



Centro Universitario de la Defensa
En la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Aplicación de ultrasonidos para limpieza de armamento

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Sergio Puga Formigo

DIRECTOR: Rocío Maceiras Castro

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa En la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Aplicación de ultrasonidos para limpieza de armamento

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval

UniversidadeVigo

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es el estudio práctico de la validez de uso de la técnica de baño por ultrasonidos, concretamente aplicada a la limpieza de armamento además de un análisis de su viabilidad y funcionalidad.

El proyecto comprende una descripción completa de la técnica de baño por ultrasonidos desde los principios físicos por los que se rigen las ondas ultrasónicas, las formas de aplicación más extendidas y sus métodos de uso más conocidos.

El cuerpo del proyecto se focaliza en la aplicación del baño ultrasónico para la limpieza de armamento según cuatro métodos diferenciados. En cada método se utilizan soluciones limpiadoras diferentes, tanto comerciales como no comerciales, con el objeto de buscar cual consigue mejores resultados en lo que a limpieza de restos de suciedad tales como inquemados de pólvora y.

Se han llevado a cabo varios ensayos encuadrados en 4 métodos prácticos diferenciados. En el primero de ellos se usa aceite sintético para armas VV-L-800 como solución limpiadora. En el segundo y el tercero se usan las soluciones comerciales ULTRASONIC-A y ULTRASONIC-7 y por último, en el cuarto método, se usan dos soluciones a partir de vinagre y un desengrasante doméstico comercial. En todos los métodos las piezas a limpiar se sumergen en el baño ultrasónico en un recipiente aislado, es decir al “Baño María”, exceptuando el tercer método de ensayo, en el que las piezas se sumergen directamente en el baño. En base a los resultados obtenidos se determinará cual es el método más adecuado para la limpieza de armamento y una comparación final con el método manual para comparar su validez y la diferencia de costes entre en método y otro

PALABRAS CLAVE

Armamento, Ultrasonidos, Limpieza, Baño, Pólvora

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que siempre confiaron en mí.

A mi tutora por saber guiarme por el buen camino y tener paciencia conmigo,

Al departamento de Infantería de Marina por su apoyo e interés,

A todos los que trabajan en el Pañol de Condestable por su ayuda y disponibilidad,

Al AF Estarellas Perales por sus ánimos e incansable ayuda

Y a Todos los que se interesaron por este proyecto en algún momento,

Va por vosotros

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	4
1 Introducción y objetivos	11
1.1 Generalidades.....	11
1.2 Definición del problema.....	12
1.3 Importancia y justificación del proyecto	12
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Objetivo general.....	13
1.4.2 Objetivos específicos	13
1.5 Alcance.....	13
1.6 Historia.....	14
1.7 Aplicaciones.....	15
1.7.1 Aplicaciones generales:	15
1.7.2 Aplicaciones del lavado ultrasónico	17
1.8 Riesgos debidos a la utilización de ultrasonidos en el laboratorio.....	19
1.8.1 Riesgos debidos a una exposición a ultrasonidos por contacto directo	19
1.8.2 Riesgos debidos a una exposición indirecta a ultrasonidos por vía aérea	19
1.8.3 Riesgos debido a las operaciones realizadas con ultrasonidos en el laboratorio	20
1.8.4 Prevención de riesgos en el manejo de generadores de ultrasonidos	20
2 Conocimientos Teóricos.....	22
2.1 Movimiento ondulatorio.....	22
2.1.1 Características de una onda mecánica	22
2.2 Sonido	25
2.2.1 Características Físicas.....	25
2.3 Ultrasonido.....	29

2.3.1 Distribución del campo ultrasónico	30
2.4 Piezoelectricidad	30
2.4.1 Efecto Piezoeléctrico	30
2.4.2 Efecto magnetoestrictivo:	31
2.4.3 Usos	32
2.4.4 Clases de transductores.....	33
2.4.5 Transductores ultrasónicos de potencia.	33
2.4.6 Transductores de potencia y aplicaciones.....	36
2.5 Principios del lavado ultrasónico	37
2.5.1 Limpieza por ultrasonidos	37
2.6 Principio de funcionamiento del lavado ultrasónico	38
2.6.1 Cavitación Ultrasónica.....	38
2.6.2 Aspectos físicos de la cavitación ultrasónica.....	39
2.6.3 . Factores en la Cavitación.....	41
2.6.4 Selección del tipo de agente de limpieza y la temperatura de trabajo	43
2.6.5 Frecuencia de trabajo	44
3 Desarrollo del TFG.....	46
3.1 Método experimental	46
3.2 Verificación del proceso	46
3.3 Equipo	47
3.4 Elementos a limpiar.....	48
3.5 Pasos Previos.....	49
3.6 Desarrollo practico	49
3.6.1 Experiencia 1	49
3.6.2 Experiencia 2	51
3.6.3 Experiencia 3	56
3.6.4 Experiencia 4	62

3.6.5 Experiencia 5	65
4 Resultados y valoración.....	73
4.1 Introduccion	73
4.2 Aceite VV-L-800-CTDS	73
4.3 Vinagre y Quitagrasas	74
4.4 Ultrasonic-07 y Ultrasonic-A al “Baño María”	75
4.5 Ultrasonic-07 y Ultrasonic-A Por inmersión total	76
4.6 Selección Final	77
4.7 Comparativa Final	77
5 Conclusiones y lineas futuras	81
5.1 Conclusiones	81
5.2 Líneas futuras	81
6 Bibliografía.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Cierre de fusil de asalto CETME L con restos de pólvora inquemada	12
Figura 2: Primera máquina de limpieza ultrasónica de la compañía Branson Ultrasonic [4]	15
Figura 3: funcionamiento de un sistema ultrasónico tipo sonar [8]	17
Figura 4: Instrumental quirúrgico siendo esterilizado en un baño ultrasónico [9].....	18
Figura 5: Daños provocados por los ultrasonidos en función de la intensidad sonora [11]	19
Figura 6: Onda mecánica sobre medio líquido [16]	22
Figura 7: Principales parámetros de una onda mecánica [18].....	23
Figura 8: Movimiento de una onda longitudinal [19]	24
Figura 9: Movimiento de una transversal [19]	24
Figura 10: Movimiento de una onda de Raleigh [20].....	24
Figura 11: Tipos de ondas según su Frecuencia [22]	25
Figura 12: Relación entre la Frecuencia de una onda y su tono [22]	26
Figura 13: Amplitud de una onda [18]	26
Figura 14: Amortiguación de una onda [15]	26
Figura 15: Frente de onda [23]	27
Figura 16: La potencia acústica (P) que atraviesa normalmente un área (A) da lugar a la Intensidad Acústica (I) [24]	27
Figura 17: Clasificación de los sonidos en función de sus frecuencias limite	30
Figura 18: Demarcación de un cristal piezoeléctrico ante una diferencia de potencial [15].....	31
Figura 19: Generación de ondas ultrasónicas a través de un transductor magnetostrictivo [15] ...	31
Figura 20: Diferentes tipos de transductores ultrasónicos piezoeléctricos [10]	33
Figura 21: Transductor magnetostrictivo laminar [10]	34
Figura 22: Diferentes transductores piezoeléctricos de disco [28].....	35
Figura 23: Conjunto de transductores piezoeléctricos conectados en paralelo [28]	35

Figura 24 Generación de ondas ultrasónicas en un transductor piezoeléctrico [29].	36
Figura 25: Esquema de un equipo de limpieza ultrasónica [9]	37
Figura 26: Esquema de funcionamiento de un equipo de limpieza ultrasónica [21].	38
Figura 27: Compresión y depresión de una onda sonora en un medio líquido [31].	40
Figura 28: Formación de una burbuja de cavitación [12].	40
Figura 29: Proceso de desgasificación ultrasónico.	43
Figura 30: Soluciones limpiadoras industriales Ultrasonic-7 y Ultrasonic-A.	44
Figura 31: Modo de trabajo de Barrido ``Sweep`` [33]	45
Figura 32: Cierre de fusil CETME L con restos de pólvora incrustados	47
Figura 33: Equipo de Limpieza ultrasónico Elmasonic 300H usado en el proyecto [34].	47
Figura 34: Despiece del Fusil de asalto CETME L (Cierre rodeado en rojo) [35]	48
Figura 35 Despiece de la pistola Star Súper B [36].	48
Figura 36 : Kit de limpieza de armamento	49
Figura 37: Comparativa de cuerpo de pistola Star antes y después de la limpieza	50
Figura 38: Comparativa del cañón de pistola Star antes y después de su limpieza.	50
Figura 39: Vista de frontal de cierre de la pistola Star antes y después de la limpieza.	51
Figura 40: Vista frontal del cierre de un fusil CETME antes y tras su limpieza.	51
Figura 41: Montaje para la limpieza a “Baño María” con aceite	52
Figura 42: Evolución de temperatura del aceite durante la limpieza	52
Figura 43: Cañón de la pistola Star antes y después de su limpieza	53
Figura 44: Manguito de la pistola Star antes y después de ser limpiado.	53
Figura 45: Micrografía de la base del manguito de la pistola Star	54
Figura 46: Cierre de la pistola Star antes y después de ser limpiados.	54
Figura 47 : Cierre de fusil CETME L antes y después de ser limpiados.	55
Figura 48: Micrografía del cierre del Fusil CETME antes y después de la limpieza.	55
Figura 49: Conjunto de filtros utilizado para el filtrado del aceite tras su uso.	56
Figura 50: Montaje para la limpieza a “Baño María “en disolución Ultrasonic	57

Figura 51: Evolución de las temperaturas de la disolución durante las pruebas	57
Figura 52: Cañón de pistola Star antes y después de ser limpiado.....	58
Figura 53: Manguito oxidado de la pistola Star antes y después de la limpieza	58
Figura 54: Imagen de microscopio Dell manguito de pistola Star antes y tras su limpieza	59
Figura 55: Cierre de pistola Star antes y después de su limpieza.....	59
Figura 56: Corredera oxidada de la pistola Star antes y después de su limpieza	60
Figura 57: Micrografías de la corredera de la pistola Star	60
Figura 58: Cierre de fusil CETME antes y después de la limpieza ultrasónica	61
Figura 59: Micrografía del cierre de CETME en antes y después de la limpieza	61
Figura 60: Filtros usados en la filtración de la disolución de Ultrasonics.....	62
Figura 61: Montaje para la limpieza a “Baño María” con disolución de vinagre	62
Figura 62: Evolución de las temperatura en la limpieza con vinagre y quitagrasas.....	63
Figura 63: Cierre de fusil Máuser antes y después de su limpieza.....	63
Figura 64: Micrografía del cierre del fusil Maúser antes y después de la limpieza	64
Figura 65: Cierre de CETME muy engrasada antes y después de la limpieza.....	64
Figura 66: Micrografía del cierre de CETME engrasado anterior a la limpieza y tras ella.	65
Figura 67: Filtros usados para el filtrado de ambas disoluciones tras la limpieza.	65
Figura 68 : Cestillo para la colocación de las piezas directamente en el baño ultrasónico.....	66
Figura 69: Evolución de la temperatura de la disolución durante la prueba	66
Figura 70: Distribución de las piezas a limpiar en el cestillo.....	67
Figura 71: Cañón de pistola Star antes y después de su limpieza.	67
Figura 72: Cañón de pistola Star de perfil antes y después del baño ultrasónico	68
Figura 73: Micrografía del cañón donde pistola antes y después de la limpieza	68
Figura 74: Empuñadura oxidada de pistola estar en su estado original y tras el lavado	69
Figura 75: Comparativa de la corredera de pistola Star antes y después del lavado	69
Figura 76: Micrografía de la corredera de la pistola Star	69
Figura 77: Pistoleta de la Pistola Star antes y después de su limpieza.....	70

Figura 78: Corredera de la pistola Star antes del lavado y después .	70
Figura 79: Micrografía de la corredera de la pistola Star.	70
Figura 80: Vista frontal del cierre de pistola Star.	71
Figura 81: Vista frontal del cierre de fusil CETME.	71
Figura 82: Imagen de microscopio del cierre del CETME.	71
Figura 83: Vista de perfil del Cierre del fusil CETME.	72
Figura 84 : Micrografía del perfil del cierre del fusil CETME.	72
Figura 85: Pieza del cierre de un fusil CETME tras ser sacada del baño ultrasónico.	74
Figura 86: Cierre de fusil Máuser tras su limpieza en la disolución a base de vinagre.	75
Figura 87: Proceso de limpieza por inmersión total	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa entre las diferentes intensidades sonoras	28
Tabla 2: Tabla comparativa de las velocidades de propagación del sonido en distintos materiales	29
Tabla 3: Evolución de una burbuja de cavitación	39
Tabla 4: Tabla de valoración de las disoluciones empleadas	77
Tabla 5: Tabla resumen de costes de limpieza	79

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Generalidades

Hoy en día existen una gran cantidad de métodos de limpieza de metales, de los cuales el que está más en alza en el mercado, es el mecanismo de limpieza ultrasónica.

Estos equipos producen un efecto conocido como cavitación ultrasónica, que es producida por la acción de las ondas sonoras de alta frecuencia sobre un medio líquido que actúa como agente limpiante. Este proyecto tiene como objeto estudiar la validez de uso del método de limpieza de armamento mediante baño ultrasónico y comprobar si presenta ciertas mejoras respecto a los métodos manuales tradicionales.

En este proyecto, aparte de los objetivos anteriormente señalados, pretender servir como una guía para futuras aplicaciones e investigaciones con tecnología de ultrasonido en el campo de la limpieza de armamento.

Durante las últimas décadas se han venido desarrollando muchos métodos para realizar una limpieza industrial de materiales, que reduzca los tiempos de operación y que arrojen resultados de alta calidad y eficiencia. De esta manera se han venido desarrollando durante los últimos años en el campo de la limpieza de objetos, métodos de limpieza mediante el uso de equipos de baño ultrasónicos.

En el aspecto militar, la limpieza de armamento se lleva realizando desde tiempos remotos de manera manual con motivo de mantener las armas en un perfecto estado de uso y de conservación y su verificación se realiza en base a un criterio visual. Por tanto se debe entender que el proceso de limpieza se llevará a cabo hasta que el usuario concluya que el arma está lo suficientemente limpia tras haber realizado una limpieza exhaustiva de dicha arma.

En el presente proyecto, la limpieza de armamento, se realizará mediante baño ultrasónico tras un previo y posterior análisis visual y al microscopio con el fin de comparar la situación previa con el grado de limpieza alcanzado. También se ha realizado la limpieza de manera manual con las herramientas disponibles para cualquier alumno Infante de Marina de la Escuela Naval Militar. Es precisamente el tiempo empleado por cualquier usuario para la limpieza de su armamento individual el que se quiere optimizar sustituyendo la limpieza manual por el baño por ultrasonido.

Por tanto, debido a que las capacidades de limpieza que otorga un equipo de baño ultrasónico son las idóneas para el tipo de suciedad que presenta el armamento como son los restos de inquemados de

pólvora, aceite mineral quemado y óxido y que son las principales causas de fallo del armamento presentes en el armamento moderno. Se elige pues este como un posible método que sustituya a la limpieza manual clásica, que aunque eficaz, requiere una mayor cantidad de tiempo.



Figura 1: Cierre de fusil de asalto CETME L con restos de pólvora inquemada

1.2 Definición del problema

La gran inversión de tiempo que necesita un cualquier usuario para limpiar su armamento es la causa que nos han llevado a ejecutar este proyecto así como para mejorar los resultados de la limpieza en sí mismo consiguiendo de esta forma, no solo realizar la limpieza en menos tiempo sino que además conseguir mejores o idénticos resultados de limpieza.

Por estas razones podemos definir el problema como:

“En la Escuela Naval Militar surge la necesidad de encontrar un método de limpieza de armamento para conseguir una significativa reducción de tiempo de limpieza con unos resultados similares. Además, el método no debe ser destructivo y debe garantizar la integridad de las armas y su correcto funcionamiento a posteriori de su tratamiento”

1.3 Importancia y justificación del proyecto

El cuidado y la limpieza de las armas evitan el 65% de sus interrupciones normales. En ello reside la importancia no sólo de implantar un método sencillo que preceptúe las acciones a efectuar en relación con el cuidado y la limpieza del armamento, sino también de mentalizar a todos los niveles del mando, para que procuren los medios que permitan un adecuado mantenimiento de la armas de una Unidad y asignen los periodos de tiempo necesarios para ello. Este proyecto se basa en la validación de la técnica de limpieza de objetos por baño ultrasónico concretamente, en su uso para la limpieza de armamento con aplicación a las armas individuales de un combatiente como método sencillo implantable alternativo al método manual [1].

Por tanto, con este proyecto se busca alcanzar unos objetivos que puedan cubrir las necesidades de limpieza de armamento propias de un alumno de Infantería de Marina de la Escuela Naval Militar, ya

que con las innovaciones que se pretenden desarrollar se puede obtener un método más eficiente y económico que los que actualmente son empleados.

Entre las principales ventajas que se puede enumerar destacamos:

- Mayor rapidez en el lavado, ya sea utilizando aceite mineral o disoluciones comerciales.
- Disminución en los gastos como así también en los costes de mano de obra en comparación con otros métodos de limpieza.
- Reducción del contacto directo del trabajo con sustancias de limpieza nocivas.
- Posibilidad de penetrar en fisuras muy pequeñas, en cavidades y en conjuntos complejos que en su mayor parte resultan “intocables” con cualquier otro medio.
- Obtención de un alto grado de limpieza ya sea como remoción de suciedades o acabado final de las piezas.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Validar el uso de un sistema automático de limpieza por ultrasonido, que permita alcanzar una reducción de tiempo de limpieza y unos resultados de calidad similares a los alcanzados en el método manual con un menor uso de recursos.

1.4.2 *Objetivos específicos*

Los objetivos específicos a superar son los siguientes:

- Realizar el estudio teórico práctico del funcionamiento del baño de ultrasonidos.
- Analizar las posibles soluciones limpiadoras existentes y elegir la más adecuada
- Analizar las diferentes temperaturas de trabajo y elegir la más idónea
- Analizar los diferentes tiempos de limpieza y elegir el más óptimo.
- Elaborar una evaluación económica y de viabilidad

1.5 Alcance

El presente proyecto comprende una descripción completa de la técnica de limpieza por ultrasonidos como son los fundamentos físicos de las ondas ultrasónicas, las diferentes formas de aplicación y sus métodos de uso.

Se ha centrado el desarrollo del cuerpo principal del proyecto en la limpieza de armamento ligero, haciendo un estudio más centrado en la búsqueda de la mejor solución limpiadora posible, buscando a través de varias experiencias, cuál de ellas es más eficiente.

Existe una influencia directa hacia los alumnos de Infantería de Marina de los próximos cursos de la Escuela Naval Militar además de hacia cualquier usuario, ya que el proyecto tiene una gran aplicación a lo que limpieza de armamento individual respecta. Del mismo modo, de validarse la capacidad de limpieza del baño ultrasónico, cualquier usuario podría llegar a limpiar y mantener sus armas en un buen estado de conservación con una significativa reducción de la cantidad de tiempo empleado y también una reducción en los costes y los recursos empleados para tal fin.

Por último, la limpieza ultrasónica podría establecerse como principal método de limpieza de armamento no solo en la Escuela Naval, sino también en el resto de unidades operativas de la Armada.

1.6 Historia

El uso del sonido por parte del hombre como método de control de calidad se ha empleado desde épocas remotas. El hombre ha utilizado el sonido para evaluar la robustez y calidad de materiales, golpeando las piezas y escuchando las diferencias de tono, que puedan dar evidencia de la presencia de discontinuidades. Esta forma de ensayo se considera como precursora de lo que actualmente se conoce como ultrasonidos.

Los hermanos Curie descubrieron la piezoelectricidad en 1880, sentando así las bases de la generación de ultrasonidos de manera artificial. Fue precisamente en esa misma década cuando Liman y Vigota experimentaron con el llamado efecto piezoeléctrico inverso, aplicable realmente a la generación de ultrasonidos, como veremos.

En el año 1883, Galton investigó los límites de la audición humana, fijando la frecuencia máxima a la que podía oír una persona. Llegó a la conclusión de que los sonidos con frecuencias inaudibles por el ser humano, presentaban fenómenos de propagación similares al resto de las ondas sonoras, aunque con una absorción mucho mayor por parte del aire [2].

A partir de entonces, se empezó a investigar en temas relacionados con la generación de ultrasonidos:

En 1928, Sergei Y. Sokolov, científico ruso y conocido por muchos como el padre de los ensayos ultrasónicos, estudió el uso de ondas ultrasónicas para detectar defectos en objetos metálicos. Fue desarrollando su idea a finales de los años 20, en un tiempo en que no disponía de la tecnología requerida para ello. Demostró que las ondas de sonido se podían utilizar como una nueva forma de microscopio basándose en el principio de la reflexión.

Sin embargo, hasta finales de los años 30, no se empezaron a desarrollar las tecnologías para tales mecanismos, y las altas frecuencias requeridas para el microscopio de Sokolov se empezaron a utilizar en sistemas ultrasónicos utilizados para radar y navegación submarina.

En 1931, Mulhauser obtuvo una patente para usar ondas ultrasónicas con el fin de detectar defectos en sólidos, para lo cual utilizó dos transductores. También se desarrollaron ensayos ultrasónicos por Firestone (1940) y Simons (1945) usando la técnica de eco-frecuencia [3].

En 1942, Firestone fue el primero en aplicar el principio del sonar, para la localización de buques y medir profundidades marinas, así como la detección de heterogeneidades de los materiales mediante

una señal reflejada. A partir de 1945, el ensayo por ultrasonido tuvo una aceptación general, favorecida además por la urgente demanda de ensayos no destructivos.

Branson Ultrasonic, una empresa americana dedicada a la fabricación de autómatas, fundada tras la II Guerra Mundial y que cuenta con 60 años de historia, fue la pionera en la producción de los primeros equipos de limpieza por ultrasonidos. El diseño de estos equipos es prácticamente idéntico al de los equipos actuales [4].



Figura 2: Primera máquina de limpieza ultrasónica de la compañía Branson Ultrasonic [4]

Actualmente se han realizados muchos avances en la instrumentación y la tecnología electrónica, haciendo posible el desarrollo de este método, como una herramienta rápida y confiable

Sus aplicaciones son cada vez más empleadas y extendidas en múltiples disciplinas. En el ámbito del mantenimiento de los monumentos del patrimonio cultural es el principal método preventivo de empleo, desarrollando sus técnicas y ensayos.

1.7 Aplicaciones

1.7.1 Aplicaciones generales:

El ultrasonido es una técnica no destructiva que se basa en la generación de ondas acústicas con frecuencias superiores a las audibles pero de idéntica naturaleza.

Su propagación en los sólidos, líquidos y gases genera muy diversos fenómenos en función del tipo sistema ultrasónico que usemos y debido a esto el desarrollo de los sistemas de generación de ultrasonidos, han dado lugar a numerosas aplicaciones técnicas y científicas.

Existe un gran número de factores que afectan e intervienen en los ultrasonidos y son claves para el estudio de sus aplicaciones: frecuencia, potencia radiada, duración de las radiaciones, pérdidas en el medio, etc. También hay que considerar los efectos sobre el medio: desplazamiento de las partículas, presión acústica, etc.

Algunas aplicaciones de la técnica de ultrasonidos en distintas disciplinas pueden ser:

1.7.1.1 Medicina y biología:

En la medicina se aplica para realizar exploraciones en el cuerpo. La técnica más conocida es la ecografía en la que se introducen ultrasonidos a través de la piel en el organismo del paciente. Estos se reflejan a medida que van pasando de unos medios a otros y los ecos son procesados para mostrarlos finalmente por una pantalla.

Los ultrasonidos también poseen propiedades terapéuticas. Continuamente se realizan investigaciones para el desarrollo de esta técnica en la medicina y biología. [5]

1.7.1.2 Tratamiento de productos alimenticios:

Desde hace unos años, se han venido desarrollando numerosas técnicas para el tratamiento de los alimentos.

La aplicación de ultrasonidos en este campo está en investigación y se le denomina procesado mínimo, puesto que la idea es destruir los microorganismos que dañan los alimentos pero sin cambiar la apariencia externa de los mismos. Lo que hacen las ondas ultrasónicas es destruir la membrana celular de estos organismos, eliminándolos así. [6]

1.7.1.3 Purificación de agua:

Mediante el fenómeno de la cavitación, logrando que se produzcan burbujas y que éstas colisionen limpiando la suciedad de los filtros, así se obtiene un excelente método para depurar el agua. [7]

1.7.1.4 Aplicaciones físicas:

Las aplicaciones físicas de los ultrasonidos se dirigen hacia la medida de las propiedades elásticas y las condiciones de propagación de ultrasonidos en los sólidos.

