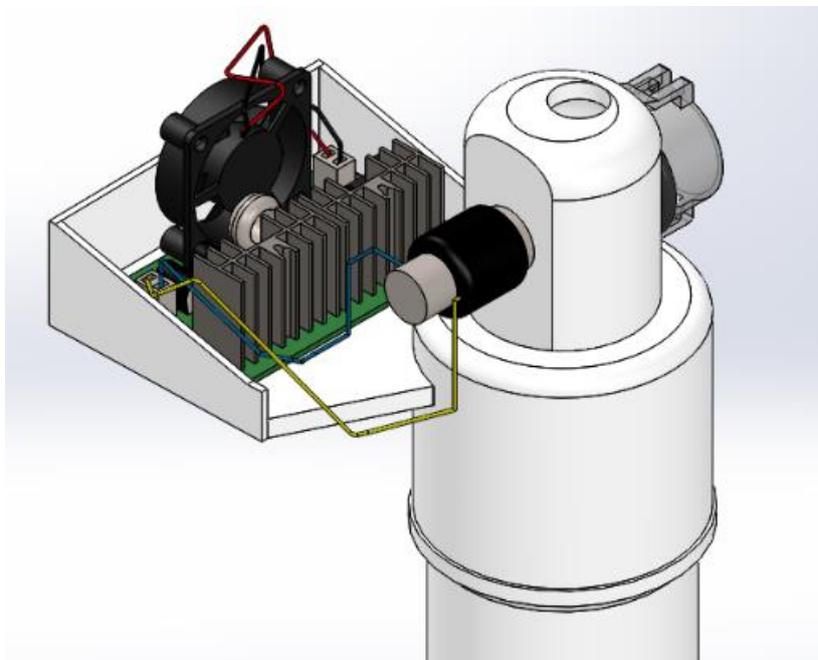


Figura 52: Colocação do suporte da ponta ultrassônica na tampa

Na figura 53, está representada a proposta completa referente ao casing do sensor óptico, onde se encontra já colocada a válvula que levará água a ser introduzida no sistema.

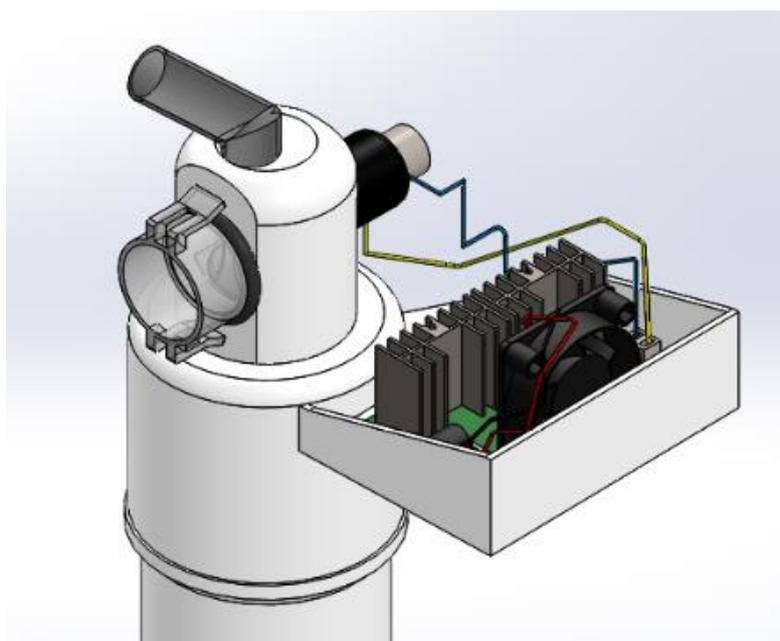


Figura 53: Colocação do suporte da ponta ultrassônica na tampa

5.3. Proposta para limpeza na membrana de ultrafiltração – caso de estudo II

Relativamente à membrana de ultrafiltração, a solução pensada passa por uma limpeza ultrassónica enquanto o casing que a envolve se encontra coberto de água no seu interior, tal como se sucede no exemplo anterior com a superfície que envolve o sensor ótico. O modo como o sistema funciona, tal como já foi explicado anteriormente, envolve uma fase em que a água passa num dos canais superiores chegando à passagem pela membrana que, ao fim de algum tempo, irá acumular macro e micro moléculas que ficarão retidas nas fibras que compõem a membrana e caso esta não seja limpa, acabará por perder não só o propósito para o qual foi concebida como também poderá contaminar a água que irá por lá passar.

Posto isto, a proposta acaba por envolver o elemento principal deste trabalho, a água, como um meio de propagação das ondas ultrassónicas de forma a facilitar a desagregação de microrganismos e também eventualmente de outro tipo de substâncias que se acumulem na membrana. Para isso, terá que se fazer o enchimento com água do casing na sua totalidade, bloqueando as suas válvulas de saída e deixando que a água suba até chegar ao nível do sensor ótico. Este sensor ótico que tem como principal papel medir a qualidade da água, irá detetar quando a mesma o submergir, e é aí que o fluxo de água que está a entrar no sistema para ser filtrada, para. Quando isto acontece, estará tudo apto para que a ponta ultrassónica que se encontra no fundo do casing, próximo das válvulas de saída de água, entre em ação e que emita ondas para fazer vibrar a água e agitar a membrana de modo a que esta liberte o biofilme presente. Estas ondas chocariam com as fibras que compõem a membrana, fazendo assim com que o biofilme se fosse libertando e ficasse em suspensão na água para depois, após o tempo estipulado para esta limpeza, a água juntamente com toda a sujidade retirada do filtro fosse escoada para a válvula que se encontra destinada à saída de resíduos. Uma é para a água ser escoada normalmente (após ser devidamente filtrada) enquanto que a outra só é utilizada precisamente para drenar a água que contém sujidade. Importante referir que a ponta ultrassónica estará colocada sempre no interior da cápsula que envolve a membrana, estando apta caso seja solicitada para avançar e efetuar a limpeza. Nas próximas figuras, ficará mais elucidativo a ideia de como isso será possível, mas a parte metálica é comprida e apenas terá o início da sua ponta introduzido no pequeno furo existente na parte debaixo do casing. Haverá um mecanismo de elevação que sempre que seja ativado o mesmo eleve o conjunto da ponta ultrassónica, fazendo com que o corpo inteiro da ponta seja todo introduzido para efetuar uma limpeza mais profunda no seu interior.

Embora não tenha sido possível replicar o efeito ultrassónico como o foi no caso do casing do sensor ótico, por este não ter desenvolvido biofilme, acredita-se que dada a facilidade com que foi reproduzido o efeito e o modo eficaz com que foi possível identificar as partículas no casing do sensor a serem libertadas, o mesmo possa acontecer aqui. Sem nenhum ensaio comprovado no que a isto diz respeito, o facto do eixo mecânico ajudar, esta solução proposta acaba por de certa forma ser vantajosa porque através do sistema de elevação que for utilizado, ajudará a aumentar o rendimento desta solução na medida em que elevando a ponta ultrassónica, a mesma possa chegar a locais mais profundos do filtro, fazendo sobretudo uma limpeza nuclear no seu interior. Com a agitação das fibras internas, as exteriores também acabarão por se mover e devido ao efeito formado pela onda ultrassónica que se propaga não só numa, mas em várias direções, estas acabarão também por largar biofilme. Desta forma, a limpeza no seu interior será mais eficaz, mas pode acabar por não ser 100% eficiente caso as ondas não atinjam na totalidade as fibras exteriores impedindo que estas soltem o biofilme na sua totalidade. De qualquer das formas, em secções seguintes serão explicados melhores alguns detalhes relativamente ao mecanismo de prevenção e não apenas ao de atuação quando a membrana está suja.