1.7.1.5 Aplicaciones químicas:

Su principal función aquí es la de activar ciertos compuestos con el fin de acelerar las reacciones químicas en los procesos de fabricación de ciertos materiales.

1.7.1.6 Aplicaciones técnicas

Las aplicaciones técnicas son las que presentan un abanico más amplio de posibilidades. Quizá una de las aplicaciones más importantes en este sentido sea la soldadura de plásticos por ultrasonidos. Las frecuencias de trabajo se sitúan entre los 20 y 40 KHz y la potencia es del orden de algunos miles de vatios.

1.7.1.7 Guiado y sondeo

Una de las principales aplicaciones de los ultrasonidos es la que tiene que ver con los sensores para aplicaciones submarinas.

En este campo se usa un dispositivo de ultrasonidos llamado, sónar. Este aparato se basa en el principio del radar para poder estudiar el espacio marino y detectar obstáculos en la trayectoria de submarinos, bancos pesqueros, icebergs, etc. La utilización de ultrasonidos es fundamental puesto que las ondas electromagnéticas (características del radar convencional) no admiten propagación por el agua [8].

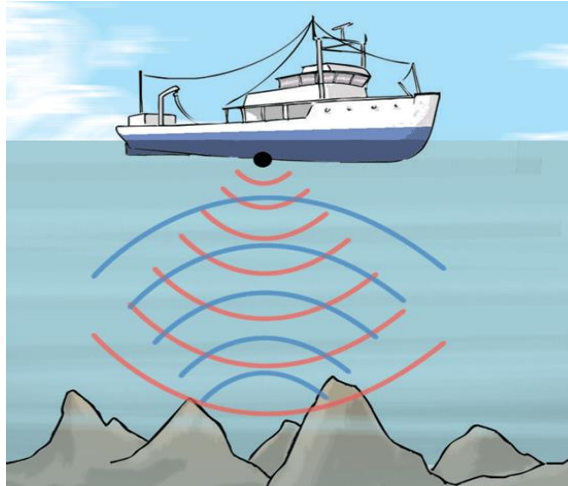


Figura 3: funcionamiento de un sistema ultrasónico tipo sonar [8]

También, los ultrasonidos están presentes en el guiado de robots con navegación autónoma evitando que estos colisionen con objetos próximos.

1.7.2 Aplicaciones del lavado ultrasónico

En la actualidad existe un gran campo de aplicación de los equipos de baño ultrasónicos en una amplia gama de sectores industriales, profesionales y domésticos.

De manera general se puede decir que en una máquina de limpieza por ultrasonido se puede lavar una cantidad inmensa de objetos metálicos, plásticos, cerámicos, mixtos, etc. A continuación algunas áreas de aplicación de la limpieza por ultrasonido.

1.7.2.1 Sector dental:

Lavado de todo tipo de instrumental utilizado, vidrios, cerámicas, plásticos, fresas, prótesis, coronas, implantes, eliminación de yesos, remoción de cementos varios de los instrumentos, coronas, puentes, etc.

1.7.2.2 Sector químico:

Lavado de vidriería en general; remoción de proteínas, sangre y lípidos de cubetas, filtros, capilares; desgasificación de líquidos, aceleración de reacciones químicas, sonicación, etc.

1.7.2.3 Joyería:

Lavado de anillos, cadenas, collares, piedras preciosas, mallas de relojes, mecanismos de precisión, etc.

1.7.2.4 Sector médico hospitalario:

Lavado de todo el instrumental quirúrgico, partes de endoscopios, cánulas, puntas para trepanación, etc.



Figura 4: Instrumental quirúrgico siendo esterilizado en un baño ultrasónico [9]

1.7.2.5 Sector Industrial:

Lavado de piezas de tornería automática, piezas estampadas en plástico o resinas, rodamientos, motores, piezas de precisión, válvulas, esferas, partes de bombas en general, lavado de partes en general, filtros metálicos, de plástico o teflón, radiadores, partes de motores, etc.

1.7.2.6 Sector mecánica automotriz:

Lavado de herramientas de precisión, carburadores, electro-inyectores, inyectores de motores diésel, bombas lineales y rotativas, tapas de cilindro, carcazas de alternadores, engranajes, válvulas, etc.

1.7.2.7 Sector óptico:

Lavado de lentes de contacto, armazones de lentes, espejos, condensadores, instrumental quirúrgico, etc.

1.7.2.8 Galvanoplastias:

Lavado y desengrase de todas las piezas previo al tratamiento de dorado, niquelado, cromado, cincado, etc.

1.7.2.9 Sector electrónico:

Lavado en serigrafía para circuitos SMT, circuitos impresos, eliminación de residuos de soldadura, lavado de precisión en circuitos SMD, contactos eléctricos, plaquetas para aplicaciones en alta frecuencia, terminales, cabezales de impresoras, cartuchos inc.-jet, etc [10].

1.7.2.10 Sector militar y aeronáutico:

Lavado de armas, casquillos de municiones, filtros de aviación, piezas para ensayos con tintas penetrantes, etc. Sector metalográfico: Limpieza de precisión y eliminación de pastas de lapidado en probetas metalográficas previo al examen en microscopio [10].

1.8 Riesgos debidos a la utilización de ultrasonidos en el laboratorio

Los riesgos debidos a la utilización de sistemas generadores de ultrasonidos se pueden dividir en tres tipos:

- Riesgos debidos a la exposición por contacto directo.
- Riesgos debidos a la exposición indirecta por vía aérea.
- Riesgos debidos a las operaciones realizadas con ultrasonidos en el laboratorio.

1.8.1 Riesgos debidos a una exposición a ultrasonidos por contacto directo

Este tipo de exposición se manifiesta principalmente en las manos. Es debido a un contacto directo entre el transductor –dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica, y viceversa– y el operario, pudiendo mediar entre ellos un sólido o un líquido.

En este tipo de exposición se transmite la casi totalidad de energía de la onda al tejido expuesto, causando daño por calentamiento de la piel, e incluso del hueso [11]. A tiempos más largos provoca daños celulares, así como la destrucción de las propias células por el fenómeno de cavitación. En el organismo, este tipo de sobreexposición directa se manifiesta como: alteraciones funcionales del sistema nervioso, dolores de cabeza, vértigo, fatiga, modificaciones del reflejo y periféricas.

1.8.2 Riesgos debidos a una exposición indirecta a ultrasonidos por vía aérea

En este tipo de exposición la onda ultrasónica viaja a través del aire, incidiendo sobre el oído del operario, pudiendo causar así una pérdida de oído y una serie de efectos subjetivos sobre el sistema nervioso central. La energía transmitida al operario en este caso se ve sensiblemente reducida en varios órdenes de magnitud. En consecuencia, en las condiciones habituales de trabajo en el laboratorio o en la industria la radiación ultrasónica indirecta puede considerarse inofensiva [12].



Figura 5: Daños provocados por los ultrasonidos en función de la intensidad sonora [11]

Si bien es cierto que pueden darse ciertas molestias causadas por la componente sonora asociada a la radiación ultrasónica y que dependen de la susceptibilidad individual de la persona expuesta. Entre dichos síntomas se encuentran: náuseas, dolor de cabeza, mareos y fatiga.

1.8.3 *Riesgos debido a las operaciones realizadas con ultrasonidos en el laboratorio*

El uso de ultrasonidos en el laboratorio se reduce básicamente a dos actividades:

- La sonoquímica
- La limpieza de material mediante baño ultrasónico.

En lo referente a la utilización de ultrasonidos para la mejora de procesos químicos –sonoquímica, además de los riesgos provenientes del empleo de ultrasonidos, cabe mencionar los riesgos propios de la reacción que se esté desarrollando en el reactor [13]. Los principales riesgos derivados son los siguientes:

- Utilización de productos que reaccionan violentamente con el agua o el aire:

La ruptura accidental del reactor en el seno del baño de ultrasonidos puede provocar un incendio, y en el peor de los casos, una explosión.

- Aumento descontrolado de la temperatura de la reacción:

Debido a un calentamiento excesivo del baño de ultrasonidos generado por el efecto de cavitación, puede generar graves problemas. Como la evaporación del disolvente de la reacción.

En el proceso de limpieza, además de los riesgos anteriormente ya citados, el riesgo propio de esta actividad es la dilución de sustancias de alto riesgo para la salud humana contenidas en el material de vidrio sucio. Estas sustancias pueden clasificarse como sustancias tóxicas, muy tóxicas, nocivas, irritantes, corrosivas, etc.

Además de todos estos riesgos vinculados a la utilización de ultrasonidos en procesos sonoquímicos y de limpieza ultrasónica, existe el riesgo intrínseco de formación de vapores o aerosoles nocivos. Estos aerosoles se forman a partir del agua de los baños de ultrasonidos, junto con minúsculas partículas de suciedad, sólidos o líquidos, arrastradas durante el proceso de cavitación

1.8.4 *Prevención de riesgos en el manejo de generadores de ultrasonidos*

A la hora de utilizar un generador de ultrasonidos se deberán tomar ciertas medidas de protección que garanticen la seguridad de los trabajadores.

Como primera medida de prevención se debe señalizar convenientemente el área donde se encuentra el generador de ultrasonidos. Para ello se utilizará el símbolo de Peligro por exposición a ultrasonidos.

Se limitará la ocupación del laboratorio, permitiendo la entrada únicamente al personal cualificado. Dicho personal será informado de los efectos perjudiciales de la exposición a ultrasonidos y de las medidas protectoras necesarias [14]. Entre dichas medidas se encuentra la prohibición de introducir las manos en el baño de ultrasonidos cuando éste se halle en funcionamiento.

Además, siempre utilizaremos guantes y gafas de protección a la hora de introducir o retirar cualquier objeto del baño, siempre que éste se encuentre apagado. Si el baño de ultrasonidos se utiliza con frecuencia y durante largos períodos de tiempo deberá ser aislado y se utilizarán protecciones para los oídos en su área de influencia. Una forma sencilla y eficaz consiste en ubicar el baño de ultrasonidos en una campana de humos. Eliminando también la contaminación por gases y vapores.

2 CONOCIMIENTOS TEÓRICOS

La tecnología ultrasónica está en auge hoy en día. Su uso mantiene un crecimiento exponencial dentro de áreas de aplicaciones diversas y ampliamente extendidas como pueden ser la biomedicina o la mecánica, lo que convierte a esta tecnología en una importante rama de la física moderna. El siguiente apartado tiene como objeto la explicación de los principios físicos clave en los que se basan los ultrasonidos y sus principios de utilización.

2.1 Movimiento ondulatorio

Se define como Movimiento ondulatorio a la propagación de energía de un lugar a otro sin transferencia de materia, mediante ondas. Un ejemplo de esto se obtiene al producir una vibración en un punto de un medio elástico. La vibración se transmite a todos los puntos de este medio mediante la generación de perturbaciones conocidas como ondas mecánicas [15]. Si el movimiento generado por las perturbaciones es de carácter uniforme, estas ondas son conocidas como ondas armónicas.



Figura 6: Onda mecánica sobre medio líquido [16]

2.1.1 Características de una onda mecánica

La amplitud del movimiento de las ondas mecánicas va disminuyendo continuamente a la vez que la onda avanza por el medio de propagación. Para evitar esta pérdida, es necesario aplicar una fuerza o impulso al medio tal que, cada perturbación generada sea igual que la anterior.

De esta forma, podemos afirmar que el movimiento generado es periódico. De esta forma, al tiempo que tarda una vibración en completarse lo llamamos **Periodo (T)**. En cambio, al número de vibraciones por unidad de tiempo es decir, el inverso del período, lo llamamos **frecuencia (F)** [17]. Se conoce Hz (Hercio) a la unidad de frecuencia y se corresponde a la cantidad de ciclos producidos en un segundo

$$T = \frac{1}{F}$$

La frecuencia, en conjunto con la velocidad de propagación del sonido (V) está relacionada con la longitud de onda (λ), que es el espacio que recorre una onda del inicio al final de una oscilación completa. La longitud de onda se obtiene a partir de la fórmula:

$$\text{Espacio} = \text{Velocidad} \cdot \text{Tiempo}.$$

Al hablar de vibraciones armónicas, se tendría que:

$$\text{Longitud de onda } (\lambda) = \text{velocidad de transmisión}(V) \cdot \text{periodo}(T)$$

De esta manera obtenemos la ecuación que relaciona V, λ y F:

$$V = \lambda \cdot F$$

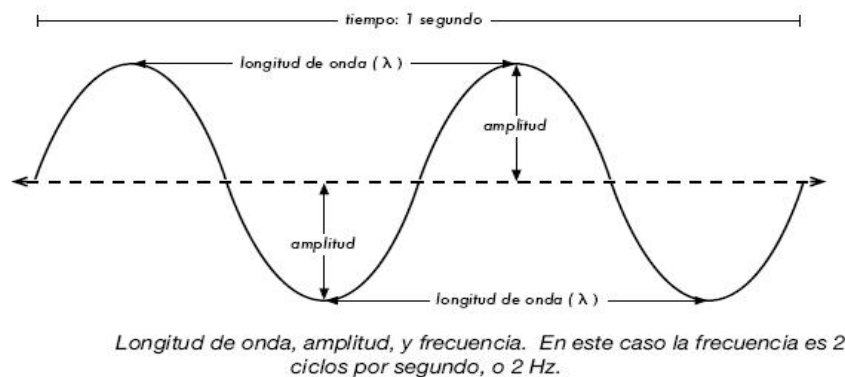


Figura 7: Principales parámetros de una onda mecánica [18]

Según los tipos de propagación, clasificamos las ondas en los siguientes tipos:

2.1.1.1 Ondas longitudinales:

En este tipo de ondas la vibración de las partículas de la onda es paralela a la dirección de propagación de la onda. Todas las moléculas que están situadas a la misma distancia del extremo al que se le ha aplicado la vibración se moverán al unísono, alejándose y acercándose al mismo. Sin embargo, la compresión y la expansión de cada fila se irán alejando de dicho extremo. De este modo, se generan zonas con una distancia entre partículas más pequeñas y zonas con una distancia mayor. Pueden ser orientadas y localizadas en un haz concentrado y poseen alta velocidad. Estas son las únicas ondas que pueden ser propagadas en medios sólidos, líquidos y gaseosos. De este tipo son las ondas sonoras [15].

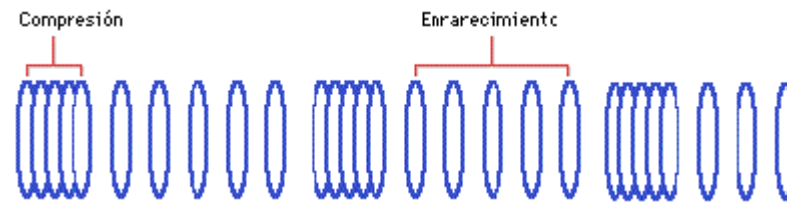


Figura 8: Movimiento de una onda longitudinal [19]

2.1.1.2 Ondas transversales:

En este tipo de ondas, la vibración de las partículas es perpendicular a la dirección de la onda. En este caso las moléculas vibran transversalmente a la dirección de propagación de la onda. Aunque la onda se transmite longitudinalmente alejándose del extremo sometido a vibración, las moléculas vibran transversalmente. La longitud de onda también queda determinada por la distancia entre dos planos en los que las partículas están en similar estado [15].



Figura 9: Movimiento de una transversal [19]

2.1.1.3 Ondas de superficie o de Raleigh:

Son un tipo especial de las ondas trasversales que se transmiten a lo largo de la superficie del material. Se propagan sobre la superficie de materiales gruesos con una penetración equivalente a una longitud de onda. El movimiento de las partículas forma una elipse, siendo ésta una combinación de ondas transversales y longitudinales, el eje de mayor longitud es perpendicular a la dirección de propagación de onda siendo el eje de menor longitud paralelo a la dirección de propagación [20].

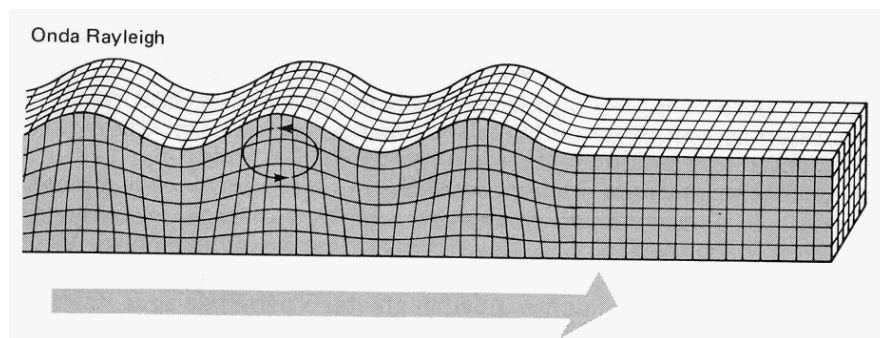


Figura 10: Movimiento de una onda de Raleigh [20]

2.2 Sonido

Se entiende con el término sonido al fenómeno físico que produce una estimulación al sentido auditivo en los seres humanos. El sonido se produce por la vibración mecánica de las partículas que componen un medio. Esta vibración provoca que la energía de la onda se transmita por el medio hasta el oído interno. Esta estimulación se encuentra comprendida entre unos 20 Hz y 20 KHz.

Las ondas sonoras se clasifican como ondas longitudinales y por tanto, ondas que se propagan en medios gaseosos, líquidos y sólidos. Por tanto, una onda de sonido es una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos del aire. Cada una de las partículas vibrantes transmite la energía a las moléculas vecinas, pero una vez que pasa la onda de sonido, las moléculas permanecen más o menos en la misma posición [21].

2.2.1 Características Físicas

Todas las clases de sonido existentes son fácilmente diferenciables determinando tres características básicas presentes en cualquier onda sonora: el tono, la intensidad y el timbre, que tienen sus correspondientes físicos a saber: la frecuencia, la amplitud y la longitud de onda.

2.2.1.1 Frecuencia

Se denomina frecuencia al número de oscilaciones por unidad de tiempo. La frecuencia será la misma para todas las partículas dentro de una misma onda.

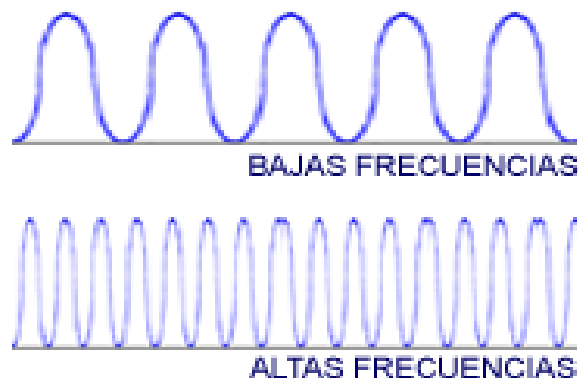


Figura 11: Tipos de ondas según su Frecuencia [22]

En relación con el tono cuanto mayor sea la frecuencia, mayor será el tono es decir, el sonido generado es más agudo. Por el contrario, cuanto menor sea la frecuencia de la onda sonora, menor será el tono siendo por tanto el sonido generado más grave. Todas aquellas ondas con una frecuencia inferior a 16Hz son conocidas como infrasonidos. Las ondas cuya frecuencia es mayor a 20kHz son llamadas ultrasonidos. Tanto los infrasonidos como los ultrasonidos son imperceptibles por el oído humano [22].

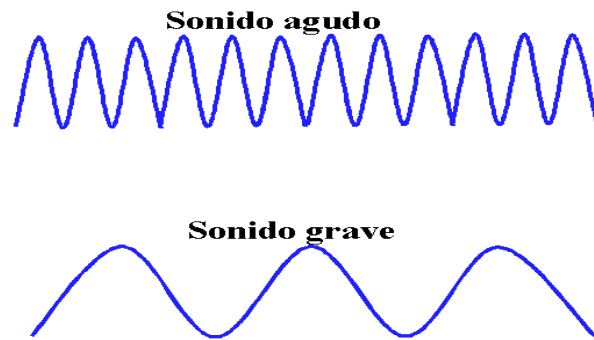


Figura 12: Relación entre la Frecuencia de una onda y su tono [22]

2.2.1.2 Amplitud

Se define como amplitud de una onda de sonido al grado de movimiento de las partículas de la onda con respecto a la posición de equilibrio. Si la amplitud no varía con el tiempo, se considera que la onda es des amortiguada. Si por el contrario, la onda disminuye su amplitud con el tiempo, la onda se considera amortiguada.

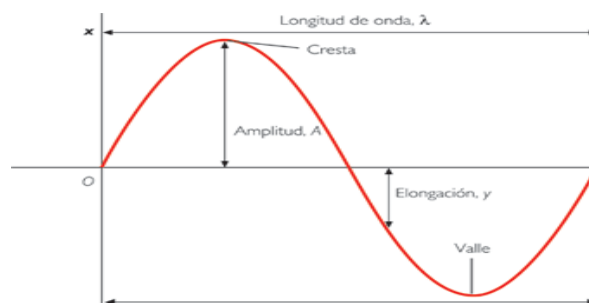


Figura 13: Amplitud de una onda [18]

2.2.1.3 Amortiguación de la onda:

Fenómeno por el cual se reduce la amplitud de la onda con el tiempo

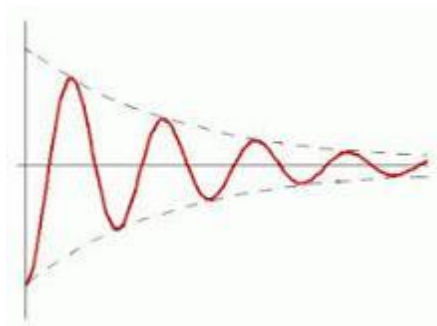


Figura 14: Amortiguación de una onda [15]

2.2.1.4 Frente de onda:

Es el lugar geométrico de los puntos que son alcanzados por el movimiento ondulatorio de una onda en el mismo instante de tiempo [23].

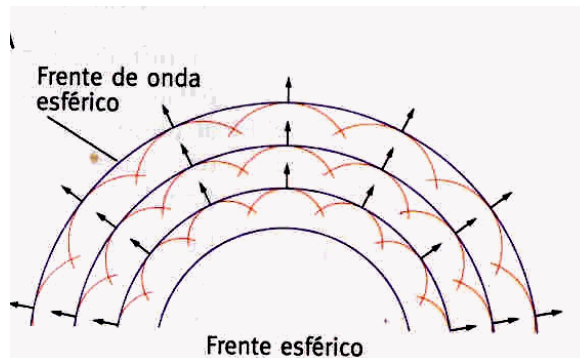


Figura 15: Frente de onda [23]

2.2.1.5 Intensidad:

La intensidad de sonido (I) se define como la potencia acústica (P) transferida por una onda sonora por unidad de área normal (A) a la dirección de propagación:

$$I = \frac{P}{A}$$

La intensidad sonora depende mayormente de tres factores. La superficie de dicha fuente sonora. La intensidad de percepción de un sonido por el oído depende también de su distancia a la fuente sonora. Finalmente, la intensidad depende también de la naturaleza del medio elástico interpuesto entre la fuente y el oído.

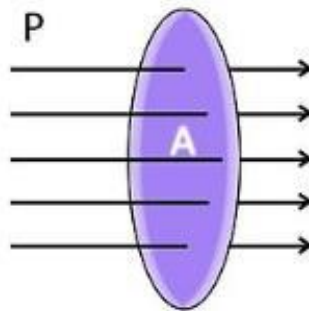


Figura 16: La potencia acústica (P) que atraviesa normalmente un área (A) da lugar a la Intensidad Acústica (I) [24]

El rango de intensidades que el oído humano puede detectar hasta el límite de dolor es muy amplio como para usar una escala lineal, por tanto se utiliza una escala logarítmica. Además, dicha escala cuya unidad es el decibelio, se emplea como nivel de referencia del umbral auditivo [24].

Se denomina sonoridad a la intensidad de sonido percibida subjetivamente y permite escalar los sonidos del más débil al más fuerte.

Tabla 1: Comparativa entre las diferentes intensidades sonoras

Intensidad del sonido	Presión sonora (dB)	Sonidos típicos
1.000.000.000.000	120	Umbral del dolor
100.000.000.000	110	Martillo neumático
10.000.000.000	100	Fabrica industrial
1.000.000.000	90	Calle ruidosa
100.000.000	80	Oficina ruidosa
10.000.000	70	Tránsito en la calla
1.000.000	60	Oficina poco ruidosa
100.000	50	Conversación normal
10.000	40	Oficina de trabajo
1.000	30	Auditorio
100	20	Conversación susurrando
10	10	Local de prueba de ruidos
1	0	Umbral de audición

Si tenemos en cuenta las condiciones reales de propagación del sonido en el aire, las variaciones de temperatura, presión o humedad, generan variaciones en la propagación de las ondas de sonido, tales como amortiguación o dispersión.

2.2.1.6 Velocidad del Sonido

Se define a la velocidad de propagación de onda sonora como el producto entre la longitud de onda y la frecuencia de dicha onda de sonido. Esta velocidad es la misma para sonidos de cualquier frecuencia.

La velocidad depende de las características del medio de propagación como son la densidad, la humedad de la temperatura, la presión atmosférica o la elasticidad del medio. El factor más crítico para

los gases es la humedad. Por ejemplo, en aire seco a 0 °C la velocidad de propagación es de 331,6 m/s mientras que si elevamos la temperatura 20 grados, la propagación será a 344 m/s. Si hablamos de sólidos y líquidos, los factores que más afectan son la densidad, la elasticidad y la temperatura. Como ejemplo el sonido se propaga por el cobre a 0 °C a 3500 m/s. si aumentamos la temperatura a 100 °C, la velocidad de propagación se reduce hasta los 3417 m/s [15].

A continuación, se presenta una tabla, en donde se puede encontrar tabuladas las velocidades de propagación del sonido en diferentes medios, teniendo en cuenta los factores que pueden afectar al medio y a la velocidad del sonido.

Tabla 2: Tabla comparativa de las velocidades de propagación del sonido en distintos materiales

Medio	Velocidad longitudinal (Cm/s x 10 ⁵)	Velocidad transversal (Cm/s x 10 ⁵)	Densidad (g/cm ³)
Aire	0,331	0	1,293
Agua Dulce	1,430	17	0,999
Nitrógeno	0,334	0	1,251
Aluminio	5,24	6,40	2,70
Acero	5,17	5,85	7,87
Oro	2,03	3,324	19,32

2.2.1.7 Impedancia acústica (Z):

Es la resistencia que el material opone a la vibración. Si un medio posee una impedancia baja, sus elementos de masa vibrarán a gran velocidad. La impedancia se mide en Kg/m²s y viene dada por:

$$Z = c \cdot \rho$$

Donde ρ es la densidad del material medida en Kg/m³ y c la velocidad acústica definida anteriormente. Esto indica que Z es una constante del material. La impedancia en los cuerpos sólidos es en general mayor que en los líquidos y, en éstos, mayor que en los gases.

2.3 Ultrasonido

Se denominan ultrasonidos a las ondas sonoras, cuya frecuencia es superior a la máxima frecuencia perceptible por el oído humano. Esta frecuencia límite superior se encuentra en torno a los 20 KHz aproximadamente. Las frecuencias ultrasónicas más empleadas se encuentran en el rango de

0,5 a 25 MHz [21]. Por el contrario, las ondas cuya frecuencia son inferiores a la frecuencia mínima perceptible se conocen como infrasonidos.

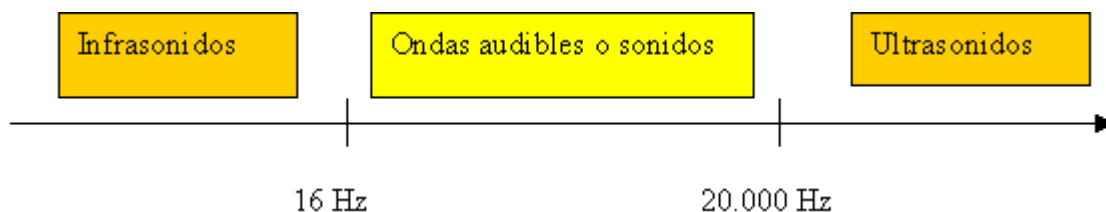


Figura 17: Clasificación de los sonidos en función de sus frecuencias límite

El fenómeno básico es la transformación de pulsos eléctricos en vibraciones mecánicas y viceversa. Esta conversión de energía se realiza en ultrasonidos mediante dos fenómenos físicos, el efecto piezoeléctrico y el efecto magnetoestrictivo.

2.3.1 Distribución del campo ultrasónico

2.3.1.1 Zona muerta:

En esta zona la generación de cavitación es nula puesto que existen interferencias producidas por las vibraciones del cristal ya que las ondas ultrasónicas se generan desde numerosos puntos en el plano del elemento piezoeléctrico.

Debido a la zona muerta, se genera una zona sin cavitación. Con el fin de eliminar la zona muerta, se utiliza unos elementos separadores en los transductores que alejan la fuente de ultrasonido del medio de propagación

2.3.1.2 Zona de campo cercano:

También conocida como zona de Fresnel. En esta zona están las variaciones que presenta el haz ultrasónico debido a los máximos y mínimos que presenta la presión acústica. En esta zona se detectan los mayores valores de cavitación ya que las ondas ultrasónicas convergen en un área determinada.

2.3.1.3 Zona de campo lejano:

También conocida como zona de Fraunhofer, la presión va disminuyendo a medida que aumenta la distancia, debido a la pérdida de energía, como es la divergencia del haz. La divergencia del haz se produce por el llamado factor de divergencia de Fraunhofer, el área cubierta por el haz sonoro tiene mayor magnitud alrededor del eje imaginario del haz, y va disminuyendo hacia los límites del mismo. [25].

2.4 Piezoelectricidad

2.4.1 Efecto Piezoeléctrico

Se denomina efecto piezoeléctrico o piezoelectricidad a la capacidad que poseen determinados minerales para producir corrientes eléctricas cuando se les aplica presión. Los materiales piezoeléctricos manifiestan fenómenos eléctricos y mecánicos reversibles, es decir, si se aplica una carga mecánica a las caras de un cristal, se generan cargas eléctricas en ellas; por el contrario, si se

aplican cargas eléctricas, entonces se produce una deformación de las caras del cristal. Así podemos definir un material piezoeléctrico como todo aquel capaz de convertir deformaciones mecánicas procedentes de una presión exterior en cargas eléctricas [26].

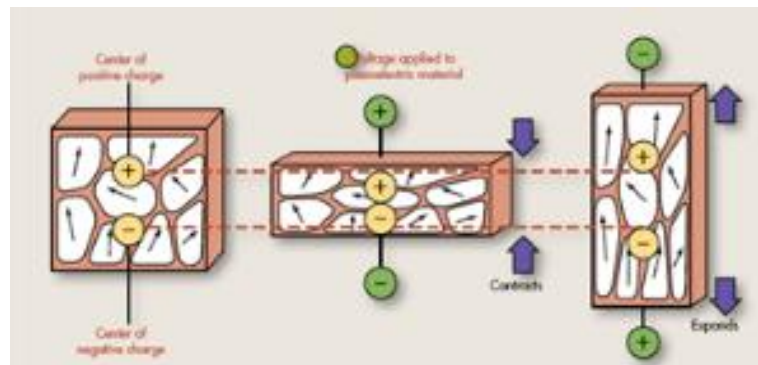


Figura 18: Demarcación de un cristal piezoeléctrico ante una diferencia de potencial [15]

El efecto piezoeléctrico genera un cambio dimensional en el elemento piezoeléctrico conocido como electrostricción. Pero también puede ocurrir lo contrario, que tras una modificación dimensional del elemento, se genere una corriente eléctrica. El espesor del elemento piezoeléctrico utilizado se determina en función de la frecuencia de utilización del transductor. Cuanto mayor sean las frecuencias de utilización, más delgados serán los cristales utilizados.

2.4.2 Efecto magnetoestrictivo:

Se denomina efecto magnetoestrictivo al fenómeno por el cual los materiales ferro eléctricos sometidos a la acción de campos magnéticos sufren contracciones y expansiones generando ondas ultrasónicas. Al igual que el efecto piezoeléctrico es recíproco, por tanto al estar bajo la influencia de ultrasonidos, los materiales sufrirán deformaciones.

Estos materiales están compuestos por un gran número de moléculas que deben ser polarizadas y se deformarán generando ondas mecánicas cuando se les aplique un voltaje. Cuando se les aplica corriente eléctrica, las moléculas se polarizarán según la carga aplicada. La carga eléctrica debe ser alterna por tanto, cada vez que la carga sea nula, el material aumentará y disminuirá su tamaño generando así vibraciones [27].

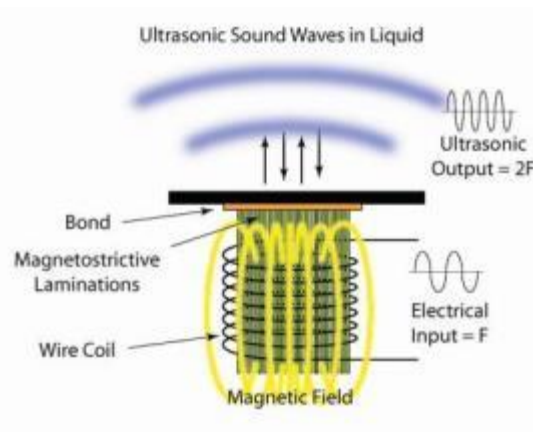


Figura 19: Generación de ondas ultrasónicas a través de un transductor magnetoestrictivo [15]

2.4.3 Usos

Los sistemas piezoeléctricos pueden desarrollarse para usos en los cuales cualquier tipo de transductor electromecánico pueda utilizarse, sin embargo debe tenerse en cuenta factores como el tamaño, la función y el coste del sistema. En la actualidad, podemos clasificar dispositivos de cerámica piezoeléctrica en cuatro categorías según su campo de aplicación: generadores, sensores, actuadores y transductores.

2.4.3.1 Generadores

Los elementos de cerámica piezoeléctrica son capaces de generar un voltaje suficiente como para producir el encendido (chispa) a través de un boquete de un electrodo, y se los puede utilizar como encendedores en alumbradores de combustible, estufas del gas, el equipo de soldadura, y otros aparatos.

2.4.3.2 Sensores

En los sensores piezoeléctricos el parámetro físico que actúa directamente en el elemento es una señal acústica que produce vibraciones. Estas vibraciones se convierten en una señal eléctrica. El sensor proporciona una respuesta visual, audible, o física a la entrada del sensor de una señal.

2.4.3.3 Actuadores

Un actuador piezoeléctrico convierte una señal eléctrica en una deformación controlada del material piezoeléctrico. Los actuadores piezoeléctricos se utilizan para controlar las válvulas hidráulicas, las bombas del pequeño volumen y en otros usos.

2.4.3.4 Transductores

Los transductores piezoeléctricos convierten energía eléctrica en la energía mecánica vibratoria, a menudo sonido o ultrasonido.

Los transductores piezoeléctricos que generan sonidos audibles producen ventajas significativas en comparación con los dispositivos electromagnéticos alternativos, los primeros son compactos, simples, altamente confiables, y con una mínima energía se puede producir un alto nivel de sonido. Estas características son las idóneas para su uso en equipos portátiles a las necesidades de un equipo que trabaja con baterías.

Debido a que el efecto piezoeléctrico es reversible, un transductor puede generar una señal de ultrasonido a partir de energía eléctrica y también puede recibir una señal entrante de ultrasonido y convertirla en una señal eléctrica. Algunos dispositivos diseñados para medir distancias, caudales, o los niveles fluidos incorporan un solo transductor piezoeléctrico en la señal que envía y que recibe, otros diseños incorporan dos transductores y separan estos papeles de emisor - receptor [10].

Los transductores piezoeléctricos también se utilizan para generar las vibraciones ultrasónicas para la limpieza, atomización de líquidos, diagnóstico médico, o para otros propósitos.

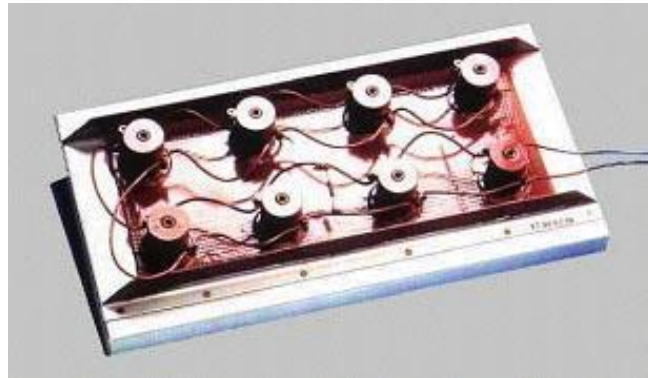
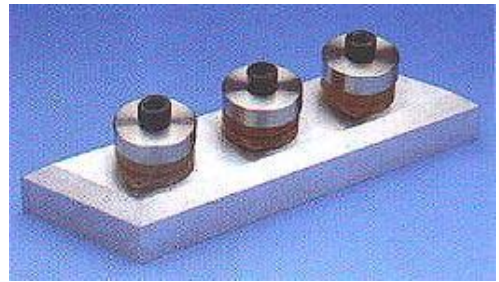


Figura 20: Diferentes tipos de transductores ultrasónicos piezoeléctricos [10]

2.4.4 Clases de transductores

Los transductores que son los encargados de la transmisión de las ondas sonoras al líquido, pueden ser de dos tipos:

- De tipo electrostrictivo
- De tipo magnetostrictivo

Por lo general se utilizan los del tipo piezoeléctrico debido a que es posible construir transductores que trabajen a frecuencias mucho más elevadas que las que pueden trabajar los de tipo magnetostrictivos que pocas veces superan los 22 KHz como frecuencia de trabajo.

En este punto realizaremos un análisis más exhaustivo de estos elementos para determinar su tipología, sus características y las aplicaciones a las que se pueden someter.

2.4.5 Transductores ultrasónicos de potencia.

2.4.5.1 Selección de un tipo de transductor de potencia

Los principales puntos a considerar en los transductores son la capacidad de potencia, el rendimiento, la amplitud y distribución de la vibración y la direccionalidad de la radiación emitida.

Los transductores de potencia son sistemas de banda estrecha con capacidades de potencia que van desde algunos cientos de vatios hasta varios kilovatios y gran amplitud de vibración.

En la actualidad la gran mayoría de transductores ultrasónicos son fabricados con materiales cerámicos piezoeléctricos; por esta razón realizaremos un análisis más profundo de este tipo de transductor. Sin embargo, también serán descritos brevemente los recientes desarrollos de nuevos materiales *magnetostrictivos* (compuestos de tierras raras).

2.4.5.2 Estructura y tipos de transductores.

Por lo general, los transductores son dispositivos formados por un conjunto de elementos de entre los cuales, el elemento piezoeléctrico (o magnetostrictivo) es el más importante y el sobre el cual se dimensiona y diseña el transductor, ya que es el elemento que realiza el cambio de sus dimensiones en respuesta a la acción de un campo eléctrico (o magnético).

Los otros componentes de la estructura del transductor son elementos pasivos que se utilizan con el propósito de mejorar la transferencia de energía. Por lo general estos componentes son piezas de aleaciones metálicas.

2.4.5.3 Transductores magnetostrictivos

Las partes que constituyen a un transductor magnetostrictivo son varias filas de láminas de níquel. Este sistema se encuentra alimentado por una bobina con corriente de frecuencia necesaria para formar el campo electromagnético. Las láminas de níquel están moldeadas y posicionadas de tal forma que tienen igual y exacta distancia entre ellas, estas se fabrican con el espesor correcto de tal manera que vibran mecánicamente a la frecuencia deseada.

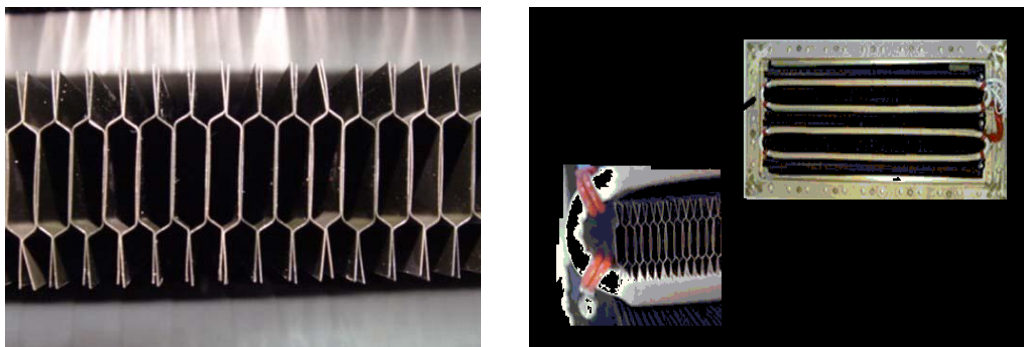


Figura 21: Transductor magnetostrictivo laminar [10]

2.4.5.4 Transductores piezoeléctricos para Limpieza

La tecnología piezoeléctrica se fundamenta en utilizar las características de ciertos materiales cerámicos que se deforman (expanden y contraen) cambiando sus tensiones elásticas internas y su forma cuando se les aplica una diferencia de potencial. La forma básica de este tipo de transductor que crea las ondas ultrasónicas, se basa en una forma de elipse o de disco de varios milímetros de espesor y un diámetro de varios centímetros.

Un transductor piezoeléctrico se fabrica al juntar dos cerámicas piezoeléctricas, la una bajo la otra, sobre ambas capas cerámicas, se colocan dos finas láminas de aluminio sobre una cara, y de acero sobre la contraria. A ambos extremos se le colocan elementos de presión para mantener el subconjunto unido. Este tipo de configuración determina al transductor con el nombre de *tipo sándwich*.



Figura 22: Diferentes transductores piezoeléctricos de disco [28]

Las dimensiones son las que se determinan mediante previo cálculo para que el transductor trabaje una determinada frecuencia de oscilación, en función de la onda de ultrasónica que se pretenda emplear.

Normalmente los transductores piezoeléctricos más empleados son los diseñados para poder crear 50 w de poder ultrasónico. Si por los requerimientos del sistema necesitará un sistema generador de ondas ultrasónicas de mayor potencia de salida, lo que se debe hacer es conectar los transductores piezoeléctricos mediante conexión eléctrica en paralelo.

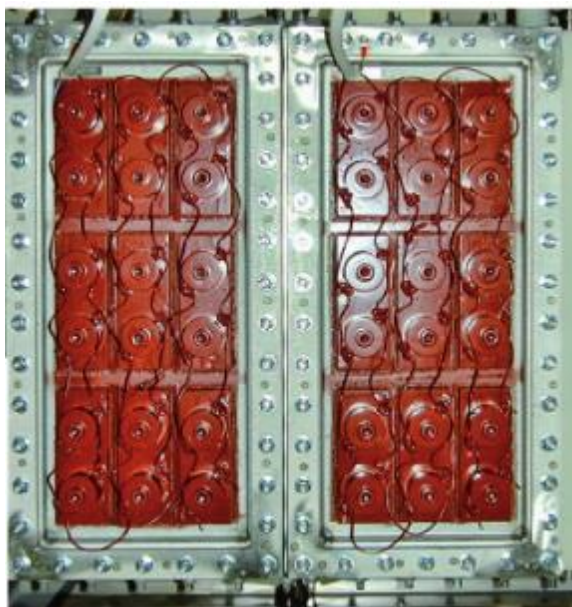


Figura 23: Conjunto de transductores piezoeléctricos conectados en paralelo [28]

2.4.5.5 Funcionamiento de un transductor piezoeléctrico

El funcionamiento de estos transductores se produce al aplicar energía eléctrica, ya que las cerámicas se deforman y transmiten su energía a las masas metálicas que son quienes generan la onda ultrasónica.

Dependiendo de la fabricación, el ensamblado y el tipo de transductores se puede obtener sistemas de mono frecuencia (entre 20 a 40 KHz), o sistemas de multifrecuencia (de 40 a 130 KHz, dependiendo del tipo de señal que se genere

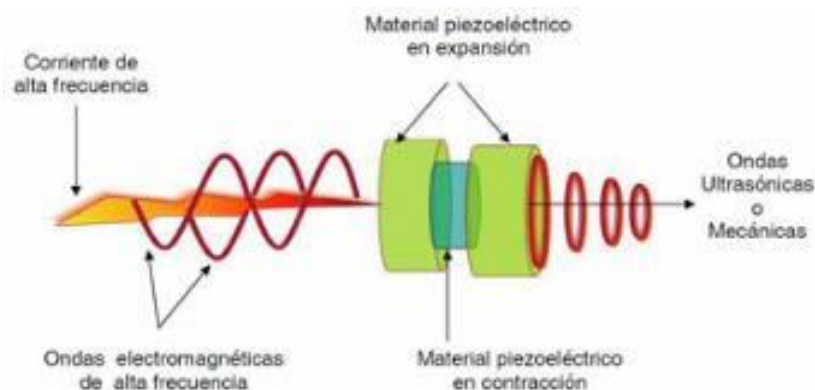


Figura 24 Generación de ondas ultrasónicas en un transductor piezoeléctrico [29].

2.4.6 Transductores de potencia y aplicaciones.

Las aplicaciones de los ultrasonidos se clasifican generalmente en dos grandes grupos que se refieren, respectivamente, al uso de bajas y altas intensidades.

Los ultrasonidos de potencia cubren las aplicaciones de alta intensidad en las que se trata de producir modificaciones permanentes en el medio sobre el que se actúa. La mayoría de las aplicaciones de los ultrasonidos de potencia se llevan a cabo en el campo de frecuencia entre 20 y 100 kHz y con intensidades acústicas que varían desde aproximadamente $0,1 \text{ W/cm}^2$ hasta varios KW/cm^2 .

El empleo de las frecuencias ultrasónicas permite obtener alta concentración de energía en medios de muy diversa naturaleza, sin producir molestias acústicas a las personas.

Existe una amplia gama de procesos realizados mediante los ultrasonidos de potencia. Los más importantes son:

En medios sólidos:

- mecanización
- soldadura
- formación de metales, etc.

En medios líquidos:

- limpieza
- aceleración de reacciones químicas
- atomización

La aplicación industrial de estos procesos depende fundamentalmente de la tecnología de generación de los ultrasonidos de alta intensidad.

2.5 Principios del lavado ultrasónico

Entre las actuales alternativas de limpieza de objetos (piezas mecánicas, instrumentos, circuitos, etc.), el lavado ultrasónico es un medio seguro, moderno, eficiente y poco dañino para conseguir una limpieza profunda garantizada en un tiempo menor que cualquier otro sistema de limpieza (cepillado, detergentes, abrasivos, etc.). Sus ventajas principales radican en una buena capacidad de limpieza de los objetos, aún con las impurezas más tenaces y dispuestas en cavidades de difícil acceso manual, así como también se elimina el riesgo de accidentes, lastimaduras y contaminación por agentes limpiadores agresivos.

2.5.1 Limpieza por ultrasonidos

Por definición, sabemos que limpiar un objeto o elemento consiste en quitar de su superficie toda aquella suciedad o materias no deseadas que no son parte de ésta.

Este proceso de limpieza, por lo general se realiza mediante una combinación de una acción química, agentes detergentes, y una acción mecánica que puede ser manual o automática (cepillado, lijado, frotación).

En el caso de la limpieza por baño ultrasónico, la acción mecánica necesaria para el proceso de limpieza puede ser producida mediante vibraciones u ondas acústicas de fuerte intensidad, que actúan directamente sobre el líquido limpiador, generando así un proceso de limpieza bastante eficiente. El elemento encargado de transformar la energía eléctrica entrante en energía sonora (vibratoria) que se propaga sobre un medio elástico (ej. el aire), es un transductor acústico electrónico, parecido a un altavoz.