Posto isto, focando agora para a parte referente à proposta desenhada, é de realçar que foram realizados pequenos ajustes em termos de dimensões para que fosse possível incorporar o sistema pretendido, alterando assim algumas dimensões que acabavam por não se adequar ao modo de encaixe. Para efeitos práticos, ignora-se agora a parte superior, que envolve a tampa, a válvula de entrada da água, o sensor ótico, a ponta que lá estará para o limpar, para apenas direcionar o foco na parte que apenas diz respeito ao caso de estudo II.

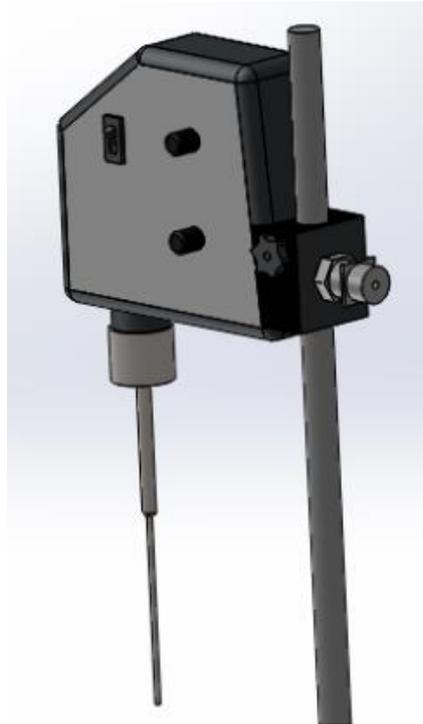


Figura 54: Aparelho ultrassónico preso a uma haste de suporte

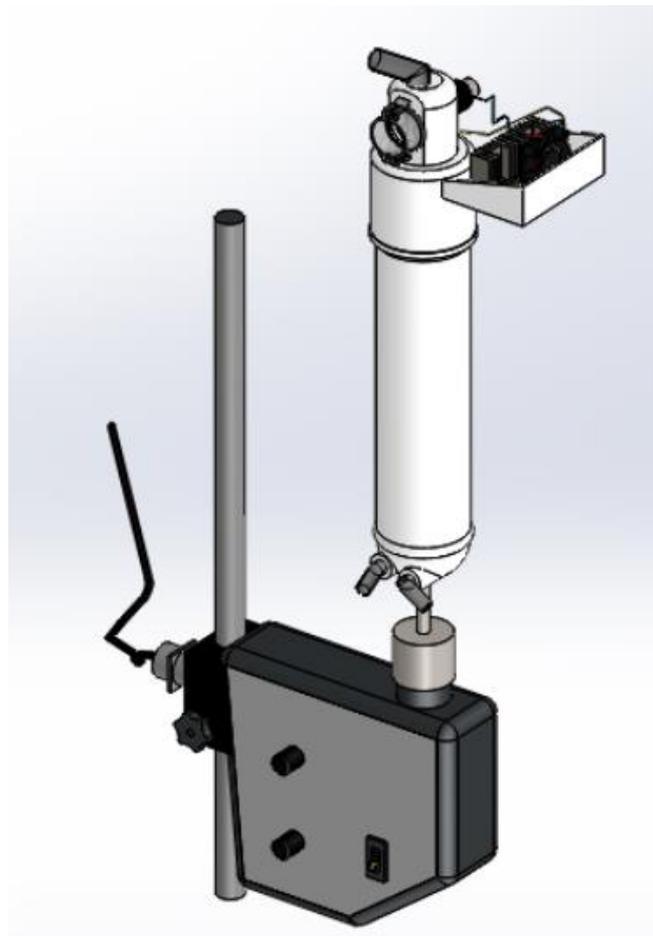


Figura 55: Equipamento colocado com o sonotrodo voltado para cima introduzido no casing

Nas figuras 54 e 55, é possível verificar como é pretendido que seja colocada a ponta ultrassónica de forma a efetuar a limpeza. Na seguinte secção do presente capítulo será explicada de que forma é que esta proposta se localiza e como é feita a atuação para que remova eficazmente o biofilme presente na membrana de ultrafiltração situada no interior do casing.

5.4. Montagem do circuito final e explicação do seu modo de funcionamento

Pretende-se que o utilizador do equipamento inerente a este projeto possa controlar quando quer efetuar a limpeza a partir de um botão que estará à disposição no sistema. A ideia passa por existir um motor cujo sentido de rotação esteja relacionado com a subida/descida de uma haste extensível e conseqüentemente do aparelho ultrassónico, e um controlador localizado do lado exterior da caixa, com um programa previamente carregado no mesmo.

Na parte superior da caixa, encontra-se uma parte da haste que está fixa, como é possível verificar através da figura 56, enquanto que a restante haste se encontra repartida em diversas camadas que estarão em concordância com o número de passos que serão necessários para fazer a subida e descida do aparelho ultrassónico, através do motor.



Figura 56: Representação do suporte do aparelho ultrassónico com haste extensível

Na Figura 56, do lado esquerdo está a imagem de um suporte com uma haste extensível por camadas enquanto que do lado direito mostra essa haste presa ao ultrassom. Note-se que não se encontra representado na figura o sonotrodo.

Em suma, e de forma um pouco redutora, o funcionamento deste mecanismo de atuação acaba por ser iniciado quando um botão é ligado, entrando assim em funcionamento o programa. O ultrassom parte de uma posição baixa, que é a sua posição inicial que lhe dará uma folga para subir e introduzir na totalidade todo o sonotrodo de modo a ser mais eficaz o efeito de propagação de ondas reproduzido no interior do casing.

A figura que se segue ilustra o aparelho ultrassónico na fase final do seu deslocamento vertical, onde a localização do sonotrodo emitirá então a vibração no interior do casing, cheio de água, que fará com que o biofilme depositado se liberte.