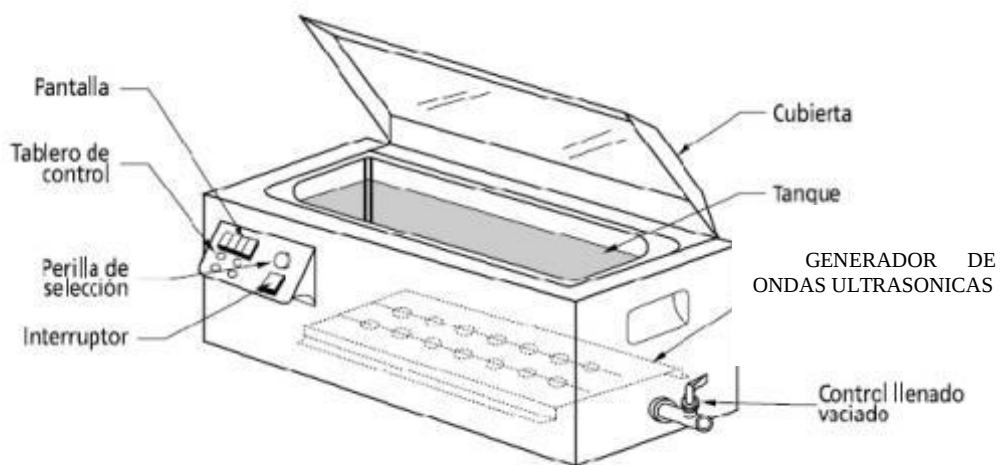


Figura 25: Esquema de un equipo de limpieza ultrasónica [9]

En la imagen, se puede ver el esquema de funcionamiento de una máquina de baño ultrasónico. La máquina consta de un recipiente de paredes metálicas, que contiene la solución limpiadora más adecuada. Dicho recipiente se encuentra adherido al elemento transductor piezoeléctrico que, bajo una diferencia de potencial eléctrico trabajará transmitiendo una potencia acústica, a una frecuencia determinada, al líquido a través del recipiente.

La velocidad de propagación de una onda sonora en un medio líquido, es de aproximadamente 1.500 metros por segundo en el agua. Este fenómeno de propagación de la onda sonora produce una vibración de las moléculas del medio líquido creándose unas variaciones de presión en éstas, que a su vez transmiten a otras moléculas cercanas también presentes en el medio y así sucesivamente. Por tanto las moléculas presentes en el medio líquido vibrarán con la misma frecuencia a la cual el transductor ultrasónico se encuentra vibrando, así como también existe una oscilación del valor instantáneo de la presión en función de la frecuencia determinada por el transductor.

Se debe tener en cuenta que el estado físico de un medio líquido o gaseoso está relacionado con la temperatura y la presión a la que se encuentra dicho medio. Un claro ejemplo lo tenemos en el agua que hierve a una temperatura de 100° C y una presión de 1 Bar, pero si se disminuyera la temperatura y la presión suficientemente el agua también se transformaría en vapor.

Al inducir una onda sonora en el medio líquido cuya intensidad es lo suficientemente grande, en el momento en que la presión alcance su valor crítico se generará una burbuja de vapor en el medio líquido, la cual durante la duración de un intervalo de tiempo T, aumentará de volumen almacenando en si energía potencial. Al término de este pequeño instante de tiempo, mientras la presión sigue aumentando, llegará un punto en que el estado de vapor no seguirá siendo posible, entonces se produce una explosión de la burbuja de vapor en un punto muy pequeño, invisible al ojo humano; de este estallido restituirá la energía anteriormente acumulada. A pesar de ser una pequeña explosión a partir de una simple burbuja se crea una subida de energía muy alta debido a la implosión instantánea de dichas burbujas.

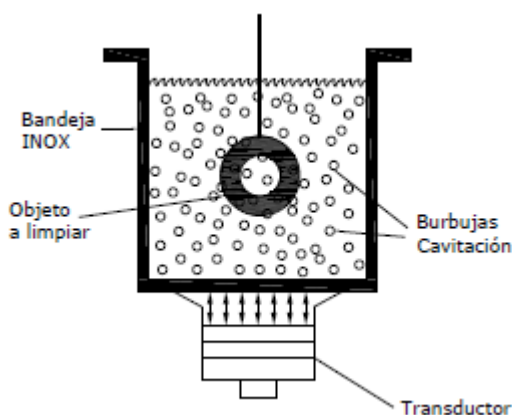


Figura 26: Esquema de funcionamiento de un equipo de limpieza ultrasónica [21]

2.6 Principio de funcionamiento del lavado ultrasónico

2.6.1 Cavitación Ultrasónica.

El proceso de limpieza mediante ultrasonido es un efecto que se crea por la acción de ondas sonoras de alta frecuencia (entre 20 y 70 KHz) aplicadas a un medio líquido que actúa como el agente encargado de la limpieza de los objetos. El proceso de limpieza cumple con los siguientes pasos:

El generador eléctrico produce una diferencia de potencial que llega al transductor, éste que está situado debajo de la bandeja de acero inoxidable, transforma la señal del generador en vibraciones mecánicas que crean una onda ultrasónica que se transmite y se propaga por el medio líquido.

La onda sonora que se propaga en el medio líquido produce una alternación sucesiva de presión y depresión en las moléculas del medio. En la fase de depresión, se generan burbujas de tamaño imperceptible para el ser humano, lo que da inicio al fenómeno denominado cavitación.

Tabla 3: Evolución de una burbuja de cavitación

FASE	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
A		En la fase de depresión se crean en el interior del líquido un infinito número de burbujas de gas que aumentan de tamaño mientras dura la fase de depresión acústica
B		La formación de las burbujas es el inicio de la cavitación. En esta fase empieza el proceso de copresión de las burbujas
C		La creciente presión que se ejerce sobre las burbujas, las comprime de manera abrupta, aumentando en gran medida la temperatura del gas contenido en el interior de las burbujas
D		La compresión se da hasta el punto en el que las burbujas colapsan sobre si mismas e implotan liberando grandes cantidades de energía

Ya en fase de presión, las pequeñas burbujas generadas en el medio líquido, comienzan a explotar al ponerse en contacto con la pieza u objeto sumergido, restituyendo así la energía que habían acumulado. Esta energía de explosión (mecánica) aumenta notablemente la eficacia de la acción química del agente limpiante sobre la pieza, obteniéndose resultados de limpieza de mejor calidad que otros procesos y en tiempos de trabajo menores [30].

2.6.2 Aspectos físicos de la cavitación ultrasónica.

Durante el proceso de limpieza de objetos mediante baño de ultrasonidos, el fenómeno que se produce en el medio líquido es conocido como “cavitación”, que como se ha indicado, consiste en la formación y la explosión de millones de pequeñas burbujas vacías dentro del líquido. Estas burbujas se generan en toda la masa líquida, llegando así a penetrar en las fisuras o hendiduras muy pequeñas de un objeto [30].

Este fenómeno es producido debido a la compresión y a la depresión que se genera en el medio líquido durante un ciclo de la onda sonora.

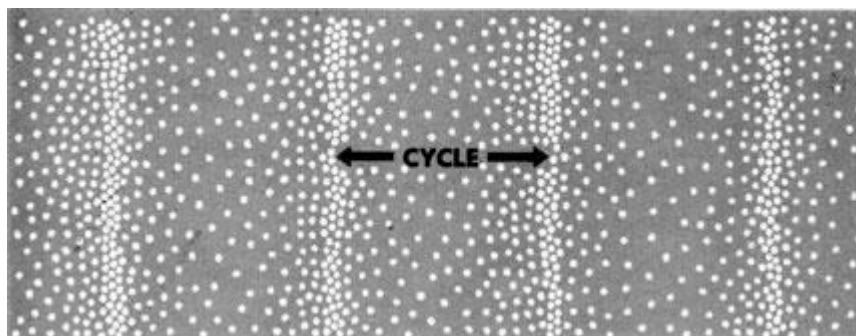


Figura 27: Compresión y depresión de una onda sonora en un medio líquido [31]

Durante la fase de depresión, en el medio líquido o solución limpiadora comienza el proceso de crecimiento de las burbujas, creciendo desde su tamaño original (núcleo microscópico). A continuación en la fase de compresión, las burbujas creadas y que han aumentado de tamaño empiezan a implotar violentamente, generando grandes cantidades de energía. Este fenómeno de creación e implosión de las burbujas se produce a una velocidad proporcional a la frecuencia de ultrasonido aplicada, la misma que puede variar en un rango de 20 a 80 KHz [30].

La energía que proviene de la violenta implosión de las burbujas de gas, golpean fuertemente la superficie del objeto a limpiar interactuando de forma física y química, lo que garantiza que se cumple con el proceso de limpieza de un objeto. Físicamente se produce un fenómeno de "micro barrido" a una elevada frecuencia y químicamente se produce la acción detergente de la sustancia química propia del agente de limpieza. A pesar de que las burbujas que explotan son microscópicas e individualmente liberan muy pequeñas cantidades de energía, el efecto acumulativo de millones de implosiones instantáneas se convierte en un efecto de intensa energía.

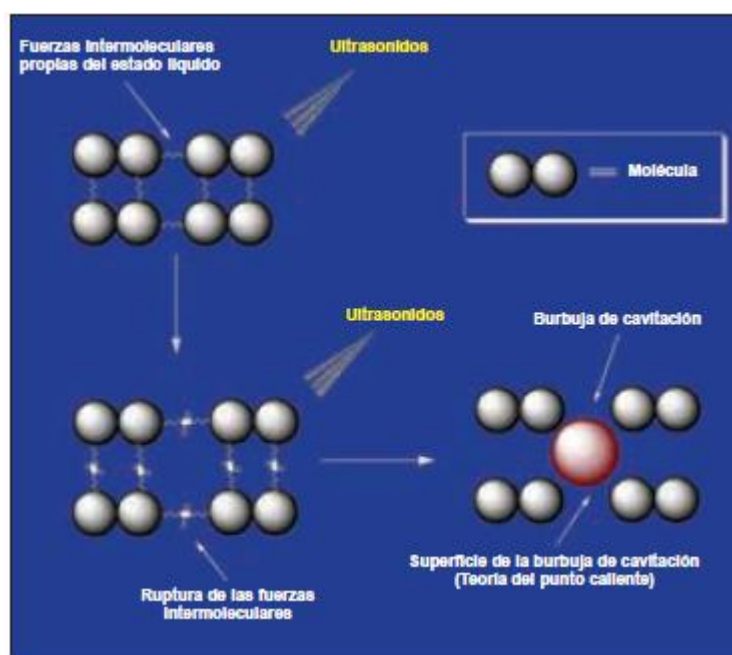


Figura 28: Formación de una burbuja de cavitación [12]

En teoría, en el proceso de implosión se alcanzan temperaturas en el orden de 11.000°C y presiones cercanas a 7.000 kg/cm^2 , lo cual nos da una idea del “poder limpiador” que se produce, siendo en teoría capaz de eliminar gran cantidad de suciedad.

En el próximo apartado se define las maneras en que la cavitación mejora en gran medida la eficiencia de la física y de la química en lo referente a una solución en el lavado industrial:

- Aumento de la velocidad de disolución de suciedades por el contacto íntimo que se produce entre el agente de limpieza y la superficie del objeto contaminada.
- Se produce un ataque a la suciedad adherida por la cual la suciedad se fija en la superficie de la pieza.
- Previene la formación de una película neutra en la superficie de la pieza que pueda producir problemas al momento de su limpieza.
- Se eleva rápidamente la temperatura del líquido con lo que se aumenta la velocidad de la acción química de limpieza del mismo.

2.6.3 . *Factores en la Cavitación*

El inicio del fenómeno de cavitación viene marcado por el conocido como “Umbral de cavitación”. Este punto se obtiene cuando la energía que se aplica al líquido es suficiente para descender la presión por debajo de su presión de vapor durante la depresión. La cantidad de energía que se requiere para obtener este punto varía según las diferentes soluciones de limpieza existentes en el mercado. Del mismo modo la frecuencia de trabajo juega un papel importante en el desarrollo de la cavitación.

2.6.3.1 **Presión de vapor**

El valor medio de la presión de vapor presente en la solución limpiadora es el que más nos interesa en cuanto a los propósitos de limpieza ultrasónica. Cuando tenemos una presión de vapor baja, se produce en la cavitación burbujas que implotan relativamente con gran fuerza, pero el número de burbujas producido se reduce requiriendo de un umbral de cavitación más alto.

Una presión de vapor alta, bajará el umbral de cavitación y producirá una mayor cantidad de burbujas de gas, pero la energía emanada de éstas no será muy intensa debido a la menor diferencia presión interna/externa que se produce en ellas.

En uno u otro extremo, el efecto de cavitación disminuye por lo que se recomienda trabajar con valores medios de presión de vapor del agente de limpieza [10].

2.6.3.2 **Tensión superficial**

Para obtener mejores resultados la tensión superficial deberá ser moderada, ya que con una alta tensión las burbujas tienen menos elasticidad y desaparecen con mayor intensidad, pero se presenta también una gran dificultad a su formación. Una baja tensión superficial les dará gran elasticidad, un gran crecimiento pero reducirá la fuerza implosiva y por tanto disminuyendo la intensidad del efecto de cavitación.

2.6.3.3 Viscosidad

La viscosidad del agente de limpieza debe ser baja para así facilitar la cavitación. Cuanto más alta es la viscosidad, mayor será la energía necesaria que se debe entregar en la transmisión de las ondas de ultrasonido.

2.6.3.4 Densidad

De manera ideal, la densidad debería ser alta para favorecer a un intenso proceso de cavitación, aún si los líquidos de alta densidad requieran más energía para que las burbujas de cavitación puedan crecer a pesar de ello, éstas producirán una mayor fuerza implosiva.

2.6.3.5 Temperatura.

La temperatura a la que se encuentre el líquido afecta tanto a la calidad del proceso de cavitación como a la acción química de limpieza sobre la superficie del objeto.

Ambas acciones podrían mejorar de gran forma con el incremento de la temperatura del medio líquido. Sin embargo, existe una temperatura ideal para la cual se produce el máximo rendimiento del efecto de cavitación. Dicha temperatura óptima de operación varía en los líquidos dependiendo de sus propiedades físicas descritas anteriormente. Por lo general, las soluciones acuosas cavitan dentro de un rango de 60 a 70° C [32].

Cuando se incrementa la temperatura por encima de este rango la cavitación disminuye de manera constante hasta llegar al punto de ebullición, en donde esta última cesa totalmente. Esto se produce debido a que las burbujas creadas, inmediatamente se llenan de vapor evitando su violenta desaparición. Además, cuando esta energía calorífica aportada es demasiada, se crea un estado de gran agitación en la capa superficial del medio líquido. Este fenómeno se denomina “cavitación de superficie”, y lo que produce es un empeoramiento en la transmisión de las ondas sonoras.

En conclusión, al aumentar la temperatura del líquido lo que se pretende es acelerar la intensidad de la cavitación. Sin embargo, si el aumento de temperatura es superior al recomendado, los efectos producidos son contrarios a los buscados

2.6.3.6 Desgasificación

Este es un proceso que debe llevarse a cabo antes de realizar la limpieza ultrasónica. Este proceso consiste en remover los gases disueltos que se encuentren en el líquido (generalmente aire) que de no ser removidos, llenarán las burbujas cavitantes generadas, dando lugar una amortiguación de la fuerza de cavitación y por tanto se reducirá el efecto de limpiante. La desgasificación se la lleva a cabo mediante la agitación ultrasónica del líquido mientras se eleve su temperatura por la acción mecánica.

Durante el proceso de desgasificación ultrasónica los gases disueltos en el medio líquido generan grandes burbujas que salen a la superficie.

El tiempo que se requiere para el proceso de desgasificación varía de un medio líquido a otro según sus características. Por ejemplo, una solución acuosa requiere entre 15 a 30 minutos. La desgasificación debe ser repetida en el comienzo de cada operación de limpieza. En las pruebas subsiguientes realizadas tras la primera desgasificación el tiempo requerido será una pequeña fracción del período inicial.

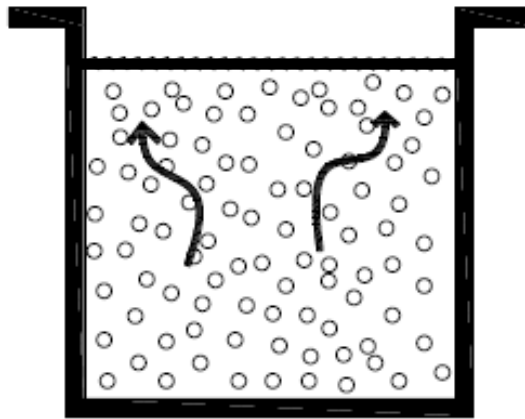


Figura 29: Proceso de desgasificación ultrasónica

2.6.4 Selección del tipo de agente de limpieza y la temperatura de trabajo

La selección de la solución limpiadora es una decisión capital. Es por este motivo es que es de gran importancia tener en cuenta las características limpiadoras de la solución a utilizar en el proceso de lavado por ultrasonido.

Lo primero a considerar es el tipo de suciedad que se desea eliminar del objeto a limpiar, determinar su naturaleza y posteriormente en función de esto elegir el tipo de sustancia química que nos garantice un efecto de limpieza sobre el elemento contaminante.

Por lo general, la sustancia química o detergente que se utiliza para obtener una mayor eficiencia en el proceso de cavitación es una solución acuosa la cual tiene características que facilitan este proceso como una alta presión de vapor, una baja tensión superficial y que se la utiliza a una temperatura de trabajo entre 40 y 80 °C.

La solución limpiadora, por tanto, marca el rango de las temperaturas de trabajo de la solución acuosa en un equipo de lavado ultrasónico; es así que, la intensidad de cavitación varía con el cambio de temperatura. La intensidad de cavitación aumenta con temperatura, hasta cerca de los 80 °C para luego disminuir y desaparecer completamente a la temperatura de ebullición del líquido utilizado.

En el presente trabajo se han utilizado diferentes soluciones limpiadoras con el fin de compararlas. La primera solución empleada se compone de VV-L-800C, aceite lubricante mineral altamente refinado mezclado con aditivos anti óxido y con capacidad de desplazar el agua. La segunda y tercera disolución se compone de las disoluciones comerciales ULTRASONIC-7, aptas para la limpieza de hierro, acero galvanizado, aluminio y desincrustación de carbonilla, y de ULTRASONIC-A, apto para el desengrase de metales férricos [32]. Por último para la cuarta y quinta solución limpiadora, se usa vinagre doméstico y un quitagrasas comercial.



Figura 30: Soluciones limpiadoras industriales Ultrasonic-7 y Ultrasonic-A

2.6.5 Frecuencia de trabajo

La frecuencia del sistema generador de ultrasonido es importante debido a que es ésta quien determina el tamaño del punto de cavitación en el interior del líquido expuesto a la influencia de las ondas ultrasónicas.

Cuanto más elevada sea la frecuencia utilizada menor será el tamaño de las burbujas de cavitación generadas, en cambio cuanto menor sea la frecuencia, mayor será el tamaño de las burbujas de cavitación.

Debido a que cuanto más grandes sean dichas burbujas será necesario aplicar una mayor energía para conseguir la implosión de las burbujas y por tanto se conseguirá también una mayor energía, mientras que un tamaño de burbujas de cavitación más pequeño necesita menos energía para que lleguen a implotar, pero será menor la energía aportada [17]. Podemos afirmar que existe una clara ventaja al utilizar un sistema de lavado ultrasónico de alta frecuencia. Este permite generar en un mismo período de tiempo muchas más burbujas de cavitación, permitiendo de este modo que existe mayor homogeneidad de cavitación por unidad de superficie del objeto a limpiarse.

Al trabajar con un sistema de 37 KHz, la distancia entre picos y nodos de la onda sonora, es relativamente la mitad de la generada por un sistema de 20 KHz [10], por tanto, en el primer sistema durante un determinado periodo de tiempo se generan muchas más burbujas de cavitación de dimensiones menores, lo que permite llegar a secciones aún muy pequeñas por unidad de superficie.

2.6.5.1 Sistema de barrido total (Sweep Mode)

El uso de un generador de ultrasonido que cuente con un sistema de barrido total (sweep system) mejora notablemente la distribución de la cavitación ultrasónica.

Esta mejoría se produce debido a que la frecuencia de trabajo del generador se la modula alrededor de una frecuencia central, con variaciones aceptables de más o menos (+/-) 1 KHz.

Nuestro sistema que trabaja con un transductor sintonizado a 37 KHz, en el modo Sweep trabajará con una oscilación de frecuencia comprendida entre 36 y 37 KHz. Esta variación de frecuencia tiene

como objetivo fundamental evitar la formación de las “ondas estacionarias” en el interior del líquido. De formarse este tipo de ondas se producirían fenómenos de interferencia acústica cuando dos o más trenes de onda se entrecruzan en una región del espacio.

Por tanto, un sistema de barrido total (sweep Mode) con su acción reducirá los tiempos de limpieza, prevendrá el daño de partes delicadas, incrementará la homogeneidad de la cavitación ultrasónica y ayudará a producir este efecto en los líquidos en los que existan dificultades para cavitarse [10].

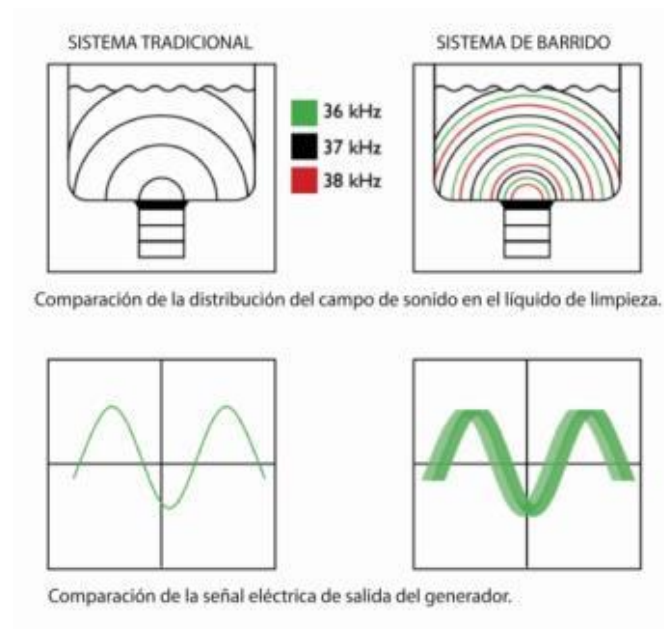


Figura 31: Modo de trabajo de Barrido “Sweep” [33]

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Método experimental

Para el desarrollo del proyecto se van a realizar 5 experimentos diferenciados. La razón es que con cada experimento se pretende buscar la manera más eficiente de limpieza. Para ello se usaran 4 disoluciones diferentes en condiciones diferentes y con procedimientos diferentes pero pese a ello todos las pruebas se realizan en el mismo equipo de baño ultrasónico.

El método en el que se ha puesto más énfasis ha sido en el que se realiza la inmersión completa de las piezas en el baño en conjunción con el uso de la solución limpiadora industrial Ultrasonic ya que a priori es la que reúne las mejores características para ser la opción más eficiente.

Por tanto, se llevaron a cabo las siguientes experiencias:

- Limpieza manual (Experiencia 1)
- Limpieza ultrasónica en aceite a ``Baño María`` (Experiencia 2)
- Limpieza ultrasónica en disolución industrial ULTRASONIC a ``Baño María`` (Experiencia 3)
- Limpieza ultrasónica en disolución de vinagre y limpia grasas comercial a `` Baño María `` (Experiencia 4)
- Limpieza ultrasónica por inmersión total en disolución industrial ULTRASONIC (Experiencia 5)

3.2 Verificación del proceso

Para validar el proceso de limpieza ultrasónico se va a utilizar la inspección visual de la pieza limpiada. Para ello se realizan fotografías y micrografías antes, y después de cada limpieza.

A pesar de que existen distintas técnicas y métodos para validar los resultados tras una limpieza, en el presente proyecto se ha elegido el método más sencillo, rápido para la inspección de armas , que consiste en el análisis visual de las piezas limpiadas. El análisis visual permite de manera muy intuitiva diferenciar entre los distintos grados de limpieza que se pueden alcanzar. Además los restos presentes en las armas son fácilmente identificables. La mayoría de los residuos están formados por restos de pólvora y restos de aceite quemados que se quedan adheridos al metal formando pequeños granos de color negro y verdoso que contrastan con el color gris brillante del metal limpio.

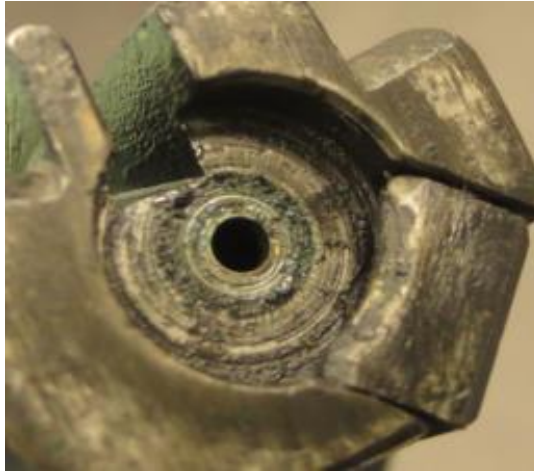


Figura 32: Cierre de fusil CETME L con restos de pólvora incrustados

Además se ha elegido el análisis visual puesto que es el método más utilizado para la inspección de armas en cualquier unidad operativa de las Fuerzas Armadas.