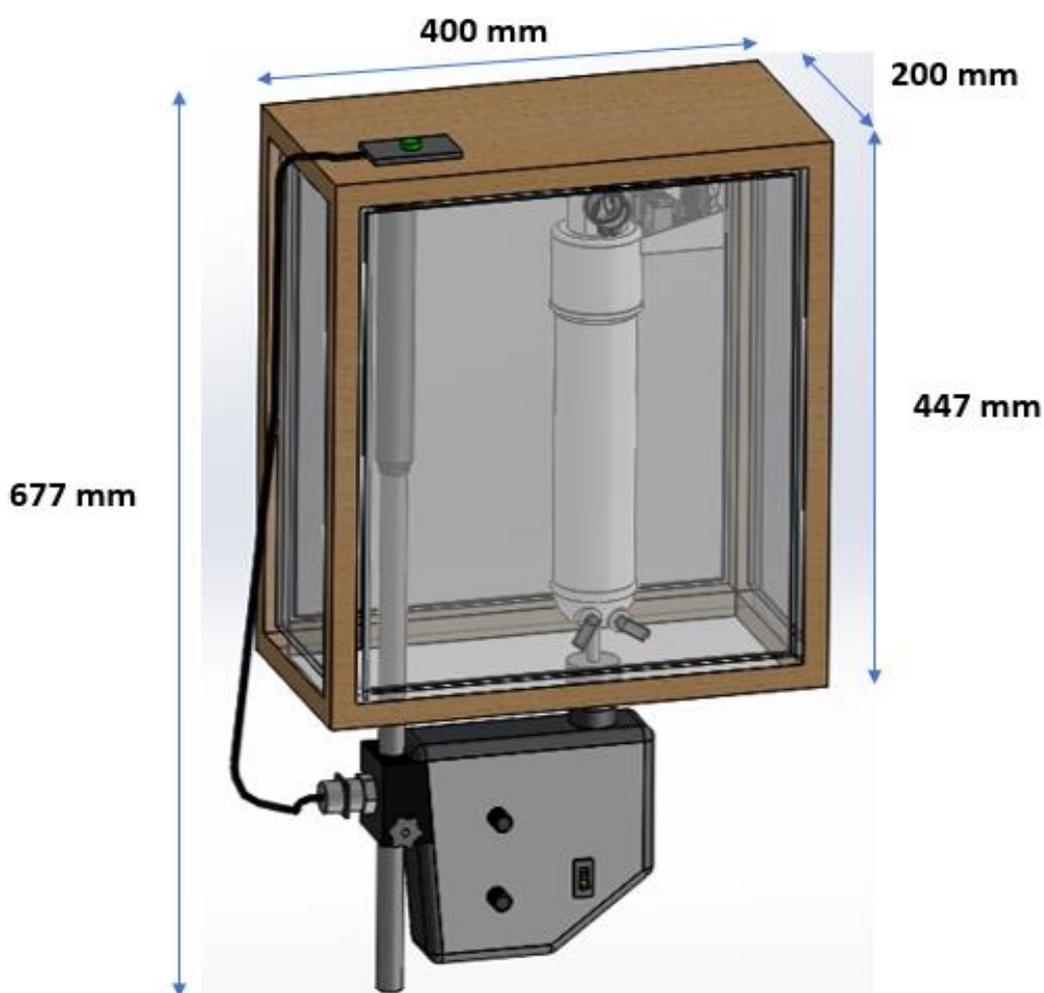


Figura 57: Resultado final da montagem de todo o circuito bem como a caixa de proteção envolvente

Foi concebida uma caixa envolvente para todo o processo por 2 razões, sendo a principal para servir como uma caixa de proteção de som. Uma potência elevada como a presente neste equipamento de ultrassom, gera a cavitação que acarreta um barulho intenso e indesejável e por esse motivo a utilização de uma proteção envolvente irá reduzir o efeito sonoro. Outro dos motivos e menos importante, trata-se mais em termos de conveniência. Todos os todos os processos envolvidos neste sistema, bem como as peças utilizadas, exigem que lhes seja confinado um espaço próprio para tudo se desenrolar e como tal, a ideia de poder ter tudo compactado dentro de uma caixa que poderá estar presa ou segura a algo, foi outro fator de decisão a ter em consideração.

Após feita toda a instalação das componentes, deve ser aberta a válvula de esfera de entrada, fechar a que é destinada à passagem de água purificada e a drenagem e deixar encher o compartimento todo com água. Quando o mesmo ficar cheio, o pequeno botão situado no controlador, no exterior da caixa da proteção de todo o sistema irá ativar não só o mecanismo da extensão da haste como também irá em simultâneo ligar a máquina que irá emitir as ondas ultrassónicas, sem que o mesmo exija que seja ligado manualmente. Como numa fase inicial o aparelho ultrassónico estará numa posição em baixo, após a ativação no botão, a haste extensível irá recolher gradualmente com pequenos intervalos para efetuar uma limpeza em várias zonas de toda a membrana. Após chegar à altura máxima, o efeito é revertido e a haste extensível volta novamente à posição inicial ficando o máximo esticada para baixo. Todo o processo em si deve ser feito cerca de 3 vezes, mas o próprio programa deverá ter já isso incorporado, para que não seja necessário o utilizador deste equipamento ter que pressionar o botão mais que uma vez para fazer a mesma limpeza. A necessidade de ter que se repetir o processo prende-se com o facto de que numa primeira passagem as ondas ultrassónicas ao embaterem nas fibras poderão fragilizar a aderência do biofilme presente e com uma nova passagem mais facilmente irá remover. Uma terceira e última passagem à partida assegurará uma limpeza eficaz.

Após o processo realizado, deve-se abrir a válvula de drenagem para que a água suja seja retirada e de seguida fechada para se poder dar novamente início ao processo de filtragem. De notar que durante todo o processo, a ponta ultrassónica estará introduzida no interior do casing sem que isso se torne inconveniente com fugas de água nem com constrangimentos por estar presente um objeto perto da membrana. Não haverá qualquer tipo de problema uma vez que durante todo o processo normal da purificação da água que irá estar a decorrer, o aparelho ultrassónico estará movido para uma parte inferior sem que haja qualquer tipo de interferência. Este UP200S presente e proposto no atual projeto, conforme anteriormente mencionado, pode ser utilizado tanto manualmente como de forma

automática. Uma vez que o sistema exige que seja feita uma limpeza regularmente de forma automática, é importante que seja suportada de forma a que sempre que seja solicitada a sua atuação, se encontre preparado para poder emitir através da sua potência e frequência as ondas ultrassónicas. É um ótimo dispositivo que se adequa bastante bem a aplicações que envolvam ultrassons de pequena e média escala, sendo este um deles. Este equipamento em particular tem a possibilidade de se poder ajustar um sonotrodo que pode variar entre 1 e 40 milímetros sendo que o último transmite as ondas ultrassónicas através de uma superfície maior e assim adequado a tarefas de limpezas mais vastas. Quanto aos mais pequenos, são utilizados por norma em situações mais complexas onde existem restrições em termos de espaço, sendo também eficazes na limpeza feita. Importante é também salientar que os sonotrodo são peças que integram os sistemas de ultrassom e que têm a função de transferir a energia vibratório do transdutor (composto por material piezoelétrico) para a peça pretendida. São feitos à base de titânio e não levanta nenhum problema estando colocado em contacto com a água. Encontram-se sonotrodo no mercado sob 3 formas geométricas, sendo elas a exponencial, cónica e a cilíndrica.

Para a atual proposta, trata-se da utilização de um sonotrodo sob a forma cilíndrica, onde através da sua forma, as ondas ultrassónicas não só se propagam longitudinalmente, ou seja, no sentido do eixo da ponta, como também se propagam um pouco para os lados. Será possível reajustar o tamanho do sonotrodo de modo a que quanto maior for a sua área, maior o foco de propagação e mais penetrante será, embora haja o problema de as fibras por estarem muito coesas servirem como barreira para que a ponta suba, através da haste extensível, livremente.

Toda esta proposta envolve também uma condição importante para o bom funcionamento do mesmo. A qualidade da água de entrada se for muito má e estiver suja com diversas substâncias e partículas, irá influenciar a capacidade de fluxo da água. Assim sendo, é recomendável que se proceda a uma instalação de pré-filtragem adequada de forma a que a água antes de passar por este novo sistema, seja limpa e retirada a maior sujidade possível, caso contrário as macromoléculas poderão vir a bloquear as fibras ocas da membrana. A membrana de ultrafiltração é composta por poliacrilonitrila, sendo este um polímero sintético obtido a partir da polimerização de nitrila de acrílico

5.5. Balanço final das propostas

Sendo o título deste projeto: “Piezoelétricos para limpeza de sistemas de tratamento de água”, talvez fosse expectável a incorporação de um atuador piezoelétrico em ambos os casos de estudo. A solução proposta para ambos, recorrendo a um equipamento ultrassónico de diferentes dimensões e exigências, envolve o uso no seu transdutor de materiais piezoelétricos e esta acaba por ser uma forma mais eficaz para resolver o problema para este trabalho em concreto.