De manera complementaria se añaden imágenes de microscopio para afianzar la validación de los métodos de limpieza y aportar más datos para su comparación en busca del método de mayor eficiencia.

3.3 Equipo

El equipo seleccionado es el aparato de limpieza ultrasónica Elmasonic 300H. El equipo trabaja a una frecuencia fija de 37KHz. y una potencia de 1500W. Su máxima potencia ultrasónica es de 1200W. Además el equipo cuenta con una cuba de 28L de capacidad de acero inoxidable resistente a la erosión por cavitación.

Cabe destacar que el equipo funciona con una tensión de red de 220V que sumado a sus pequeñas dimensiones, ocupa menos de 0,05 m³, y con un peso contenido de 11Kg, el sistema podría ser desplegable en campamentos y maniobras de entidad de los alumnos de Infantería de Marina con escasas necesidades logísticas.



Figura 33: Equipo de Limpieza ultrasónico Elmasonic 300H usado en el proyecto [34]

El equipo es muy sencillo de utilizar con una unidad de mando de manejo cómodo y claramente estructurado, con instrumentos intuitivos y de uso sencillo.

Por último el equipo permite operar en distintos modos. Permite el uso del Modo Sweep y del modo de desgasificación. Permite también iniciar la limpieza a temperatura ambiente o con temperatura controlada en intervalos de 5°C. Además, permite la selección del tiempo de operación desde 1 a 30 minutos [34].

3.4 Elementos a limpiar

Para la realización del proyecto se van a limpiar los conjuntos de cierre de tres fusiles tipo CETME L y 2 pistolas tipo Star Súper B. En el caso de los fusiles CETME se selecciona el conjunto del cierre al ser la parte que más suciedad adquiere durante su uso ya que es sus elementos se acumulan restos de pólvora inquemados y restos de aceite lubricante. El motivo de limpiar únicamente el conjunto de cierre de los fusiles CETME es por una cuestión de tamaño del baño ultrasónico ya que el resto de partes que acumulan suciedad son demasiado grandes para el baño. Esto no ocurre con las pistolas que, debido a su inferior tamaño pueden ser sumergidas en el baño sin mayor problema.



Figura 34: Despiece del Fusil de asalto CETME L (Cierre rodeado en rojo) [35]



Figura 35 Despiece de la pistola Star Súper B [36]

Las armas han sido disparadas previamente a cada limpieza. En el caso de los fusiles CETME L, un cierre estaba en condiciones normales antes de ser usado. Otro estaba excesivamente engrasado y el

restante además de estar engrasado se mantenía en agua salada con el fin de oxidarlo antes de su limpieza.

En el caso de las pistolas, también eran disparadas antes de cada limpieza estando una muy engrasada y la otra no.

3.5 Pasos Previos

Antes de llevar a cabo la limpieza deben seguirse los siguientes pasos:

- Llenar de agua (en caso del ``Baño María ´´) o de la solución limpiadora la cuba de limpieza. Activar la función Degas para reducir la cantidad de gas disuelto en ellos.
- Calentar el agua o la solución limpiadora hasta la temperatura optima de uso.
- Introducir las piezas a limpiar en la cubeta de plástico (en caso del `` Baño María ´) o sobre el cestillo soporte.
- Introducir la cubeta de plástico o el cestillo soporte en la cuba con el agua o la disolución
- Configurar el tiempo de limpieza deseado y poner en marcha los ultrasonidos

3.6 Desarrollo practico

3.6.1 Experiencia 1

En la primera experiencia se realiza la limpieza manual de un cierre de fusil CETME L y de una pistola tipo STAR SUPER B.

Para llevar a cabo la limpieza se utiliza el Kit de limpieza de usuario del Fusil HK ya que es kit reglamentario de limpieza de armamento utilizado por los alumnos de Infantería de Marina y que además contiene todos los elementos necesarios para la limpieza de un arma.



Figura 36 : Kit de limpieza de armamento

El kit contiene una feminela montable con 3 cabezales intercambiables con cerdas metálicas y sintéticas. La función de este elemento es elimina por fricción los restos de pólvora acumulados. También se incluye una botella de aceite sintético para armas tipo VV-L-8000CTDS. Además, se

encuentran dos paños de algodón. Por último, un cepillo de cerdas sintéticas que se emplea para limpiar las zonas de más difícil acceso y para eliminar por fricción los restos de óxido y aceites quemados.

Para la limpieza manual se han dedicado 45 minutos de trabajo para la pistola y 25 minutos al cierre del CETME. Lo que suma un total de 70 minutos de trabajo.

El proceso de limpieza manual de las armas es el siguiente.

Se comienza por desmontar arma. Se engrasan ligeramente todas piezas con un paño de algodón y con la ayuda de la feminela y el cepillo se atacan las zonas con suciedad hasta que desaparezca. Por ultimo con otro paño de algodón, se retiran los restos de suciedad y se engrasan muy ligeramente todas las partes móviles del arma.



Figura 37: Comparativa de cuerpo de pistola Star antes y después de la limpieza

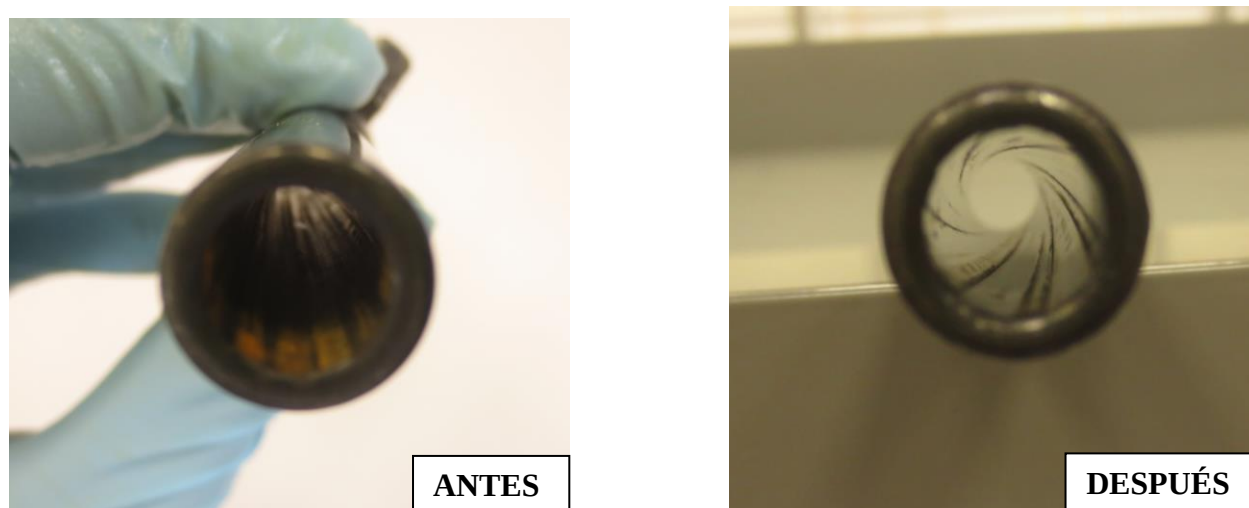


Figura 38: Comparativa del cañón de pistola Star antes y después de su limpieza

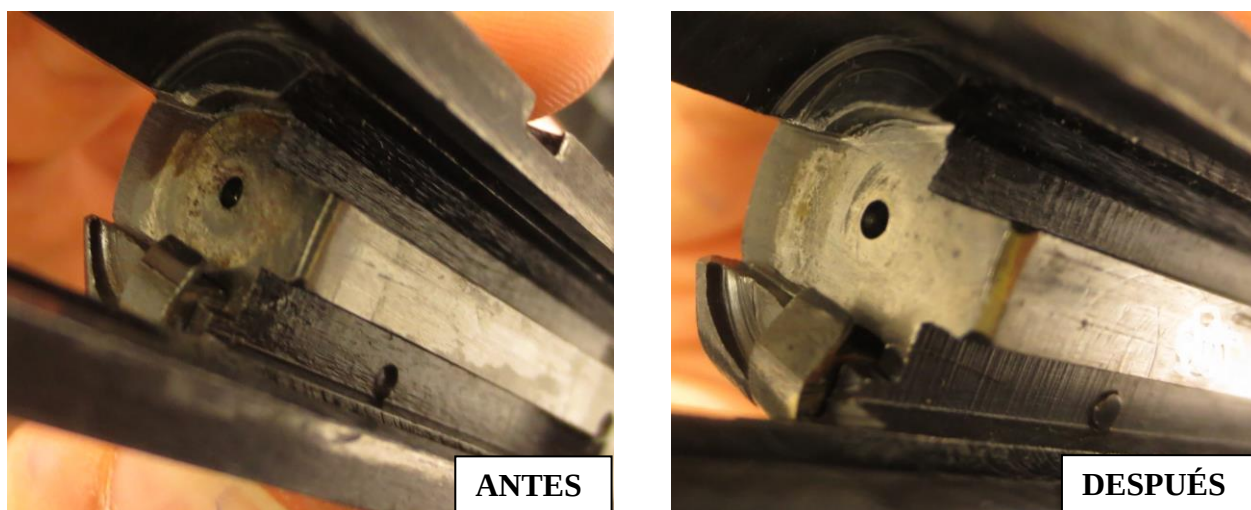


Figura 39: Vista de frontal de cierre de la pistola Star antes y después de la limpieza

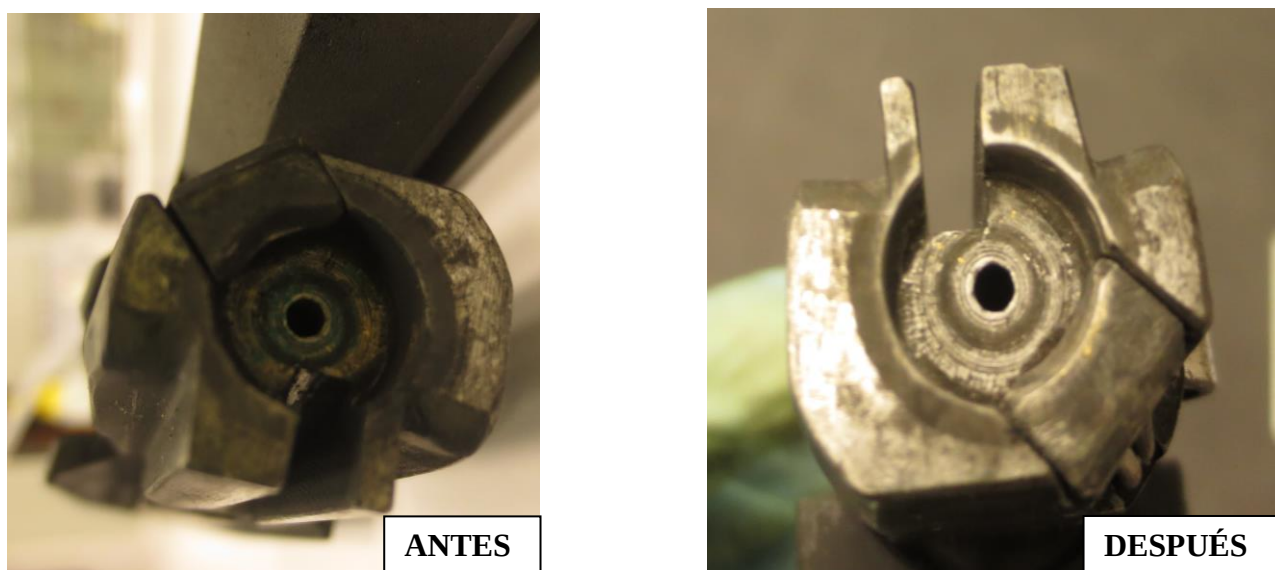


Figura 40: Vista frontal del cierre de un fusil CETME antes y tras su limpieza

Como se puede comprobar en las imágenes, la limpieza, anual es un método eficaz que elimina la totalidad de los restos recientes en el armamento así como el óxido presente. Aunque la inversión de tiempo es mayor que en la limpieza ultrasónica, los resultados obtenidos muestran la eficacia de este método.

3.6.2 Experiencia 2

En esta experiencia, la limpieza de armamento ya se realiza por medio del baño ultrasónico.

En esta ocasión, como solución limpiadora se utiliza aceite sintético de armas VV-L-8000CTDS. El motivo de usar esta solución es que el aceite es el usado actualmente para la limpieza de armamento de manera manual. Además el uso de este aceite reduce el coste de la limpieza como se verá en el apartado de viabilidad.

En la práctica, las piezas a limpiar son sumergidas en el aceite dentro de un recipiente que, a su vez, es sumergido en el baño ultrasónico. Se han realizado 3 pruebas con este método utilizando varias piezas tanto de Pistola, cañón manguito y corredera, como de CETME, un cierre.



Figura 41: Montaje para la limpieza a "Baño María" con aceite

El motivo de que esto sea así es porque el aceite utilizado tiene una tensión superficial y una densidad superior a la de las soluciones acuosas recomendadas para este tipo de prácticas, por tanto la propagación de las ondas ultrasónicas en el medio no sería el adecuado. Al emitirse la onda ultrasónica, debido a la mala propagación en el medio la zona muerta sería mucho mayor. Al sumergir el contenedor en una disolución acuosa, donde la propagación de las ondas sonoras es la adecuada, se registra en el aceite un aumento de la cavitación.

El proceso de limpieza se lleva a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial entorno a 40° C del aceite.

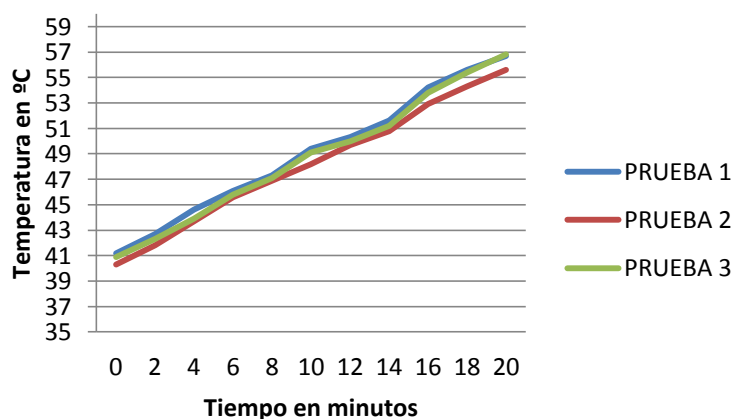


Figura 42: Evolución de temperatura del aceite durante la limpieza

Como se puede ver en la figura superior, el aumento de la temperatura es cercano a 1 °C por minuto. A la temperatura de 57 °C. A pesar de ello, debido a la alta viscosidad del aceite en comparación con el resto de disoluciones con base acuosa utilizadas, los niveles de cavitación registrados son muy inferiores a los esperados.

3.6.2.1 Prueba 1

Las partes de armas introducidas tenían restos de pólvora y presentaban una ligera oxidación.

En las imágenes se observan dos piezas de la pistola STAR. Las imágenes en el lado izquierdo son una foto a simple vista del cañón y la recámara, donde se aprecian los restos de pólvora incrustados en el ánima del arma. Las imágenes del lado derecho corresponden al mismo cañón en el que se aprecia que se elimina parte de los restos del ánima aunque se nota como muchos restos permanecen en el estriado del ánima (parte interna del cañón).

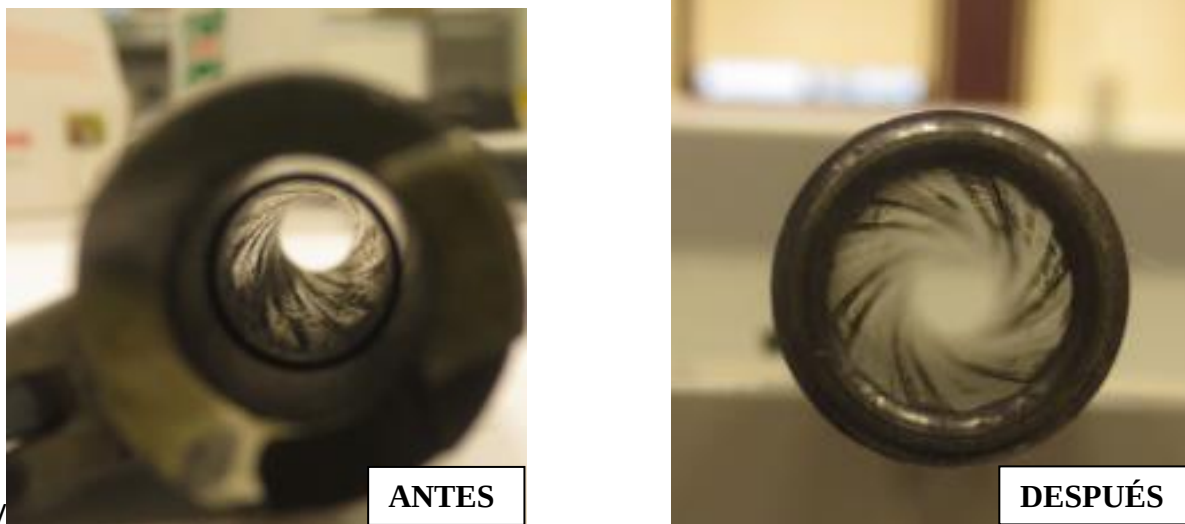


Figura 43: Cañón de la pistola Star antes y después de su limpieza

En las siguientes imágenes se muestra el maguito de una pistola Star con restos de óxido en la base (izquierda) y el mismo manguito tras ser limpiado. A simple vista se observa que gran parte del óxido se ha eliminado aunque se siguen distinguiendo restos en la base.



Figura 44: Manguito de la pistola Star antes y después de ser limpiado.

En las imágenes de microscopio se aprecia la disminución del óxido presente en la base del manguito. A pesar de que a simple vista parece que su eliminación es completa, la micrografía muestra lo contrario.

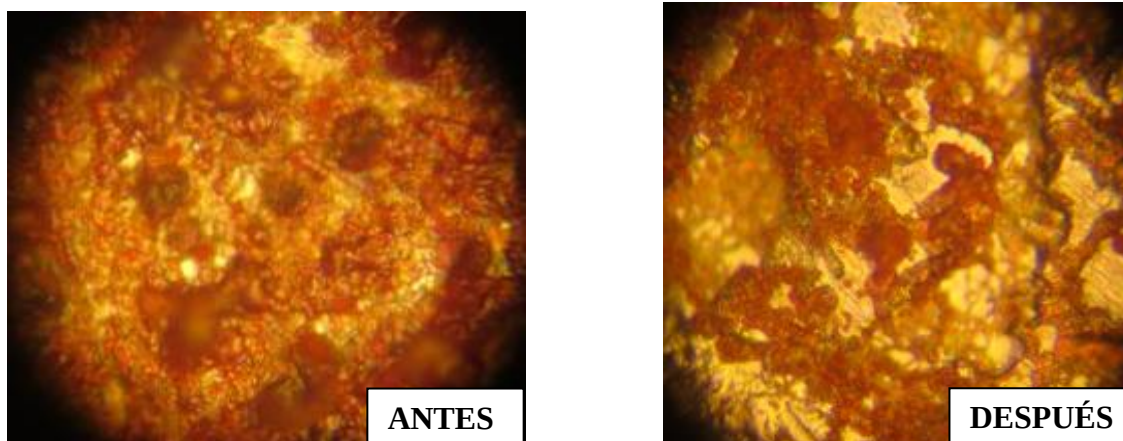


Figura 45: Micrografía de la base del manguito de la pistola Star

Las imágenes muestran las mismas piezas tras haber sido sometidas a 20 minutos de baño ultrasónico. Se puede observar tanto a simple vista como al microscopio que se elimina parte de los restos de pólvora y se reduce la presencia de óxido.

3.6.2.2 Prueba 2

En esta prueba se repite el proceso anterior aplicando la misma solución limpiadora, la misma temperatura de operación (40°C) y el mismo tiempo de proceso (20 minutos).

En la imagen de la izquierda se puede observar como el cierre de la pistola tiene restos de pólvora y aceite quemado incrustados. En la imagen de la derecha vemos, tras ser sometido al baño ultrasónico, que esos restos han desaparecido casi por completo.

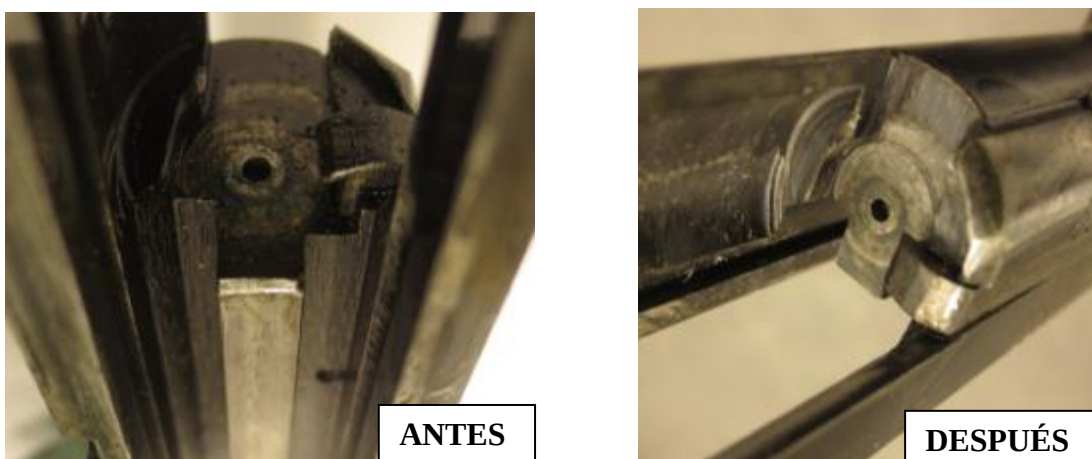


Figura 46: Cierre de la pistola Star antes y después de ser limpiados

3.6.2.3 Prueba 3

En esta prueba también se repite el proceso anterior aplicando la misma solución limpiadora (Aceite VV-L-800), la misma temperatura de operación (40°C) y el mismo tiempo de proceso (20 minutos).

En la imagen izquierda se observa un cierre de CETME L con restos de pólvora incrustados. En la imagen derecha se puede observar como cierta parte de los restos han sido eliminado, pero siguen quedando bastantes restos todavía adheridos.



Figura 47 : Cierre de fusil CETME L antes y después de ser limpiados

En las imágenes se muestra la micrografía del cierre del Cetme en el que se observa los restos de pólvora incrustados en el metal en la imagen izquierda y como en la imagen derecha buena parte de esos restos han sido eliminados.

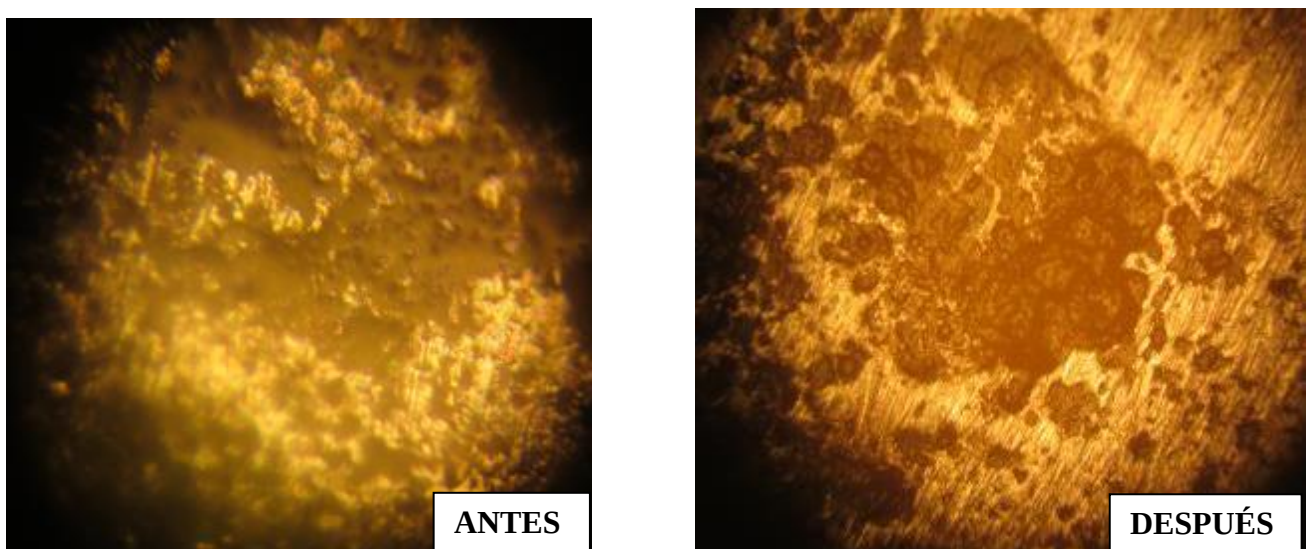


Figura 48: Micrografía del cierre del Fusil CETME antes y después de la limpieza

Tras la realización de la prueba, se filtró el aceite utilizado con el fin de saber la cantidad de residuos que estaban presentes en él. Para filtrar los 2L de aceite utilizado fueron necesarios 3 papeles de filtro.

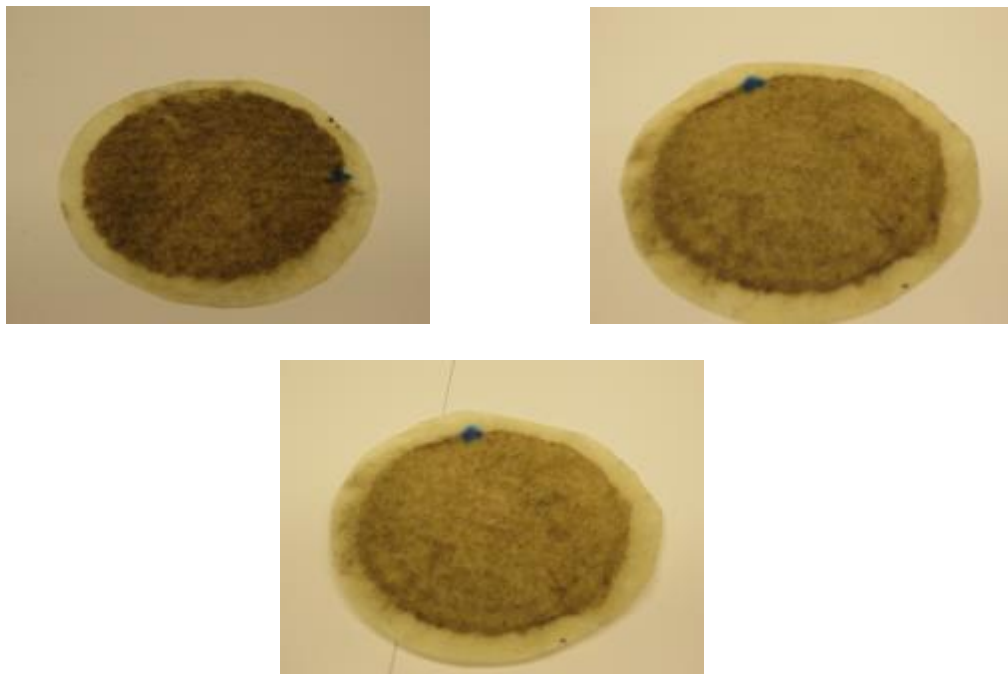


Figura 49: Conjunto de filtros utilizado para el filtrado del aceite tras su uso

Cada filtro acumulo un total de 0,47, 0,44 y 0,37 gramos de partículas respectivamente. Lo que hace un total de 1,28 gramos de restos eliminado.

Por lo tanto, se puede concluir que la solución limpiadora es eficaz ya que se consigue eliminar la suciedad de las diferentes partes de las armas seleccionadas. Sin embargo los resultados todavía son mejorables y como gran desventaja, una vez se extraen la pieza del baño, el usuario debe eliminar manualmente el aceite que impregna las piezas, por lo que el tiempo de operación aumenta hasta los 25- 30 minutos dependiendo del tamaño de la pieza.

3.6.3 *Experiencia 3*

En esta experiencia, la limpieza de armamento se también realiza por medio del baño ultrasónico.

En esta experiencia como solución limpiadora se utiliza una disolución a base de los líquidos limpiadores industriales, el ULTRANOSNIC-7 y el ULTRASONIC-A. La disolución se prepara con base acuosa y con un porcentaje en masa del 3% y del 0,5% de cada producto respectivamente. El motivo de usar esta disolución es que la combinación de ambos productos es la óptima y más recomendada a nivel industrial para el desengrase de piezas metálicas y para la eliminación de partículas incrustadas sobre la superficie. Las piezas a limpiar reúnen todas estas características.

En la práctica, las piezas a limpiar son sumergidas en la disolución dentro de un recipiente que, a su vez, es sumergido en el baño ultrasónico. Se han realizado 3 pruebas con este método utilizando el mismo tiempo de piezas que en la experiencia anterior.



Figura 50: Montaje para la limpieza a “Baño María “en disolución Ultrasonic

Pese a que la disolución si sea la óptima para ser usada directamente dentro del baño ultrasónico, se decide seguir el método de la experiencia anterior para validar su funcionalidad y para ahorrar costes de material. En el contenedor solo son necesarios 2L de disolución para llenarlo hasta el nivel requerido. En cambio, sin el contenedor, prueba que se realiza en la Experiencia 4, serían necesarios 16 L. El proceso de limpieza se lleva a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial de la disolución entorno a 60° C

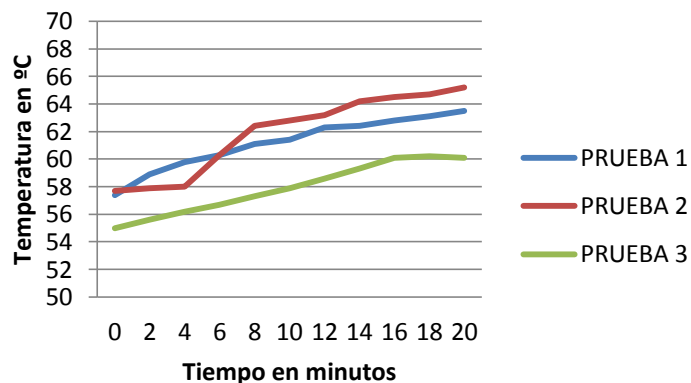


Figura 51: Evolución de las temperaturas de la disolución durante las pruebas

Como muestra la figura, la diferencia entre la temperatura inicial y final es menor que en la experiencia anterior. La disolución limpiadora se mantiene en unos valores de temperatura que son los más adecuados según el fabricante y donde los valores de cavitación son los óptimos.

3.6.3.1 Prueba 1

En la primera prueba se procede a limpiar las mismas piezas que se limpiaron en la primera experiencia. De esta manera podrán compararse ambas. Como muestran las imágenes, las piezas presentan tanto restos de pólvora como de óxido.

En la imagen izquierda se muestra el cañón de la pistola Star con abundantes residuos. En la imagen derecha se observa que la mayoría de los restos han sido eliminados tras la limpieza, quedando algunos restos pegados al estriado del ánima.



Figura 52: Cañón de pistola Star antes y después de ser limpiado

En las imágenes se aprecia como el óxido presente el manguito de pistola Star presente antes de la limpieza, desaparece en gran medida tras el tratamiento de la pieza. Además de por evaluación visual, en la micrografía de la pieza se distingue claramente como el óxido presente desaparece



Figura 53: Manguito oxidado de la pistola Star antes y después de la limpieza

En la prueba se ve como se elimina la gran mayoría de los residuos. Este resultado se puede apreciar tanto a simple vista como en la imagen del microscopio. Los resultados de esta prueba son mejores que los de la misma prueba realizan en la experiencia anterior.

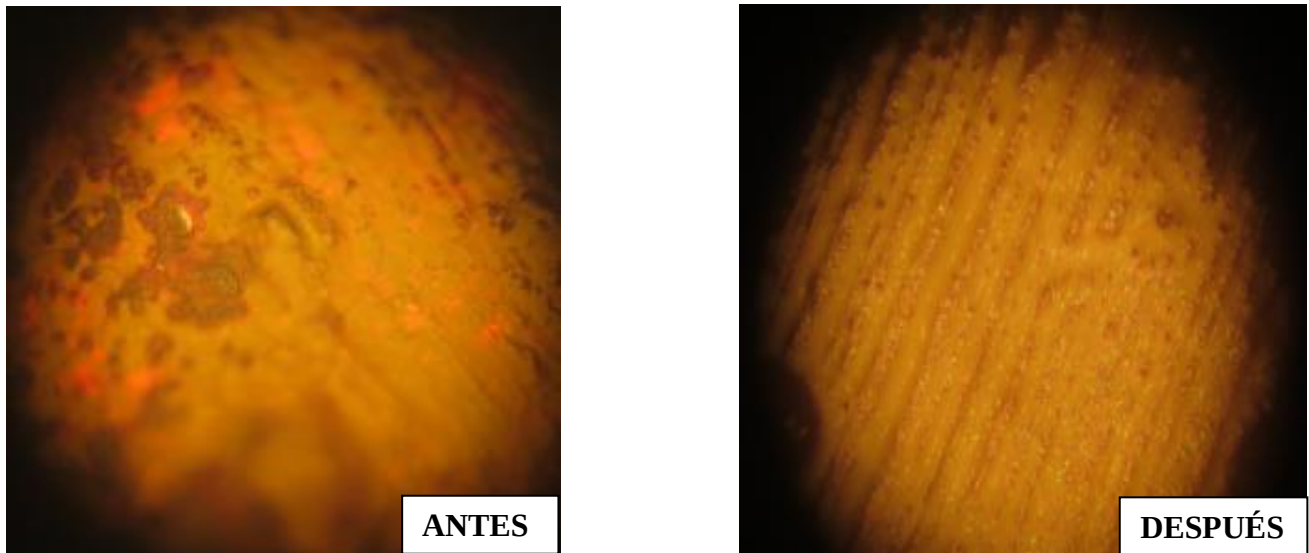


Figura 54: Imagen de microscopio Dell maguito de pistola Star antes y tras su limpieza

3.6.3.2 Prueba 2

Al igual que en la prueba anterior, se repite el tipo de piezas que se emplearon en la segunda prueba de la primera experiencia con la salvedad de que en esta prueba se añaden las fotos de la corredera completa ya que en esta pistola presentaba una gran oxidación. Las condiciones de operación, temperatura y tiempo, son las mismas que en la prueba anterior.

En este caso se puede ver como en la imagen de la izquierda el cierre de pistola tiene restos adheridos en el cierre. En la imagen derecha, se ve claramente como esos restos han desaparecido tras el baño ultrasónico

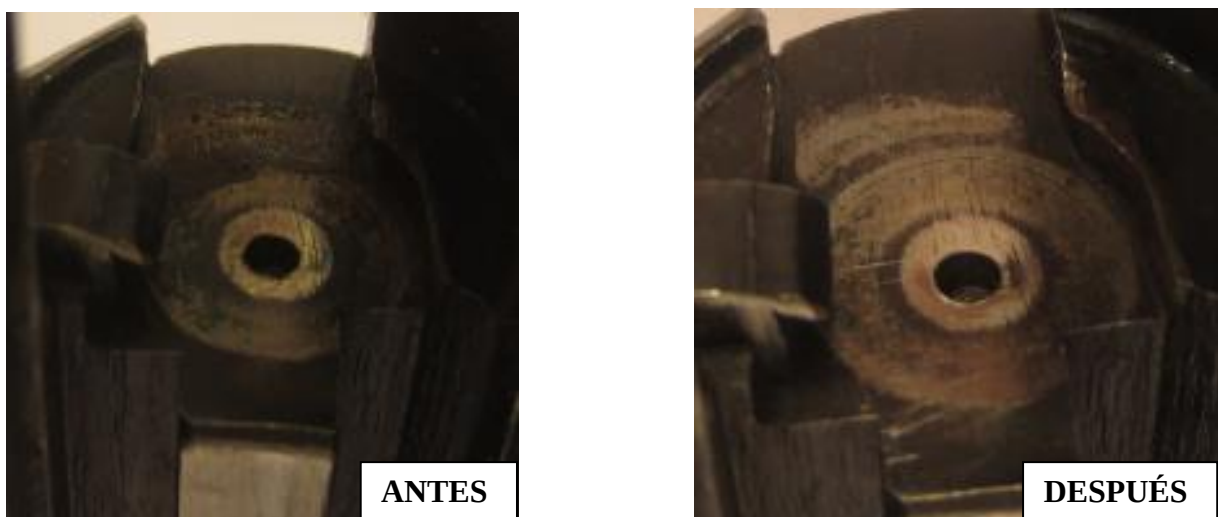


Figura 55: Cierre de pistola Star antes y después de su limpieza

La corredera donde se aloja el cierre de las imágenes superiores presentaba una gran cantidad de óxido en su parte interior como se muestra en la imagen izquierda. Tras su limpieza, el óxido es eliminado mayoritariamente. Visualmente no se aprecian restos.

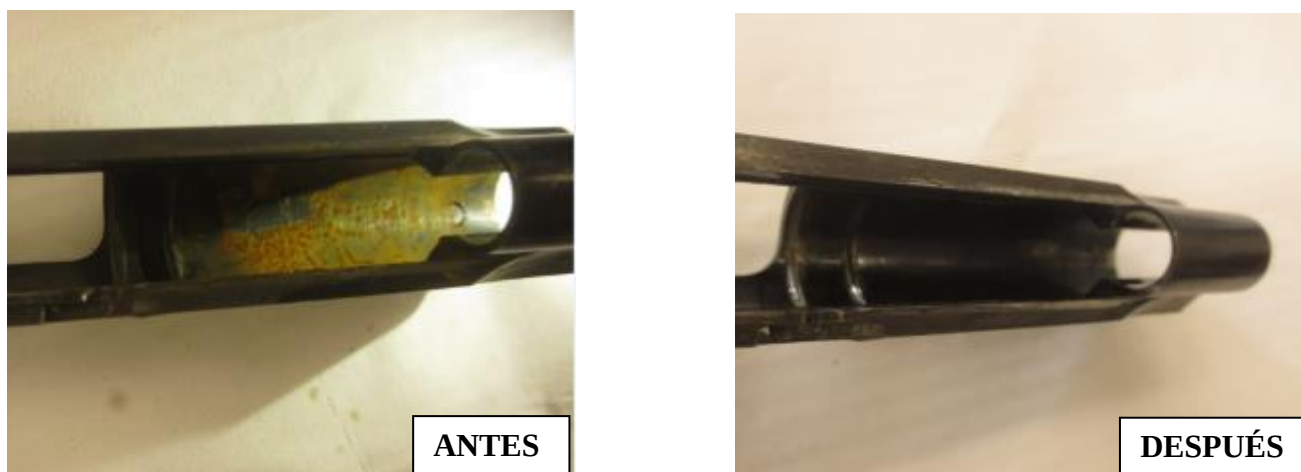


Figura 56: Corredera oxidada de la pistola Star antes y después de su limpieza

En las micrografías de la corredera se comprueba como si se elimina la gran mayoría del óxido presente en la superficie.

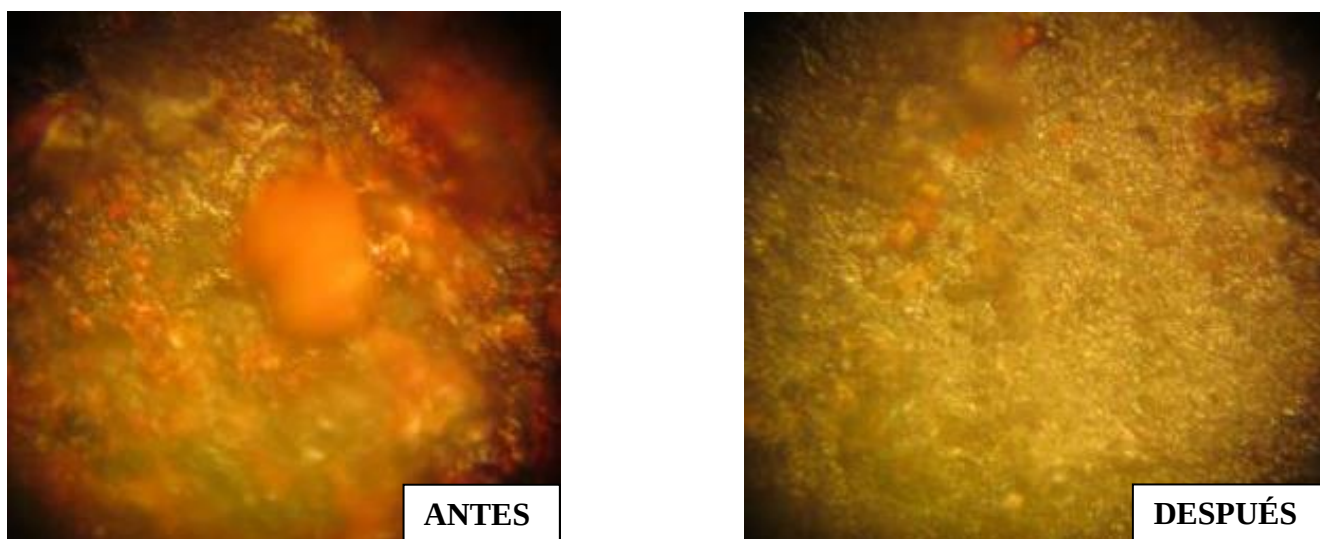


Figura 57: Micrografías de la corredera de la pistola Star

Como se puede ver, al igual que en la prueba 1, los resultados obtenidos supera a los obtenidos en la primera experiencia. Se puede distinguir que el óxido y el los restos de pólvora se eliminan en gran medida.

3.6.3.3 Prueba 3

En esta prueba también se repite el proceso anterior aplicando la misma disolución limpiadora, la misma temperatura de operación y el mismo tiempo de proceso. Las piezas utilizadas, son de nuevo del mismo tipo que las utilizadas en la misma prueba de la anterior experiencia.

En la imagen izquierda se observa un cierre de CETME L con restos de pólvora incrustados. En la imagen derecha se aprecia como una gran parte de los restos han sido eliminado, pero siguen quedando restos todavía adheridos. Además, en la micrografía se confirma la disminución de restos adheridos a la superficie a limpiar.



Figura 58: Cierre de fusil CETME antes y después de la limpieza ultrasónica

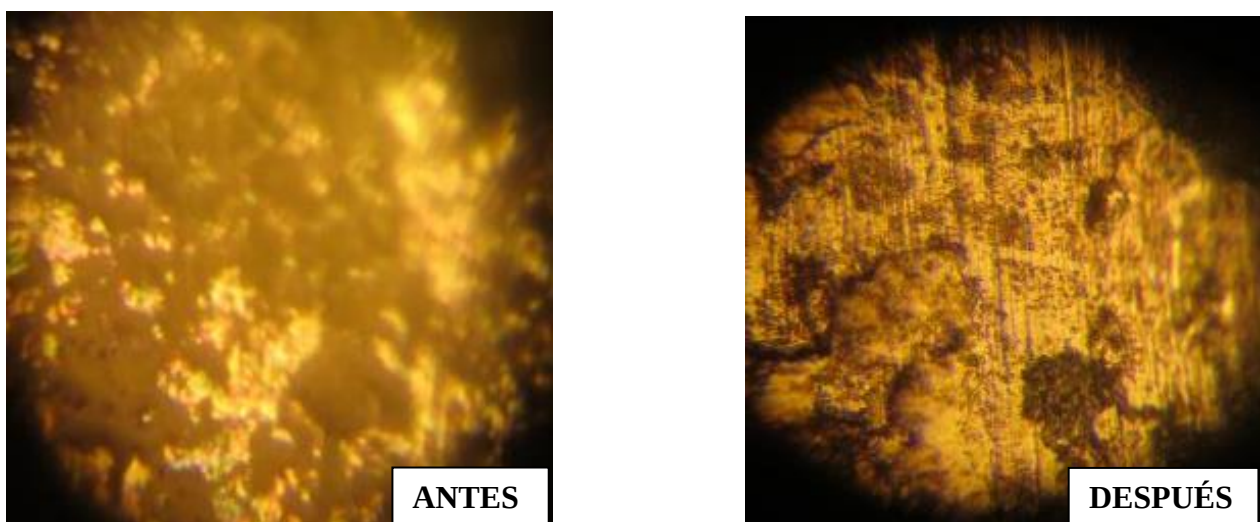


Figura 59: Micrografía del cierre de CETME en antes y después de la limpieza

Al igual que la experiencia anterior, después de las 3 pruebas se ha filtrado la solución limpiadora para averiguar cuanta suciedad se había logrado eliminar. A diferencia de la anterior experiencia en la que el aceite se reutilizó para las 3 pruebas, en la presente experiencia se usó una disolución nueva para cada prueba.

Cada filtro acumuló un total de 0,46 g 0,39g y 0,51g de residuos respectivamente. Esto indica que cada disolución de la Experiencia 3 tiene aproximadamente 3 veces más residuos que la solución limpiadora de la Experiencia 2

Por lo tanto podemos concluir que el método utilizado en esta experiencia no solo es válido si no que además es mejor que el utilizado en la Experiencia 2.

Además de la mejora en los resultados de limpieza, las piezas salen del baño prácticamente seco y no es necesario invertir tiempo de trabajo de usuario en su secado. Esto permite que la limpieza de la pieza se realice un tiempo menor.

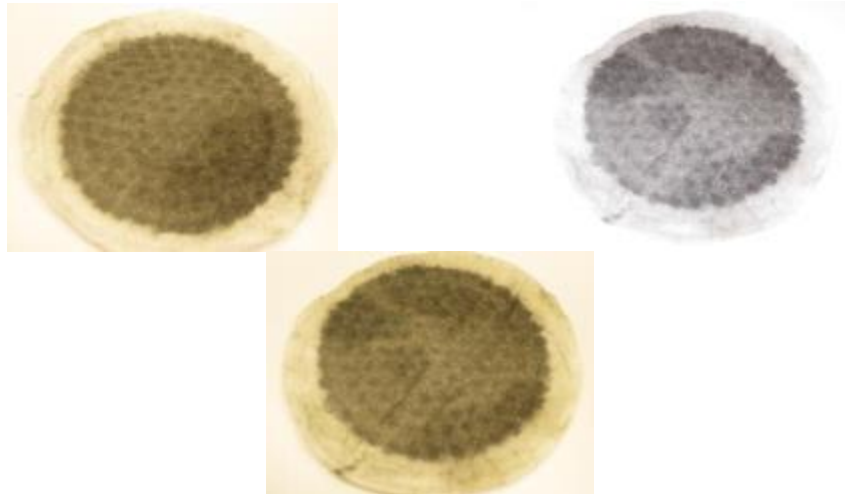


Figura 60: Filtros usados en la filtración de la disolución de Ultrasonics

3.6.4 Experiencia 4

En esta experiencia, la limpieza de armamento se también realiza por medio del baño ultrasónico.

En esta experiencia como solución limpiadora se utilizan dos disoluciones diferentes. La primera a base de vinagre casero comercial en base acuosa, la disolución se prepara con un porcentaje en masa del 20%. El motivo de usar esta disolución es que es ampliamente recomendada en internet [37] La segunda disolución se realiza a base un quita grasas comercial domestico también al 20% en peso. Esta disolución también es recomendada en internet por su capacidad desengrasante.

En la práctica, las piezas a limpiar son sumergidas en la disolución dentro de un recipiente que, a su vez, es sumergido en el baño ultrasónico. Se han realizado 2 pruebas con este método utilizando dos piezas muy oxidadas, cada una de ellas en una solución diferente.



Figura 61: Montaje para la limpieza a “Baño María” con disolución de vinagre

A pesar de que la disolución es óptima para ser usada directamente dentro del baño ultrasónico, se decide seguir el método de la experiencia anterior para validar su funcionalidad y al solo disponer de dos piezas, no es necesario llenar el baño.

El proceso de limpieza se lleva a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial de la disolución entorno a 60° C

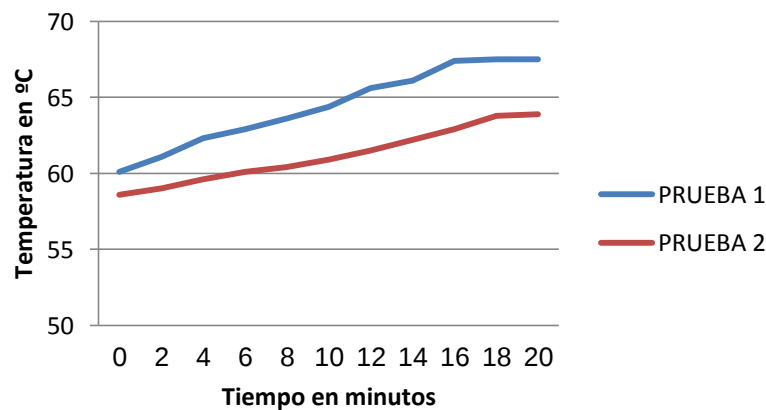


Figura 62: Evolución de las temperatura en la limpieza con vinagre y quitagrasas

En la figura se muestra como las temperaturas registradas se muestran en unos valores adecuados para tener unos niveles de cavitación óptimos en disoluciones acuosas.