Relativamente ao casing do sensor ótico, 1º caso de estudo, o uso de um atuador piezoelétrico diretamente em contacto com o casing de modo a fazê-lo vibrar fazendo com que libertasse o biofilme seria o ideal, porque não se teria que fazer grandes ajustes, no entanto isso poderia trazer problemas pois ao fazer vibrar o casing, poderia afetar alguma componente eletrónica, por estar quase em contacto direto com ele. Surge assim a ideia da incorporação de um equipamento ultrassónico com bases de materiais piezoelétricos, já existente no mercado, que facilmente pode ser adaptado às condições impostas sem que haja grandes complicações. De realçar que a consideração da ponta ultrassónica usada para efeitos de proposta a nível de desenho, não significa que tenha que ser aquele em específico, até porque através dos ensaios não foi possível replicar o efeito pretendido, dadas as condições impostas. Serve então apenas para ilustrar uma solução possível que exista no mercado e que possa corresponder em termos de dimensões ao que é pretendido. No atual mercado existem diversas soluções que podem ser utilizadas, sendo que para que possa funcionar, serão necessárias condições similares às que foram usadas no equipamento ultrassónico UP200S da Hielscher, mesmo que para isso seja necessário fazer novamente alguns reajustes no casing para suportar a ponta. Verificou-se que é necessário algo que possua uma potência a rondar os 150 e os 200W e com uma frequência entre os 25 e os 40kHz.

Relativamente à membrana de ultrafiltração, 2º caso de estudo, dadas as dimensões que possui, a utilização neste caso de um equipamento ultrassónico acaba por ser o mais vantajoso até porque com a utilização de água como meio de propagação, facilita bastante o trabalho. Através dos ensaios laboratoriais verificou-se que o uso do equipamento ultrassónico UP200S, remove eficazmente sujidades agarradas às superfícies. Tendo em conta os ensaios feitos, foi adotado um sistema como o que foi explicado anteriormente na secção anterior, onde através da haste extensível é possível fazer mover, subindo e descendo a ponta ultrassónica, de forma automática e efetuar a limpeza necessária no interior do casing, atacando a membrana de ultrafiltração.

Um dos pontos fundamentais deste trabalho prende-se com o termo “piezoelétrico”. No estado de arte, foi explicada a importância que tem o tipo de material piezoelétrico, devido à capacidade de resposta que o mesmo tem e ao longo dos ensaios que foram realizados, utilizaram-se três diferentes equipamentos ultrassónicos e em todos eles, o piezoelétrico é o mesmo: titanato de zirconato de chumbo, mais conhecido por PZT. É um dos materiais piezoelétricos mais utilizados no mercado, por possuir excelentes propriedades e está disponível em imensas aplicações, desde atuadores a equipamentos de ultrassom e a muitos outros.

O primeiro equipamento ultrassónico utilizado foi o Sono Swiss 6H, cuja potência é de 550W e a frequência é de 37kHz. O segundo foi a ponta ultrassónica UP200S da Hielscher, com uma potência de 200W e 24kHz. Por fim, foi usada como prova de conceito uma pequena ponta ultrassónica, encomendada do site da marca American Piezo [30], onde esta tem uma potência de apenas 8W e uma frequência de 50kHz. É possível estabelecer aqui algumas relações e perceber o impacto que todas elas tiveram nos resultados dos ensaios. Começando por aquela que se encontra colocada na proposta referente ao caso de estudo II, UP200S que se verificou de diferentes formas o seu modo de atuação, sendo um bom exemplo a ter em comparação. Seria de esperar que a do Sono Swiss 6H, que tem quase o triplo da potência e um pouco mais de frequência em relação à da Hielscher tivesse de imediato um impacto maior. Não o teve por se tratar de um tanque em que a propagação das ondas é dada numa área mais distribuída, ou seja, como não é focalizada, o efeito acaba por se dispersar um pouco, não atuando tão eficazmente na superfície dos casos de estudo. Quanto à pequena ponta ultrassónica, esta tal como já foi dito, serviu sobretudo como um objeto de estudo de modo a poder chegar a uma proposta de solução para a limpeza do casing do sensor ótico. Apesar de ser também uma ponta focalizada, acaba por não ser eficaz devido à pouca potência que possui, embora a frequência emitida até seja o dobro da UP200S. Assim, consegue-se retirar daqui que fatores importantes para a obtenção de resultados em limpezas mais específicas, dentro da gama ultrassónica, são a potência e o facto de serem focalizados (apontados ao foco de ação).

Juntando esta análise anterior face aos ensaios realizados e ao estudo realizado no estado de arte em relação aos materiais piezoelétricos e o seu papel, a ter que se optar por um, seria o PZT.

Feita a proposta final quanto aos dois casos de estudo e de que forma é que os mesmos podem ser limpos, é importante salientar um pequeno pormenor que se deve ter em consideração, após terem sido realizadas as experiências no laboratório. As limpezas

iniciaram-se primeiro com as amostras do filtro de polipropileno, que possui uma superfície porosa e difícil para remover o biofilme, sendo que depois, quando as condições na superfície do casing do sensor ótico se iam desenvolvendo, evidenciou-me uma clara dificuldade em remover o biofilme das superfícies porosas do filtro de polipropileno. Esse facto levou a pensar que numa solução futura, a incorporação de uma ponta ultrassónica nesse sistema não deveria ser apenas só como uma medida de limpeza, tal como foi apresentado como propostas anteriormente, mas sim também como um mecanismo de prevenção. Sabe-se que uma comunidade biótica não cresce de um momento para o outro, pois existem determinados fatores que sendo os mais adequados, podem acelerar o seu processo de formação e crescimento. Assim, a ideia de ter a atuação ultrassónica em intervalos de tempo menores do que aqueles previstos só para efetuar a limpeza, poderia prevenir a sua formação e assim, chegando o momento de efetuar a limpeza mais profunda, as ondas ultrassónicas removeriam com maior facilidade o biofilme. A prevenção, faria com que fosse adiada a formação de condições para se instalarem nas paredes quer do casing do sensor ótico, quer da membrana de ultrafiltração. Portanto, esta medida seria algo a ser implementada não só à limpeza feita do casing como à da membrana de ultrafiltração, embora na primeira, o foco da ponta seja mais exato e dificilmente deixará algum resto de biofilme na superfície.

6. Conclusão

Como mote do presente projeto foi apresentada a possibilidade de incorporação de piezoelétricos para limpeza de sistemas de tratamento de água utilizadas pela Bosch Termotecnologia. Em concreto, foram entregues dois casos de estudos para se fazer um estudo e uma consequente proposta de uma limpeza nas suas superfícies face ao aparecimento de biofilme, através de qualquer tipo de ação piezoelétrica.

Foram estudadas várias opções, acabando por se chegar à conclusão de que a limpeza seria feita por equipamentos ultrassónicos. Estes têm no seu transdutor, que converte a energia elétrica em mecânica, uma base piezoelétrica que possui boas propriedades, podendo tornar o processo bastante eficaz.

Depois de percebidas as especificações de cada caso de estudo, começou por se fazer ensaios experimentais com alguns dos equipamentos ultrassónicos disponíveis, em algumas das amostras que continham biofilme para obter resultados e posteriormente fazer-se a proposta final de todo o sistema.

Tendo em conta as dimensões do atual sistema para análise deste estudo bem como das suas condições de funcionamento, foi proposto assim, a incorporação para os dois casos de estudo, de duas pontas ultrassónicas de diferentes tamanhos.

Dado o tempo disponível para a realização deste projeto, apenas foi conseguido testar o funcionamento de uma dessas pontas ultrassónicas e a criação de condições de biofilme para um dos casos de estudo. Para auxiliar na proposta, fez-se um modelo recorrendo a um sistema CAD, de forma a perceber todo o funcionamento do sistema. Com este modelo foi possível fazer alguns ajustes de forma a colocar as pontas ultrassónicas incorporadas corretamente e ainda de ficar com a ideia proposta representada para posteriormente se fazer um protótipo e validar o seu conceito.

Através dos ensaios realizados foi-se verificando a necessidade de se ter que utilizar o fenómeno de ultrassons de uma forma focalizada e não dispersa, pois só assim é que é possível remover eficazmente pequenos detalhes nas superfícies. Verificou-se, pelo menos para o casing do sensor ótico, que a ação de limpeza deverá ter que ser realizada sob ação de um equipamento ultrassónico com uma ponta focalizada e com condições de operação a rondar os 25kHz e os 200W.

Ainda referente ao estado de arte, percebeu-se que dos vários materiais piezoelétricos presentes no mercado, aquele que se sugere mais prático e mais apropriado para ações de limpeza ultrassónica como esta, é o PZT.

Posto tudo isto, conclui-se que é possível a incorporação de equipamentos ultrassónicos, sem comprometer o resto do funcionamento do atual sistema. A otimização da implementação desta proposta nos sistemas pretendidos pela Bosch Termotecnologia, nomeadamente a nível de custos de aquisição de equipamentos, poderá passar por alguns modelos de simulação que auxiliem na escolha dos equipamentos certos e que exigem o mínimo de condições impostas para poderem ser 100% eficazes no combate ao biofilme nas superfícies dos casos de estudo.

7. Trabalhos Futuros

Em trabalhos futuros, seria importante utilizar uma outra ferramenta que pudesse ajudar a comprovar as ideias propostas: simulação. Existiram alguns problemas com tentativas em simular e retratar as condições reais, um pouco devido à inexperiência nessa área, mas para além disso também ao grau de dificuldade em replicar na íntegra o atual problema. Existem vários pormenores a ter em conta para os poder ter em consideração na simulação, começando desde logo pelo biofilme. O biofilme pode estar disposto em várias formas e com diferentes formas de adaptação às superfícies e no caso em concreto deste projeto, não se sabe ao certo como é que eles estariam dispostos em ambos os casos de estudo. Seria bastante complicado estar a definir todas estas variantes num modelo de simulação e tentar obter uma conclusão exata.

Embora os ensaios experimentais tenham sido considerados satisfatórios, não foi possível criarem-se condições de formação de biofilme num dos casos de estudo. Dado os prazos que houve, não foram testadas novas formas de criação de outras condições, no entanto seria importante para trabalhos futuros tentar perceber e experimentar outras formas, para se poderem observar outro tipo de resultados.

Foram realizados ensaios recorrendo a três tipos de equipamentos ultrassónicos, como foram demonstrados em anteriores capítulos e verificou-se que, pelo menos num deles, a sua atuação foi muito eficaz, acabando por ser considerada para uma medida de proposta como solução para um dos casos de estudo. No entanto, na realidade, o ideal seria apenas utilizar o que fosse necessário para remover o biofilme das superfícies e aqui entra novamente a parte da simulação que seria uma ótima ferramenta para determinar exatamente as condições que teriam que ser impostas no ultrassom para poder atuar eficazmente, mas claro que para isso também se teria que ter o biofilme bem caracterizado, o que não foi o caso.

Devido à falta de oportunidade de pesquisar um pouco mais sobre a membrana de osmose inversa, que nunca esteve nos planos de trabalho, seria interessante perceber em trabalhos futuros se a utilização de ultrassons seria eficaz na remoção de partículas e biofilme no interior da mesma. Lembra-se que se trata de uma peça muito compacta, que impede a passagem de qualquer corpo no seu interior e que por isso seria interessante verificar se através da emissão de ondas vibratórias direcionadas para a membrana se seria ou não eficaz. Com base nos ensaios experimentais realizados, percebeu-se as condições de operação de um aparelho de ultrassom e que muito dificilmente se obteria algum resultado desta forma. Assim, seria recomendável que se começasse desde logo

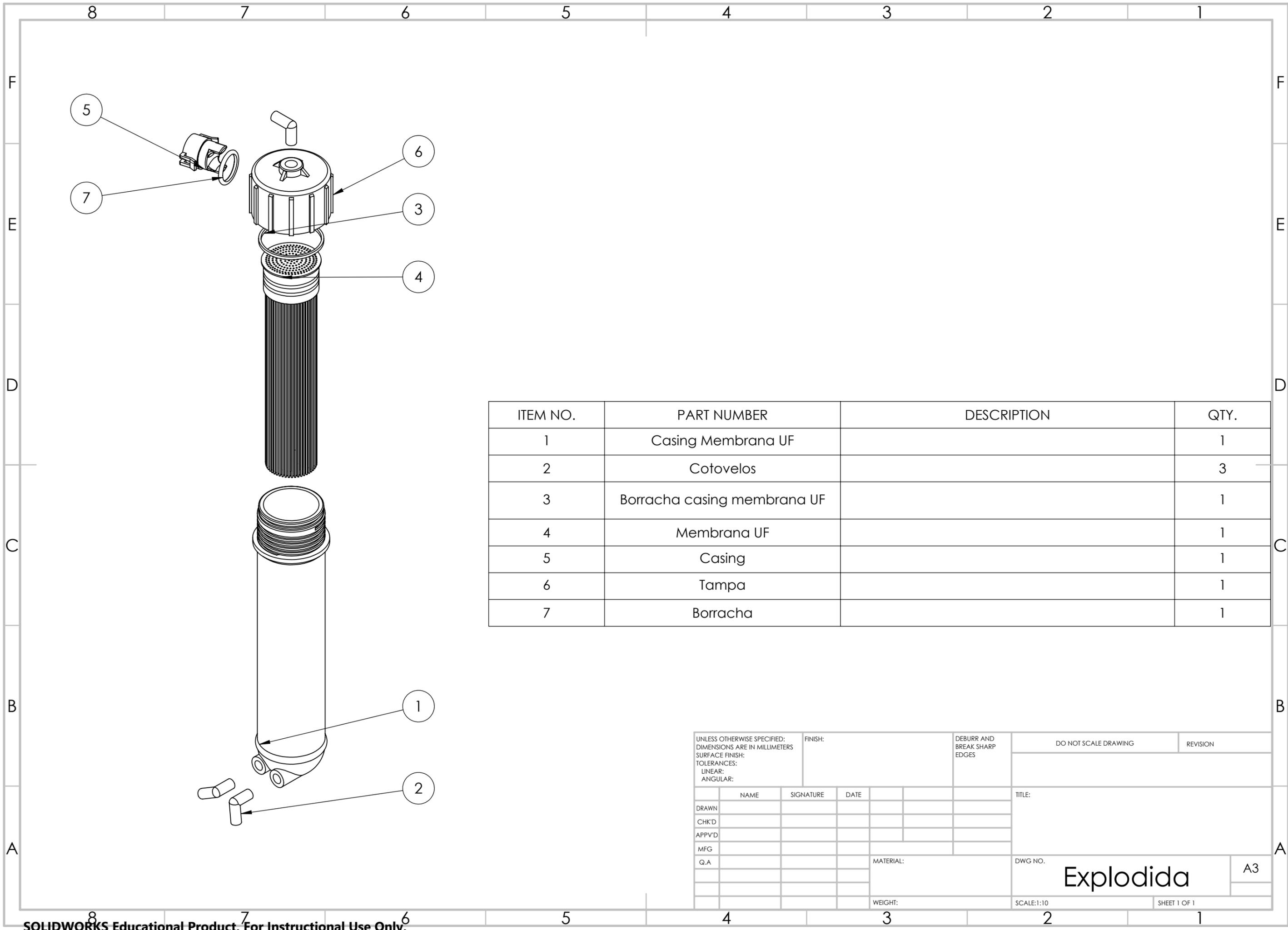
por verificar se efetivamente causa ou não impacto, para perceber o tipo de potência e frequência que teriam que ter para gerar qualquer tipo de resultado.