3.6.4.1 Prueba 1

Para esta prueba se ha utilizado el cerrojo de un fusil Máuser con un alto nivel de oxidación. El cerrojo ha estado 20 minutos en baño ultrasónico con la disolución de vinagre. En la imagen izquierda se muestra un cierre de fusil Máuser completamente oxidado. En la imagen derecha se ve el mismo cierre tras su limpieza ultrasónica en disolución de vinagre. Se observa que la cantidad de óxido eliminada es mínima. Los resultados se alejan mucho de los esperados

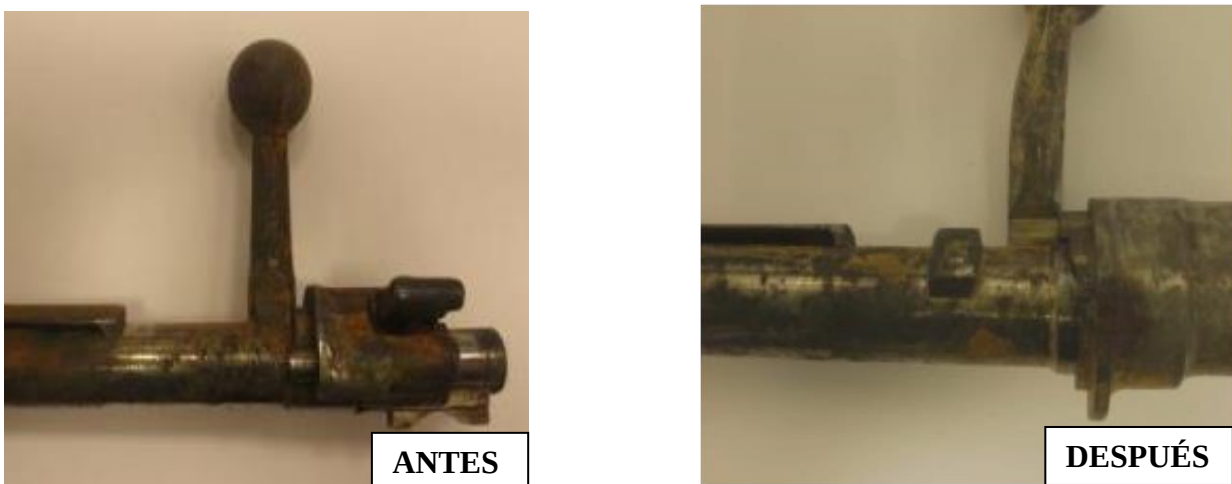


Figura 63: Cierre de fusil Máuser antes y después de su limpieza

En las imágenes de microscopio se distingue claramente como el óxido presente en el cierre apenas desaparece tras la limpieza.

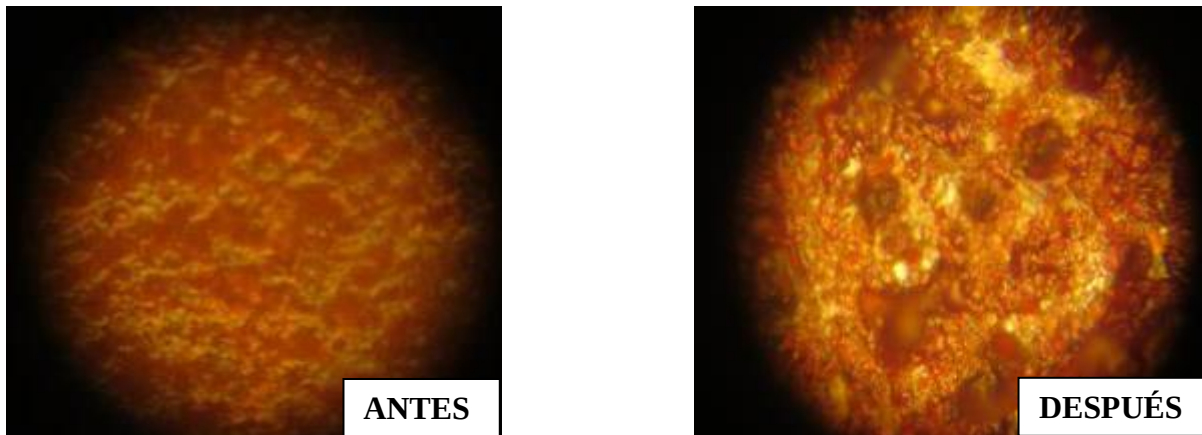


Figura 64: Micrografía del cierre del fusil Maúser antes y después de la limpieza

3.6.4.2 Prueba 2

En esta prueba se ha realizado el mismo procedimiento que en la anterior, con la diferencia que ahora la pieza es el cierre de un CETME y además está muy engrasada. Además la disolución ya no es a base de vinagre si no que es a base de una quitagrasas comercial.



Figura 65: Cierre de CETME muy engrasada antes y después de la limpieza

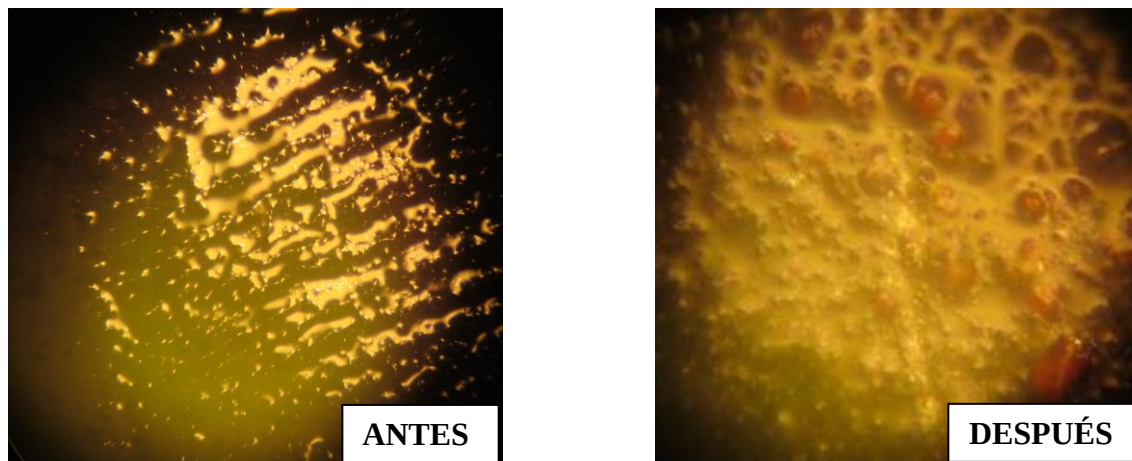


Figura 66: Micrografía del cierre de CETME .antes y después de su limpieza

Como demuestran las imágenes, no solo la disolución no elimina suciedad, sino que genera óxido. Tanto visualmente como en las imágenes de microscopio se aprecia que la grasa se elimina en gran medida pero se genera óxido en la pieza. Por tanto, tras las dos experiencias, se comprueba que el quita grasas tampoco es válido para la limpieza de armas.

Se filtraron las disoluciones empleadas para cada una de las pruebas. El peso total de los residuos es de 0,21g. Una cantidad mucho inferior a la obtenida por cualquier otro método.

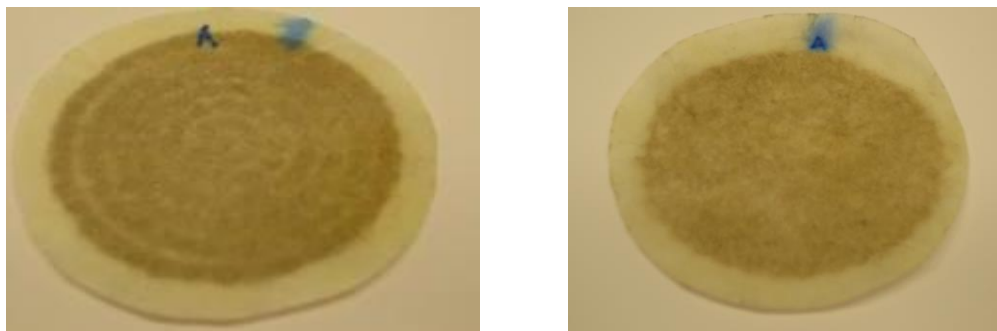


Figura 67: Filtros usados para el filtrado de ambas disoluciones tras la limpieza.

3.6.5 Experiencia 5

En esta experiencia, al igual que en las dos anteriores, la limpieza de armamento se también realiza por medio del baño ultrasónico.

En esta experiencia se vuelve a utilizar como solución limpiadora la ya usada en la anterior Experiencia. La disolución está compuesta a base de los líquidos limpiadores industriales, el ULTRANOSNIC-7 y el ULTRASONIC-A. La disolución se prepara con base acuosa y con un porcentaje en masa del 3% y del 0,5% de cada producto respectivamente.

En esta experiencia se realizara una única prueba. A diferencia de las dos anteriores, ya no se usará el contenedor. En esta prueba las armas irán sumergidas directamente en el baño ultrasónico. Por tanto, al disponer de más espacio se pueden limpiar más piezas a la vez. Por el contrario, el gasto de líquido

limpiador es mucho mayor ya que el volumen de la disolución limpiadora pasa de 2L a 18L. Sin embargo, en proporción con la experiencia 2, la rentabilidad es similar.



Figura 68 : Cestillo para la colación de las piezas directamente en el baño ultrasónico

Además, al estar las armas en contacto directo con la disolución la propagación de las ondas sónicas en el medio acuso es mucho más adecuado. Por último, las piezas están situadas en un cestillo especial que coloca las piezas en el punto de cavitación óptimo dentro del baño.

El proceso de limpieza se lleva a cabo durante 20 minutos y con una temperatura inicial de la disolución entorno a 60° C.

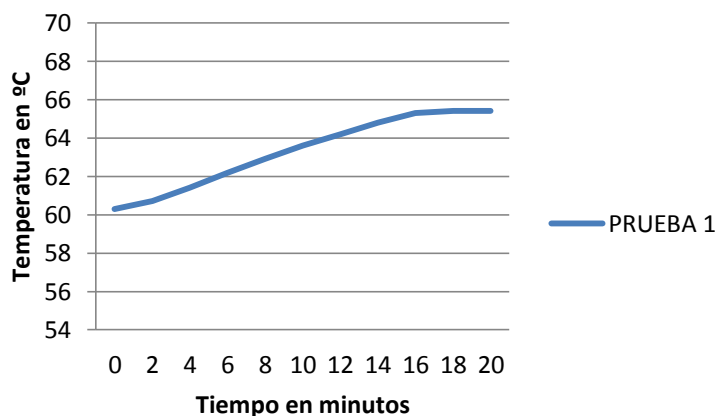


Figura 69: Evolución de la temperatura de la disolución durante la prueba

Como muestra la figura, las temperaturas registradas durante toda la limpieza varían en apenas 6°C. Esto permite mantener a la disolución limpiadora en el rango de temperaturas más adecuado para obtener los niveles óptimos de cavitación

3.6.5.1 Prueba 1



Figura 70: Distribución de las piezas a limpiar en el cestillo

Para esta prueba, se procede a limpiar todas las piezas a la vez debido a que, como se muestra en la figura 67, al disponer del cestillo se tiene espacio suficiente para poder sumergirlas todas a un tiempo en la cuba de lavado.

Como se muestra en las imágenes, la diferencia entre el cañón de pistola Star limpio y sucio es más que evidente. Los residuos han desaparecido y solo quedan pequeños restos en la recámara. Como se puede apreciar, el ánima del cañón queda totalmente limpia.



Figura 71: Cañón de pistola Star antes y después de su limpieza.



Figura 72: Cañón de pistola Star de perfil antes y después del baño ultrasónico

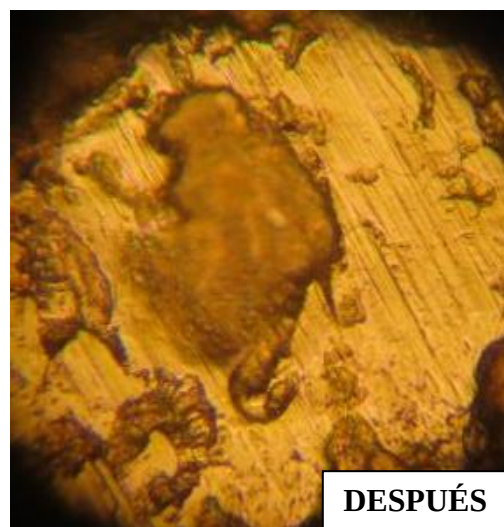
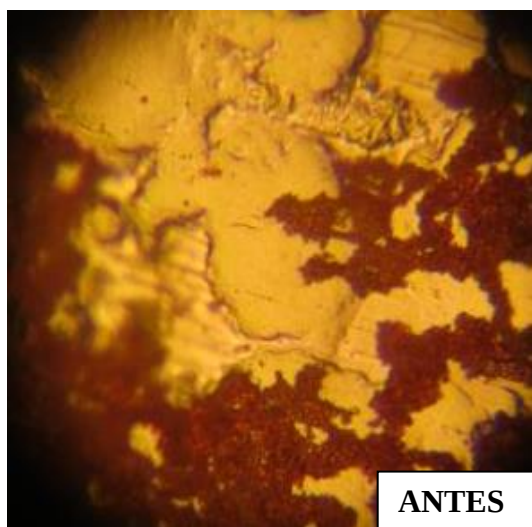


Figura 73: Micrografía del cañón donde pistola antes y después de la limpieza .

No solo la limpieza se produce dentro del cañón y no solo afecta a los restos de pólvora. Como se distingue en las siguientes imágenes a simple vista y en la micrografía, el óxido presente en el cañón también es eliminado.

En esta prueba, también se ha logrado limpiar el óxido y suciedad presente en otras piezas de la pistola.

En las siguientes imágenes se muestra como tras el lavado ultrasónico el óxido presente en la empuñadura del arma, en la corredera y en el disparador son eliminados por completo. Esto se puede distinguir tanto a simple vista como en las imágenes de microscopio de las zonas afectadas.

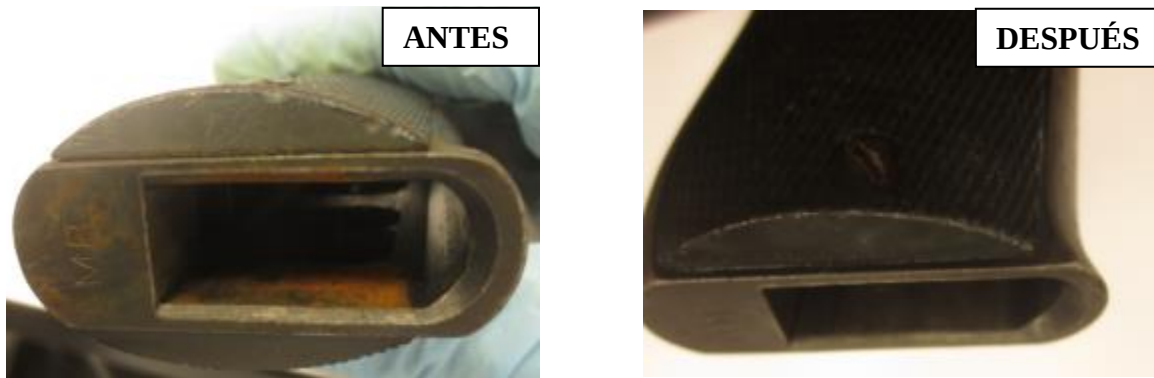


Figura 74: Empuñadura oxidada de pistola estar en su estado original y tras el lavado



Figura 75: Comparativa de la corredera de pistola Star antes y después del lavado .

Las micrografías confirman lo que se aprecia a simple vista. El óxido presente en la pieza queda eliminado.

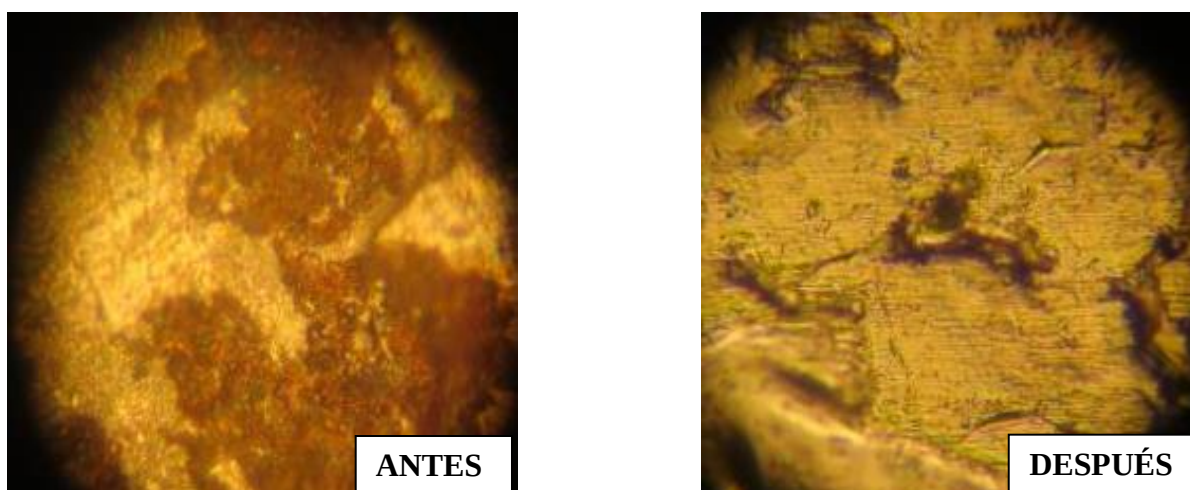


Figura 76: Micrografía de la corredera de la pistola Star



Figura 77: Pistoleta de la Pistola Star antes y después de su limpieza.

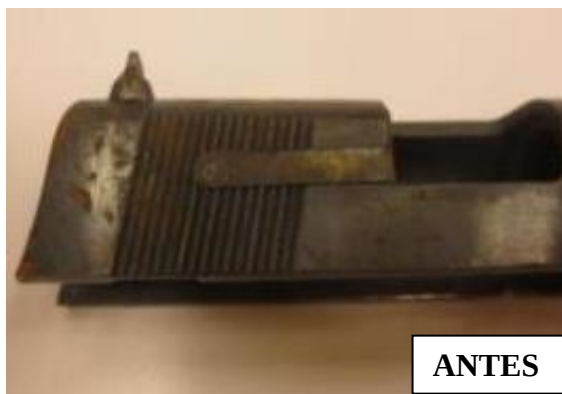


Figura 78: Corredera de la pistola Star antes del lavado y después .

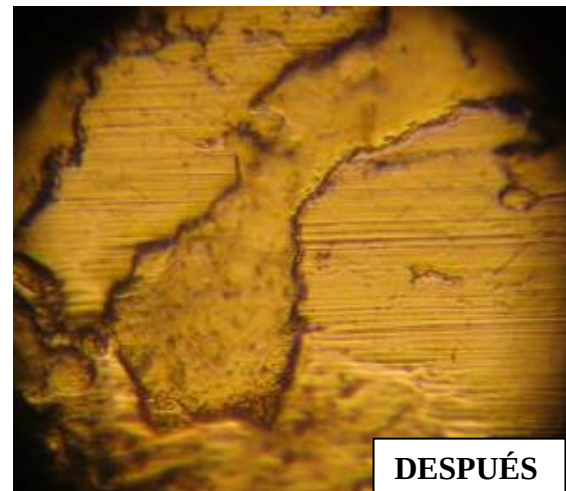
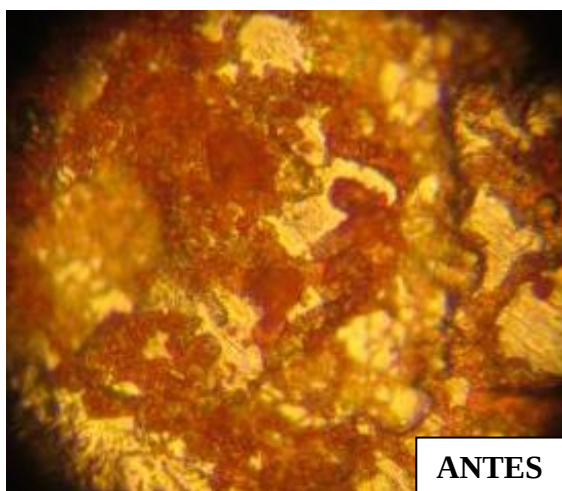


Figura 79: Micrografía de la corredera de la pistola Star.

No solo el método es efectivo para eliminar el óxido. En la misma prueba se somete al lavado ultrasónico a varias piezas con restos de pólvora y de aceite. Como muestran las imágenes, el baño

elimina la gran mayoría de los restos alcanzando unos niveles de limpieza adecuados. Tanto a simple vista como en las imágenes de microscopio se aprecia el grado de limpieza alcanzado.

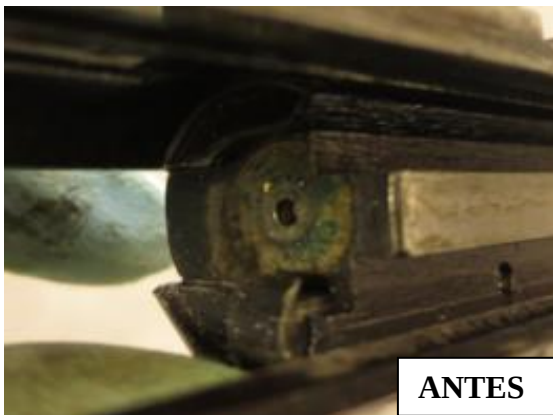


Figura 80: Vista frontal del cierre de pistola Star.



Figura 81: Vista frontal del cierre de fusil CETME.

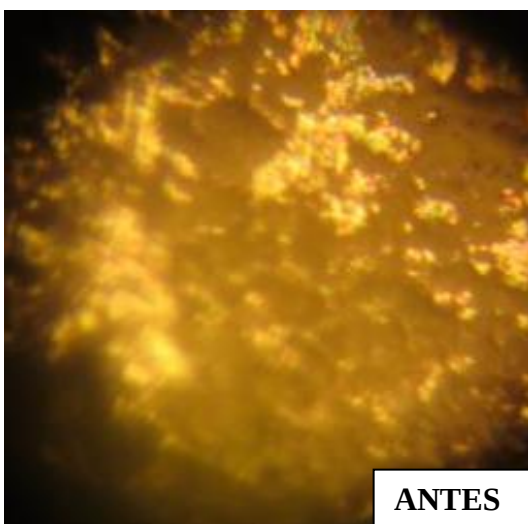


Figura 82: Imagen de microscopio del cierre del CETME.

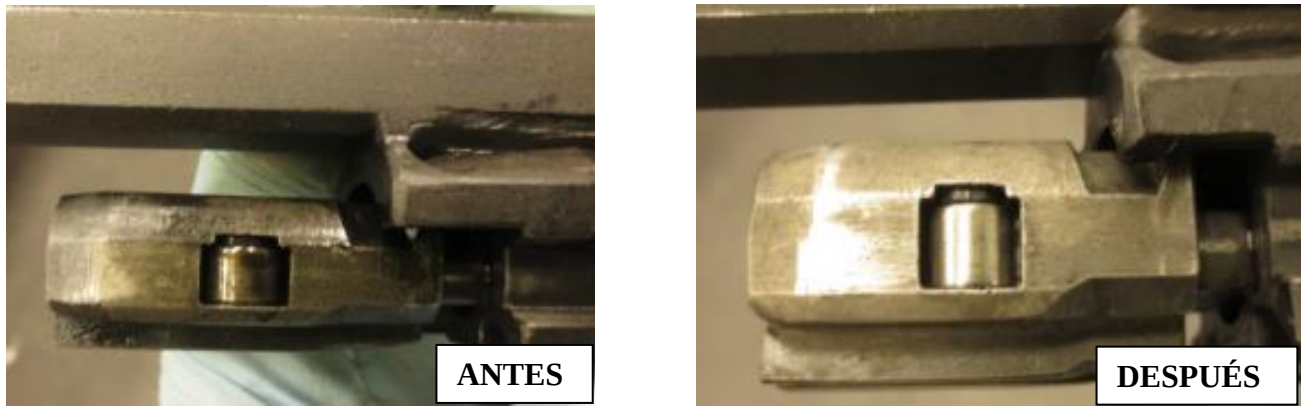


Figura 83: Vista de perfil del Cierre del fusil CETME.