8. Referências

- [1]: Davey, M.E. & O'toole, G.A. (2000) Microbial Biofilms: from Ecology to Molecular Genetics. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 64, 847-867.
- [2]: Schneider, R.P (2007). Biofilmes Microbianos. *Microbiologia em Foco*, 1(2), 4-12.
- [3]: Simões, L. C. & Simões, M. (2013). Biofilms in drinking water: problems and solutions. *RSC Advances*, 3, 2520–2533.
- [4]: Simões, L. C. (2012). *Biofilms in drinking water: formation and control: Microbial interactions on biofilm formation by drinking water autochthonous microorganisms*. LAP LAMBERT Academic Publishing.
- [5]: Allison, D.G., & Sutherland, I.W. (1987). The role of exopolysaccharides in adhesion of freshwater bacteria. *Journal of Genetic Microbiology*, 133, 1319-1327.
- [6]: Branda, S.S., Vik, A., Friedman, L. & Kolter, R. (2005). Biofilms: the matrix revisited. *Trends in Microbiology*, 13, 20-26.
- [7]: Damjanovic, D. (2005). Hysteresis in Piezoelectric and Ferroelectric Materials. In G. Bertotti, I. Mayergoyz, I. (Eds.), *The Science of Hysteresis*. (pp.337-452). San Diego, California: Academic Press.
- [8]: Ledoux, A (2011). *Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- [9]: Vilarinho, P. M (2005). Piezoelectrics, Pyroelectrics, Ferroelectrics, Incipient Ferroelectrics, Ferroelectric Relaxors, Applications. *World*, 3-33.
- [10]: Haertling, G.H. (1999). Ferroelectric ceramics: history and technology. *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4), 797–818.
- [11]: Rafiq, M. A. (2014) *Electromechanical Properties of Engineered Lead Free Potassium Sodium Niobate Based Materials*. University of Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [12]: Jaffe, B. (1971). *Piezoelectric Ceramics*. *Piezoelectric ceramics*. London, England: Academic Press.
- [13]: Ribeiro T. J. V. (2017), *Acoplamento de atuadores eletromecânicos a válvulas de esquentadores*. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- [14]: Jaffe, B. Cook Jr, W.R. Jaffe, H. (1971), *Piezoelectric Ceramics*, Academic Press London and New York.
- [15]: Moulson, A., Herbert, J (2003). *Eletroceramics*. West Sussex, England: Wiley.
- [16]: Roberto, P., Carvalho, B. De, Jorge, P., & Marcos, B. (2010). *Construção e caracterização de um atuador piezocerâmico*. Boletim Técnico da FATEC-SP, 10–14. Retirado de <http://bt.fatecsp.br/system/articles/870/original/artigo81revisado-formatado.pdf>

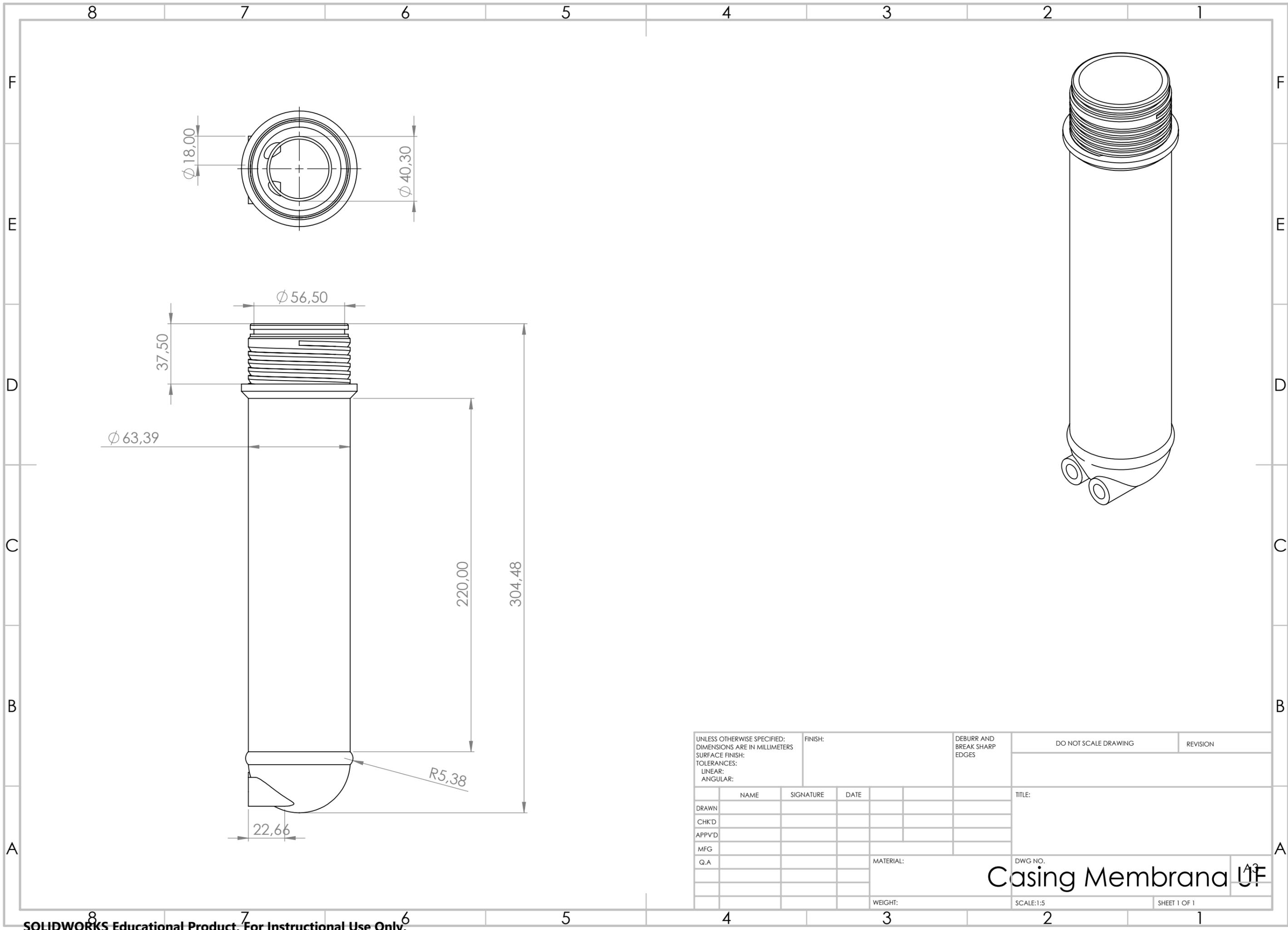
- [17]: PI Piezo Technology, Piezoelectrics in Positioning – *Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications*. Retirado a 23/04/2019 de https://static.pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/technotes_whitepapers/2009_PI_Piezo_University_Designing_with_Piezo_Actuators_Tutorial.pdf
- [18]: Physik Instrumente, (2008), Piezoelectrics in Positioning. *Tutorial on Piezotechnology in Nanopositioning Applications*.
- [19]: Holterman, J., Groen, P. (2013). *An Introduction to Piezoelectric Materials and Applications*, Stichting Applied Piezo
- [20]: Ultrassound (n.d). In Wikipedia. Retirado a 28/04/2019, de <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ultrassom>.
- [21]: Hielscher Ultrasound Technology, *UP50H – Compact Lab Homogenizer*, Retirado a 24/03/2019 de https://www.hielscher.com/50h_p.htm
- [22]: Hielscher Ultrasound Technology, *Homogenizers for Liquid Processing*. Retirado a 24/03/2019 de <https://www.hielscher.com/ultrasonic-homogenizers-for-liquid-processing-3.htm>
- [23]: AG sonic, Multiple Stage Industrial Ultrasonic Cleaning Machine, Automated Ultrasonic Bath. Retirado a 15/07/2019 de <http://www.ultrasonic-cleaningmachine.com/sale-11182470-multiple-stage-industrial-ultrasonic-cleaning-machine-automated-ultrasonic-bath.html>.
- [24]: Sono Swiss, *High Quality Ultrasonic Systems*. Retirado a 22/05/2019 de <https://www.sonoswiss.ch/reinigungsgeraete/sw-line/sw-6-h-575-liter>
- [25]: Ozonak, J. (2012). *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*. Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema.
- [26]: Gomes, M.S. (2015). *Cavitação hidrodinâmica para tratamentos de águas*. Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.
- [27]: Gogate, P.R., & Kabadi, A.M. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44(1), 60-72.
- [28]: Hielscher Ultrasound Technology, *UP200H/UP200S – Ultrasonic Power para o Laboratório*. Retirado a 24/03/2019 de https://www.hielscher.com/pt/200s_p.htm
- [29]: APC International, Ltd, *APC 4SS-1550 Transducer & Power Supply*, Retirado a 25/5/2019 de https://www.americanpiezo.com/images/stories/content_images/pdf/apc_90-5010.pdf
- [30]: www.americanpiezo.com (consultado a 25 de maio de 2019)