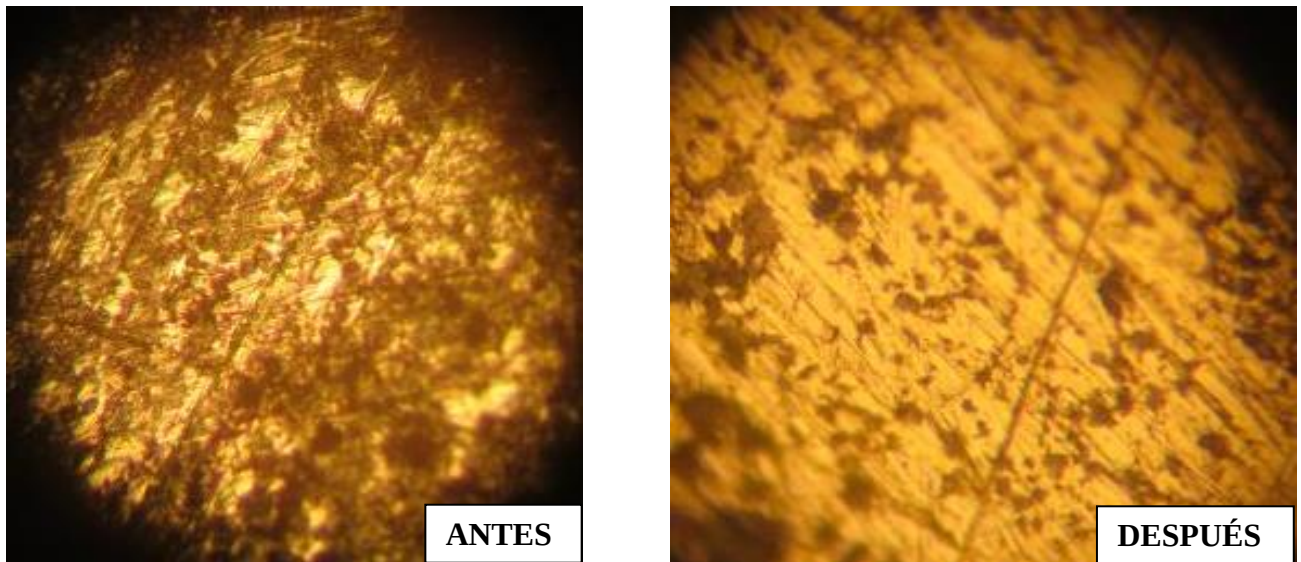


Figura 84 : Micrografía del perfil del cierre del fusil CETME.

Como se puede apreciar en las imágenes comparativas, la diferencia entre el antes y el después de la limpieza ultrasónica son las más efectivas de todas las experiencias anteriores. Los niveles de suciedad eliminada son los más altos y el tiempo de operación es el más bajo (igualado con la experiencia 3). Además al igual que en la Experiencia 3, al sacar las piezas del baño, no es necesario secarlas, que se secan al momento con el consecuente ahorro de tiempo. Por tanto se puede concluir que este método es el más eficaz de todos.

4 RESULTADOS Y VALORACIÓN

4.1 Introducción

Tal y como se ha desarrollado en el apartado anterior, se ha probado con distintas soluciones limpiadoras cuyas características son apropiadas para el tipo de limpieza requerida. Con cada una de ellas era de esperar obtener resultados diferentes en lo relativo a la cantidad de residuos eliminados y al acabado obtenido. Pese a ello el objetivo de todos estos ensayos era no solo el de validar la técnica, sino también el de buscar cual era la solución más adecuada y de comprobar si mejora al método manual.

Los ensayos que se han llevado a la práctica, además de la limpieza manual, se ha realizado las con cuatro disoluciones que se han considerado más oportunas para la limpieza del armamento.

En este apartado se pretende elegir en base a los ensayos cual es la que cuenta con más ventajas y su comparación final con el método manual.

4.2 Aceite VV-L-800-CTDS

La valoración que se puede hacer después de haber utilizado este aceite como solución limpiadora no es muy positiva. Los resultados obtenidos no han sido buenos en comparación con las otras soluciones empleadas y se puede descartar totalmente como opción para la limpieza ultrasónica de armamento.

Las ventajas que esta opción proporciona son las siguientes:

- El aceite empleado es barato. El litro de aceite ronda los 10€
- Ofrece protección contra la corrosión tras la limpieza. El aceite desarrolla una protección contra la corrosión y es resistente al agua. Además este aceite cumple con los requisitos de la OTAN en lo referente a la lubricación y protección de armamento
- Solución reutilizable. El aceite utilizado fue utilizado durante las 3 pruebas sin llegar a saturarse de suciedad

Como se ha mencionado anteriormente, este método no ha reportado grandes resultados. Por tanto, las desventajas que presenta respecto a las otras soluciones son las siguientes:

- Resultados poco eficaces. En comparación con las otras posibilidades, la cantidad de residuos eliminados es menor y los acabados logrados peores
- Se liberan gases nocivos. Al aumentar la temperatura, el aceite libera gases perjudiciales
- Tratamiento posterior a la limpieza. Tras sacar la piezas del baño, están impregnadas de aceite que el usuario debe de limpiar manualmente
- No es adecuado con piezas con una oxidación avanzada
- El realizar la experiencia al “Baño María” reduce la potencia ultrasónica que llega al aceite y el grado de cavitación alcanzado es menor
- Poca capacidad de limpieza al realizarse la experiencia al “Baño María”



Figura 85: Pieza del cierre de un fusil CETME tras ser sacada del baño ultrasónico.

Por tanto se puede concluir que, aunque si se aprecian resultados, se alejan tanto de los esperado que se puede descartar el Aceite VV-L-800-CTDS como solución limpiadora.

4.3 Vinagre y Quitagrasas

Los resultados en este caso han sido negativos para ambos supuestos. Pese a que el ácido acético presente en el vinagre tenga buenas propiedades desincrustantes y que el quitagrasas esté especialmente diseñado para la eliminación de aceites, los efectos alcanzados son escasos en un caso y contraproducentes en el otro. La única ventaja que se podría apreciar es el bajo coste tanto del vinagre, con un precio inferior a 1€/L, como del quitagrasas comercial con un coste de unos 2,5€/L. De cualquier forma, por muy barato que sea producto, si no se alcanzan los resultados esperados, la opción no es válida.

Como se demostró en el apartado anterior, el vinagre no solo no producía efectos limpiadores sobre las piezas sino que generaba más óxido por tanto esta opción queda descartada totalmente



Figura 86: Cierre de fusil Máuser tras su limpieza en la disolución a base de vinagre.

En lo que respecta al quitagrasas comercial, los niveles de limpieza y desengrase alcanzados distan mucho de los esperados y de los alcanzados por otras soluciones estudiadas. Por tanto, esta opción queda igualmente descartada.

4.4 Ultrasonic-07 y Ultrasonic-A al “Baño María”

Como se ha demostrado en el apartado anterior, las experiencias realizadas con la disolución limpiadora hecha a base de los productos Ultrasonic. Dicha mezcla alcanza unos niveles de limpieza comparables a los que se obtienen tras una limpieza manual. Con respecto a las otras soluciones limpiadoras presenta las siguientes ventajas:

- Resultados eficaces. La eliminación de residuos es comparable a la alcanzada por la limpieza manual e incluso llega a superarla en las zonas de más difícil acceso
- Las piezas no necesitan tratamiento posterior. Al sacar las piezas del baño, se secan prácticamente al instante sin necesidad que lo haga el usuario con el consiguiente ahorro de tiempo.
- Reducción de costes con respecto al método de inmersión completa. Al ser a Baño María, se emplean menos recursos que sumergiendo las piezas directamente en la cuba de limpieza.

Sin embargo, a pesar de los buenos resultados alcanzados, se han encontrado algunas desventajas con respecto al resto de opciones:

- Liberación de gases nocivos. La disolución limpiadora libera gases que pueden ser perjudiciales para los usuarios
- Al realizarse la limpieza al “Baño María” se pierde potencia ultrasónica y por tanto se reducen los niveles de cavitación en la disolución.

- No es efectivo en partes con altos niveles de corrosión a pesar de su alta efectividad en piezas con ligeras muestras de óxido.
- El número de piezas a limpiar se ve limitado por el recipiente utilizado para el “Baño María”.
- La solución no es reutilizable

En conclusión, esta posibilidad alcanza buenos resultados de limpieza, aunque en algunas pruebas se alcanzan peores resultados de los esperados posiblemente debido a la reducción de la cavitación. A pesar de ello es una opción a tener en cuenta.

4.5 Ultrasonic-07 y Ultrasonic-A Por inmersión total

Como queda patente en el apartado anterior, este método de limpieza alcanza los mejores resultados. Al igual que en el punto anterior, los resultados son comparables a la limpieza manual. Este método presenta las siguientes ventajas

- Resultados eficientes. Obtiene los mejores resultados en lo que a acabados se refiere
- Potencia ultrasónica adecuada. Al no introducir las piezas en un contenedor, los niveles de cavitación son óptimos.
- Permite limpiar un mayor número de piezas al mismo tiempo.

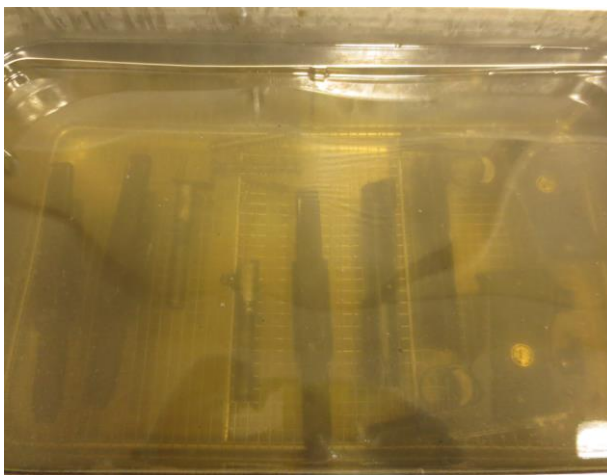


Figura 87: Proceso de limpieza por inmersión total

Sin embargo este método también tiene varias desventajas:

- Produce gases nocivos perjudiciales para el usuario
- La disolución limpiadora no es reutilizable

- El coste por limpieza es el mayor de todas las opciones contempladas.
- No es efectivo para piezas con grandes muestras de corrosión

En resumen, esta técnica es la más eficaz de todas las probadas en este proyecto. Sus buenos acabados hacen de esta opción la más adecuada para su utilización.

4.6 Selección Final

Tras haber analizado las ventajas y desventajas que ofrecía cada una de las posibles soluciones, se elige como óptima la disolución de Ultrasonic-7 y Ultrasonic-A por inmersión total. Para ayudar a comprender mejor esta elección se muestra el siguiente cuadro comparativo donde se resumen los puntos débiles y fuertes de cada opción

Tabla 4: Tabla de valoración de las disoluciones empleadas

	Experiencia 2	Experiencia 3	Experiencia 4	Experiencia 5
Costes				
Resultado Final				
Eliminación de residuos				
Tratamiento posterior				



Resultado adecuado



Resultado poco adecuado



Resultado negativo

4.7 Comparativa Final

En este apartado se compara entre la limpieza manual y limpieza ultrasónica con el fin de decidir si la limpieza ultrasónica es realmente una opción realmente llevable a la práctica

Los resultados alcanzados en la prueba realizada han sido muy buenos. Se ha comprobado que mediante este tipo de limpieza es posible eliminar de manera muy efectiva los óxidos recientes como los que se encontraban en el cuerpo de la pistola o sobre la corredera. Sin embargo, no es capaz de eliminar restos de corrosión acumulada durante un periodo de tiempo largo, que se encuentren fuertemente arraigados a la superficie del arma. Se puede afirmar que esto mismo ocurría con los

restos de pólvora presentes en las armas. Los restos más recientes y menos incrustados eran eliminados sin mucha dificultad, en cambio los restos más adheridos a la superficie eran eliminados en menor medida.

En la limpieza manual, los restos de óxido y suciedad más incrustados en el arma acaban siendo eliminados por el usuario tras invertir en la limpieza una gran cantidad de tiempo. Sin embargo, ambas limpiezas se realizan justo después de ser utilizadas, tal como indica el reglamento, la diferencia de tiempos de limpieza no es tan remarcable. Además hay que tener en cuenta que las armas tienen mantenimientos periódicos por parte del usuario con el fin de evitar la corrosión y la suciedad en las armas

Otro punto a tener en cuenta es el tiempo de limpieza. La limpieza ultrasónica es un método mucho más rápido y sencillo que el método manual. El ahorro del tiempo puede llegar a superar el 50% empleado para una limpieza manual. Si una unidad operativa tipo Compañía invierte aproximadamente una hora a la semana en la limpieza y mantenimiento del armamento, hablamos que con la limpieza ultrasónica, la limpieza podría tardar no más de 30 minutos. Además al ser un método automatizado y que permite la limpieza de varias piezas de manera simultánea, no sería necesario que la unidad al completo estuviese limpiado el armamento, sería suficiente con que una serie de encargados se hiciesen cargo de ella, lo que permitiría a la gran mayoría de la unidad reducir el tiempo de limpieza a 0 para invertirlo en otro tipo de adiestramiento

Sin embargo, esta práctica haría que el usuario perdiese la práctica en la limpieza manual, lo que desembocaría en un empeoramiento de los resultados y un mayor tiempo requerido para realizar una limpieza manual en caso de ser necesaria. Hay que añadir que la limpieza manual periódica fomenta en el usuario los hábitos de mantenimiento, búsqueda de la perfección constante y de autodisciplina.

Esto último no supondría ningún problema si el baño ultrasónico estuviese siempre disponible para los usuarios. Debido al carácter expedicionario de las unidades de combate, éstas son desplegadas en lugares muy diversos donde los trenes logísticos solo permiten tener el material indispensable para el cumplimiento de la misión. Por ello y debido a que el baño ultrasónico requiere las disoluciones y corriente eléctrica, bien escaso y muy preciado en muchas zonas de operaciones, el que el usuario este adiestrado en la limpieza manual de su armamento individual cobra aún más sentido. Además, su uso debe ser restringido a personal con experiencia y que conozca el funcionamiento del equipo. Por último, en caso de avería en zona de operaciones, los repuestos tardarían en llegar y supondría un elevado sobre coste. Por todo esto, su uso quedaría limitado a los cuarteles, buques y despliegues de gran entidad con carácter permanente o semi-permanente.

El último punto a comparar es el coste. En este aspecto el método manual es mucho más económico. El gasto se limita al coste de reponer los paños de los kits de limpieza y el aceite utilizado. Este coste ronda los 100€ mensuales. Como hemos dicho anteriormente una unidad dedica aproximadamente 1 hora a la semana a la limpieza del armamento. Por tanto en un mes, la unidad de entidad Compañía (120 hombres) dedica un total de 4 horas mensuales. Bajo este supuesto, el coste de la mano de obra (suponiendo un sueldo de 14.531,74€/año) tiene un valor de 1,68€/hora. Por tanto el coste mensual para una unidad de entidad compañía sería de 806€/mes.

En el caso de la limpieza ultrasónica hay que realizar una inversión inicial de 2886€ para la adquisición del equipo, suponiendo que se adquiriera el mismo utilizado durante el presente proyecto. El equipo utilizado en este proyecto no es recomendable ya que su tamaño limita mucho el tipo de piezas que pueden ser limpiadas.

En cada limpieza podrían limpiarse un máximo de 15 conjuntos de mecanismos de fusiles simultáneamente. Teniendo esto en consideración, serían necesarias 8 limpiezas para completar los 120 fusiles de la Unidad. Si se realizan 4 limpiezas mensuales, hablamos de que tendríamos que realizar 32 limpiezas ultrasónicas al mes.

El coste de cada limpieza ascendería a la suma del coste de la electricidad empleada, el coste de las soluciones limpiadoras:

El precio de la electricidad asciende a 0,14€ kWh. El consumo nominal del equipo es de 1500 Wh. Cada limpieza necesita 0,33 horas, lo que hace un total de 11 horas. Es decir, se han consumido 16500Wh. Lo que hace un consumo total de 2,31€.

En cada limpieza por inmersión total se usa un total de 540g de Ultrasonics-7 y 90g de Ultrasonics-A. Si el coste de cada kilogramo de solución es de 22,40€ y 24,5€, el coste de por cada es de 12,44€ y de 2,02€, respectivamente. Al tener que realizar un total de 32 limpiezas, el coste total asciende hasta los 462€ mensuales.

El coste de la mano de obra para este método es menor que para la limpieza manual. Para operar el equipo sólo serían necesarios dos operarios para limpiar todas las armas de la unidad. Bajo las mismas condiciones que la limpieza manual, el coste para las 11 horas sería de 36,96€/mes.

Por tanto, el coste mensual de la limpieza ultrasónica sería de 501,27€ al mes a lo que hay que sumar la inversión mensual.

En resumen, por todo lo analizado en este apartado, se considera que, aunque la limpieza ultrasónica es eficaz en el laboratorio, en la realidad, el método manual sigue siendo más beneficioso y económico para Las Fuerzas Armadas.

Tabla 5: Tabla resumen de costes de limpieza

	Limpieza manual	Limpieza ultrasónica
Coste Electricidad	-	2,31€/mes
Coste Agente Limpiador	100€/mes	462€/mes
Mano de Obra	806€/mes	36,96€/mes
Coste equipo	-	2886€
Total	906€/mes	2886€+501,27/mes

5 CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Visto todo lo anterior y partiendo de los objetivos marcados al principio de este proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

El método de limpieza de armamento mediante la técnica de baño ultrasónico queda validada tal y como se demuestra en las experiencias. Se logra que los resultados sean similares a los alcanzados en el método manual. En cuanto al ahorro de recursos, el único ahorro se produce en el componente humano ya que como se ha mostrado con anterioridad, la técnica ultrasónica tiene mayores costes.

En cuanto a las disoluciones, de todas las empleadas, se logra seleccionar una cuyas propiedades son las que más benefician a nuestros propósitos, ya que ésta consigue eliminar los residuos presentes en el arma, no deja restos tras la limpieza y evita futuras corrosiones.

En cuanto al tiempo de trabajo, si se consigue verificar que una limpieza por baño de ultrasonidos es mucho más breve que una realizada manualmente. Aunque, debido al tamaño limitado del equipo, para limpiar un gran número de armas, el tiempo acumulado de limpieza si sería mayor que el de cada usuario limpiando su arma.

Por último y a modo de conclusión final, se puede afirmar que si es posible limpiar armamento por la técnica de baño por ultrasonidos pero no resulta rentable hoy en día en comparación con el método de limpieza manual.

5.2 Líneas futuras

Como se mencionó al comienzo, este proyecto tiene intención de servir como base a próximas investigaciones similares. Por tanto, para finalizar el presente proyecto, se proponen unas posibles líneas de investigación futuras relacionadas con el campo de investigación, que pueda ayudar a desbancar al método de limpieza manual:

- Búsqueda de una disolución más económica
- Limpieza ultrasónica como método desoxidante
- Limpieza ultrasónica de armas de gran calibre
- Optimización del tiempo de limpieza ultrasónica

- Optimización de la temperatura de limpieza ultrasónica
- Limpieza ultrasónica de partes de motores, rodamientos y elementos engrasados
- Tratamiento de superficies posterior a su limpieza
- Limpieza de armamento por técnicas de limpieza laser
- Limpieza de armamento por técnica criogénica
- Diseño de un equipo de limpieza por ultrasonidos portátil y desplegable
- Diseño de un equipo de limpieza por ultrasonidos de gran volumen de carga

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. d. Reglas, Reglamento de infantería de marina 04-280, San Fernando , 2000.
- [2] M. Vega. [En línea]. Available: http://www.tanis.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/historia_ultrasonidos.htm.
- [3] K. F. H. o. U. Graff. [En línea]. Available: http://www.ob-ultrasound.net/ultrasonics_history.html.
- [4] Emersonindustrial. [En línea]. Available: <http://www.emersonindustrial.com/en-US/branson/about-us/history/Pages/aboutus.aspx>.
- [5] A. Cochran. [En línea]. Available: <http://www.cmdn.dundee.ac.uk/main-news/adventures-ultrasound>.
- [6] J. G. Diaz, «Aplicaciones de ultrasonidos en el tratamiento de alimentos,» San Andrés, 2009.
- [7] K. G. Labrada, «Empleo de ultrasonidos para la purificación de agua,» La Habana, 2010.
- [8] «Electricidad17055,» [En línea]. Available: http://electricidad17055.wikispaces.com/file/view/C%C3%93MO_FUNCIONA_EL_SONAR.png/202576290/498x498/C%C3%93MO_FUNCIONA_EL_SONAR.png.
- [9] R. Barra, «Lavado de material de uso médico,» Concepción, 2011.

- [10] O. V. N. FABIÁN, «Diseño y construcción de un sistema semiautomático de limpieza por ultrasonido para muestras metalográficas y fractográficas con aplicación a un banco de pruebas y limpieza de inyectores a gasolina para el laboratorio de metalurgia de la espe,» Sangolquí, 2006.
- [11] M. Á. B. RADO, «Los ultrasonidos. Riesgos y normas de prevención,» Palma de Mallorca , 2003.
- [12] M. Seguros. [En línea]. Available: http://www.mapfre.com/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1024048.
- [13] C. a. J. K. W. WIERNICKI, Ultrasound: Biological effects and Industrial Hygiene Concerns, American Industrial Hygiene Association, 1985.
- [14] I. N. d. S. e. H. e. e. Trabajo, «Norma técnica de Prevención, núm. 205,».
- [15] V. G. MEDINA, ULTRASONIDOS. Técnica no destructiva para el análisis de monumentos, Sevilla , 2013.
- [16] S. d. l. Torre. [En línea]. Available: <https://delatorresteffani.wordpress.com/tareas/ondas-mecanicas/>.
- [17] D. P. Gerónimo, Manual de introducción al ultrasonido industria, Empresa de servicios marinos y terrestres, 2010.
- [18] «El rincón de la ciencia,» [En línea]. Available: <http://elrincondelacienciadelourdes.blogspot.com.es/>.
- [19] «C-lasondas,» [En línea]. Available: <http://c-lasondas.blogspot.com.es/2011/05/diferencia-entre-una-onda-longitudinal.html>.
- [20] «Wikipedia,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Onda_s%C3%ADmica.
- [21] R. V. Sánchez., Curso ultrasonido Básico”, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de, 2008.

- [22] «Majoncoso.com,» [En línea]. Available: <https://majocosno.wordpress.com/movimiento-ondulatorio/sonido-de-la-naturaleza/cualidades/>.

- [23] [En línea]. Available: http://www.iesbajoaragon.com/~fisica/fisica2/Ondas/septiembre_9900a.htm.

- [24] «Wikipedia,» [En línea]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad_de_sonido.

- [25] S. Almenares, «El campo sonico,» 2009.

- [26] F. Melero, «Principio de la piezoelectricidad,» Jaen, 2010.

- [27] M. Alonso, «El enigma del magnetismo,» Departamento de Fisica y Quimica IES Leoanrdo Da Vinci , Alicante .

- [28] T. M. Elektronik, «TME,» [En línea]. Available: http://www.tme.eu/html/ES/transductores-piezoelectricos-en-carcasa-con-conductos/ramka_1062_ES_pelny.html.

- [29] C. d. E. goya, «Germanaine de Capuccini,» [En línea]. Available: <http://germainegoyamadrid.com/cavitacion-maquinas-aparatos/>.

- [30] F. JP, «La cavitación. Mecanismos físicos y aspectos industriales,» Grenoble, 1995.

- [31] F. Naypers, Submarine Sonar Operator´s Manual, 1945.

- [32] C. d. p. p. ultrasonidos, «Tierratech,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.tierratech.com/ES/cc23/Maquinas-industriales-de-limpieza-por-ultrasonidos/3>.

- [33] «Soltec,» [En línea]. Available: <http://www.soltec.it/d1/es/lavadoras-limpieza-ultrasonidos>.

- [34] S. T. E. S, «Elma-Ultrasonic,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.elma-ultrasonic.com/es/productos/equipos-de-ultrasonidos/elmasonic-s/#tabs|p55:features>.

- [35] M. d. D. d. E. d. Tierra, Fúsil Cetme L 5,56, Mando de Doctrina , 1995.

- [36] M. d. D. d. E. d. Tierra, Pistola Star Súper B, Mando de Doctrina , 1987.
- [37] «www.Armas.es,» [En línea]. Available: <http://www.arms.es/foros/municion-y-recarga/composicion-liquido-limpieza-ultrasonidos-919925>.