9. Anexos

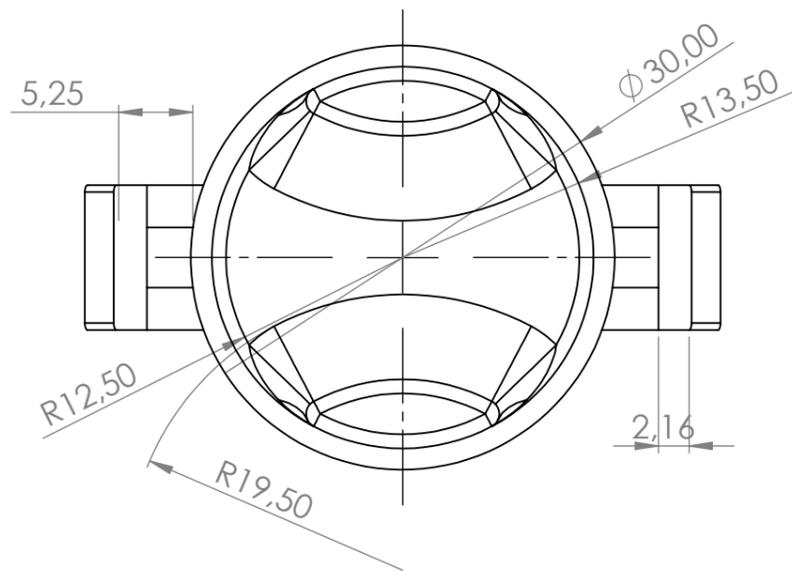
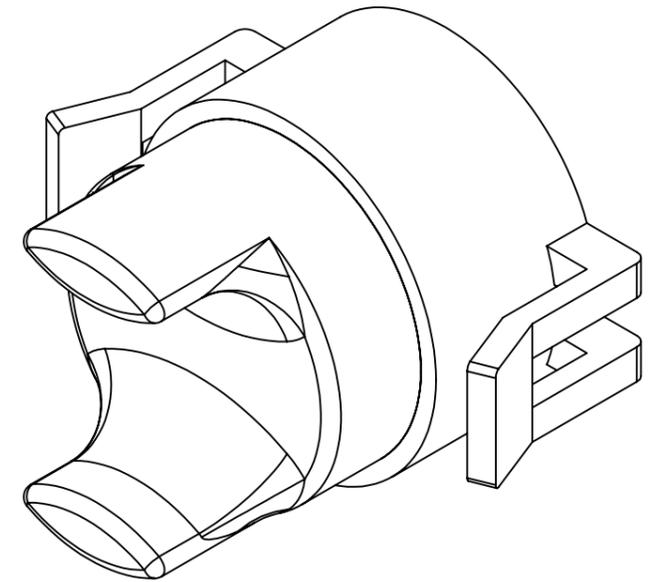
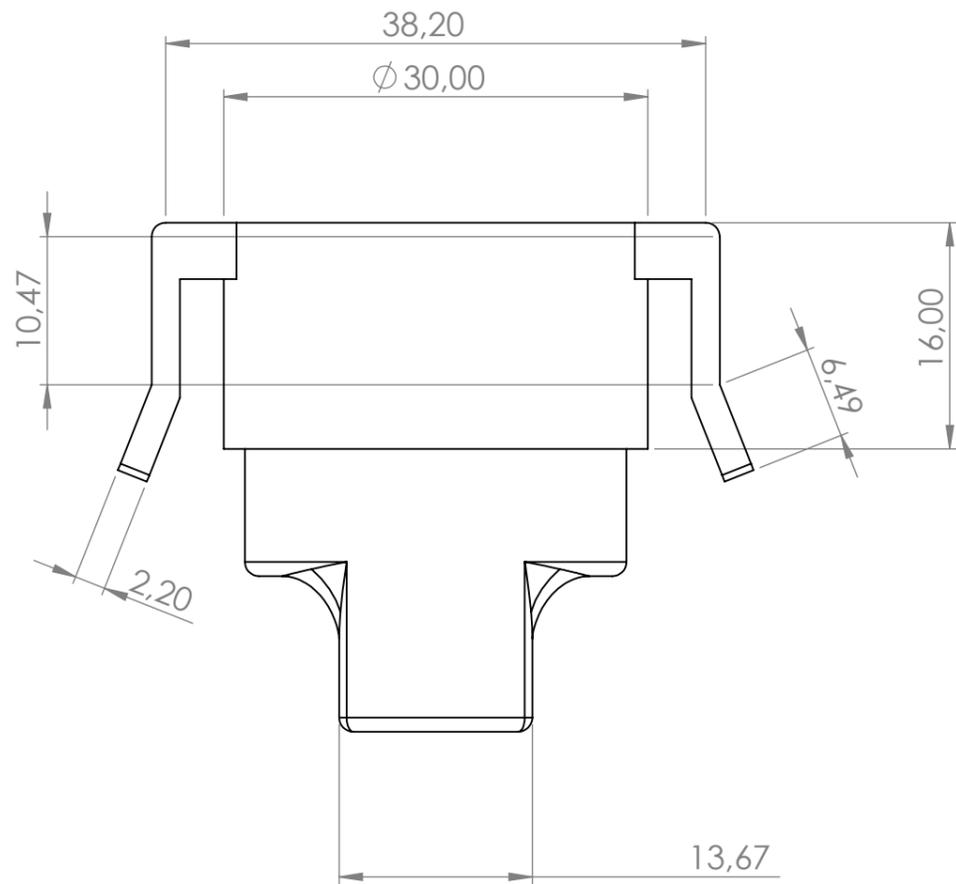


ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Casing Membrana UF		1
2	Cotovelos		3
3	Borracha casing membrana UF		1
4	Membrana UF		1
5	Casing		1
6	Tampa		1
7	Borracha		1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION		
DRAWN			NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:		
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A							MATERIAL:		DWG NO.		
									Explodida		
							WEIGHT:		SCALE:1:10		
									SHEET 1 OF 1		
									A3		

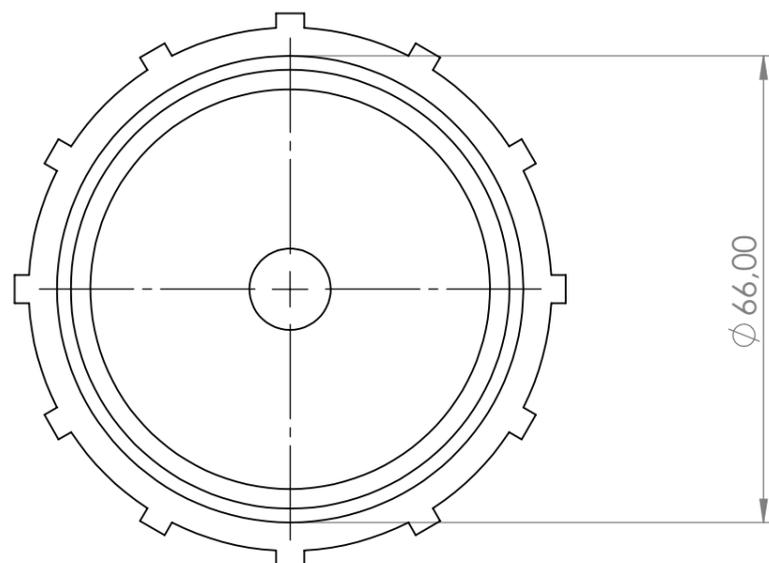
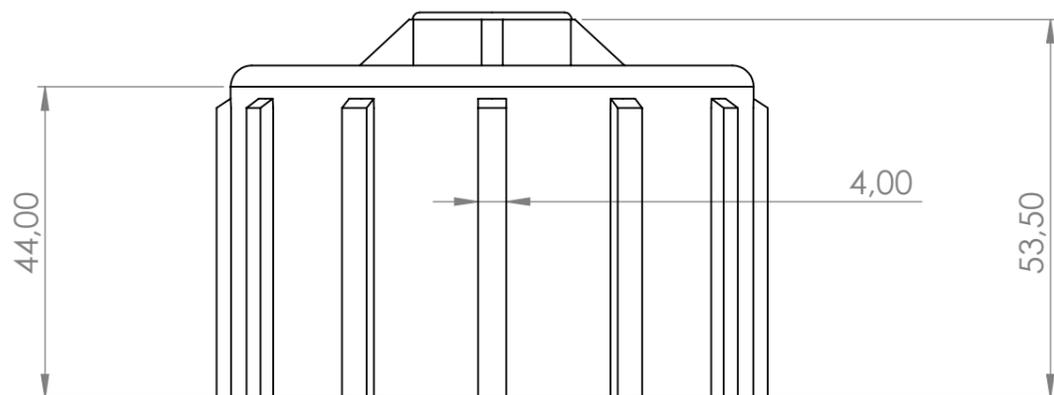
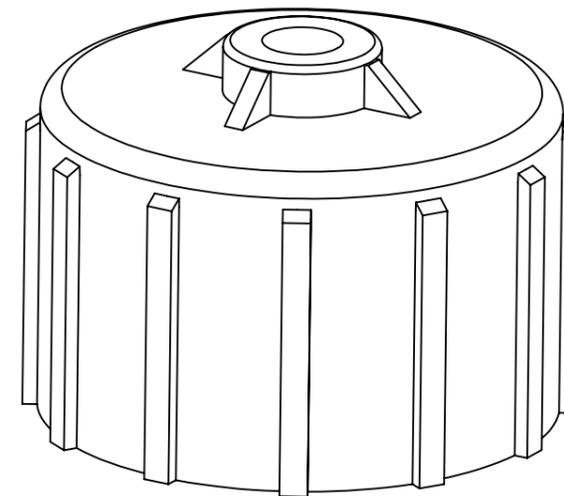
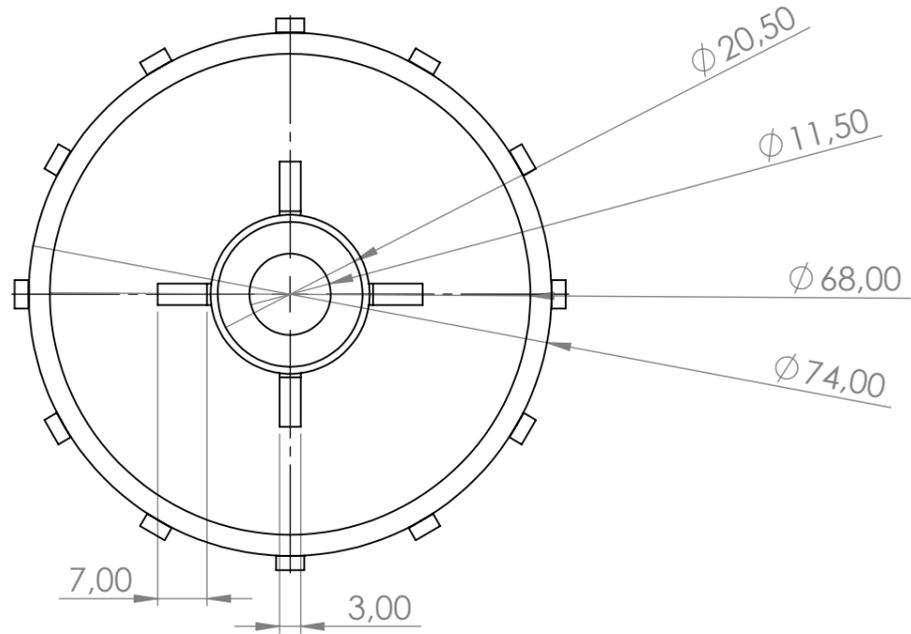


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN				NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:	
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A								MATERIAL:		DWG NO.	
										Casing Membrana UF	
								WEIGHT:		SCALE:1:5	
										SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN						TITLE:					
CHK'D											
APPV'D											
MFG											
Q.A						MATERIAL:		DWG NO.		A3	
						WEIGHT:		SCALE:2:1		SHEET 1 OF 1	

Casing



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:			FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
					TITLE:							
					MATERIAL:					DWG NO.		A3
					WEIGHT:					SCALE:1:1		SHEET 1 OF 1

Tampa