DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE LIMPIEZA PARA TUBERIA CONDUIT POR MEDIO DE LA TECNOLOGIA LASER

FABIO ALEJANDRO GUTIERREZ ARAGÓN

INGENIERO MECÁNICO

MONOGRAFÍA PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN

INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

DIRECTOR:

PH.D ING.

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

BOGOTÁ. D. C.

2025

Tabla de contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 11
1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 12
2. JUSTIFICACIÓN 13
3. OBJETIVOS 14
3.1 Objetivo General 14
3.2 Objetivos Específicos 14
4. MARCO TEORICO 15
4.1 Corrosión. 15
4.1.1 Mecanismo de acción de la corrosión. 15
4.1.2 Reacción reducción-oxidación 15
4.2 Tipos de Corrosión 16
4.2.1 Corrosión uniforme 17
4.2.2 Corrosión galvánica 17
4.2.3 Corrosión por picadura 17
4.2.4. Corrosión por grietas 18
4.2.5 Corrosión por cavitación 18
4.2.6 Corrosión por Exfoliación 19
4.2.7 Corrosión por desaleación 20
4.3 Métodos de control de corrosión. 20
4.3.1 Selección de materiales 20
4.3.2 Recubrimientos 20
4.3.3 Inhibidores 21
4.3.4 Protección Catódica 21
4.4 Corrosión atmosférica 22
4.5 Tecnologías de limpieza industrial en Metales. 22
4.5.1 Limpieza química. 22
4.5.2 Limpieza por disolución 23
4.5.3 Limpieza por medios mecánicos y abrasivos 24
4.5.3.1 Limpieza por sandblasting 24
4.5.3.2 Limpieza por granallado 24

4.5.3.3 Limpieza abrasiva 25
4.6 Tecnología láser aplicada a la limpieza 26
4.7 Principios físicos de la limpieza laser (absorción, ablación, fototérmico) 27
4.7.1 Funcionamiento básico del laser 27
4.8 Interacción del láser de limpieza sobre las superficies 29
4.8.1 Ablación láser 29
4.9 Parámetros operativos relevantes: Potencia, Frecuencia y velocidad. 30
4.10 Ventajas sobre métodos químicos, mecánicos y abrasivos 31
4.11 Automatización industrial 31
4.11.1 Elementos de control 32
4.11.1.1 PLC (Controlador lógico programable) 32
4.11.1.2 Sensores de proximidad 32
4.11.2 Sensores de corrosión 33
4.11.2.1 Sensores de resistencia eléctrica 33
4.11.2.2 Sensores de ultrasonido 33
4.11.2.3 Sensores electroquímicos 34
4.11.3 Sensores de Imagen 34
4.11.4 Sensores encoder 34
4.11.4.1 Encoder rotativo 34
4.11.4.2 Encoder lineal. 35
4.11.4.3 Encoder incremental. 35
4.11.4.4 Encoder absoluto. 35
4.11.4.5 Encoder óptico. 35
4.11.4.6 Encoder magnético. 35
4.12 Pantallas HMI (Interfaz Hombre–Máquina) 36
4.13 Actuadores y ejes motorizados. 36
4.13.1 Sistema de rodillos motorizados. 36
4.13.2 Servomotores. 37
4.13.3 Reductores. 37
4.14 Sistema de mandril neumático 37
4.14.1 Mandril neumático y plato autocentrantes 38

4.15 Sistema de enfoque 38
4.16 Sistema de autolimpieza 38
4.16.1 Electroválvulas de vacío 39
4.17 Seguridad industrial en sistema de limpieza 39
4.17.1 Sistema de parada de emergencia 39
4.17.2 Sistema de control de movimiento 40
5. ESTADO DEL ARTE 41
5.1 A review of thermal effects and substrate damage control in laser cleaning[44] 41
5.2 Laser cleaning of metal surfaces: Physical processes and applications 42
5.3 The quality improvement of laser rubber removal for laminated metal valves[42] 43
5.4 Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[44] 44
5.5 Estudio de parámetros físicos importantes en los procesos de objetos de vidrios con láser con aplicación a objetos patrimoniales[45] 46
6. METODOLOGÍA 47
6.1 Analizar los procesos actuales de limpieza química de tuberías conduit, identificando sus limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad laboral. 47
6.2 Investigar los principios físicos y parámetros técnicos de la limpieza láser aplicables a superficies metálicas, con el fin de determinar su viabilidad en la remoción de óxidos y contaminantes sin afectar el material base. 47
6.3 Diseñar un sistema automatizado que integre tecnología láser y componentes de control para la limpieza de tuberías conduit, considerando criterios de eficiencia energética y precisión operativa. 47
6.4 Evaluar los beneficios operativos del sistema propuesto en comparación con el método químico tradicional, mediante pruebas simuladas en entornos controlados. 47
6.5 Realizar la documentación y socialización del proyecto. 48
7. CRONOGRAMA 49
8. ALCANCE Y LIMITACIONES 50
8.1 Alcance 50
8.2 Limitaciones 50

9. DESARROLLO DEL PROYECTO 51
9.1 Analizar los procesos actuales de limpieza química de tuberías conduit, identificando sus limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad laboral. 51
9.1.1 Recolectar información sobre el proceso de limpieza química utilizado en la industria 51
9.1.1.1 Decapado (Steel pickling) 51
9.1.1.2 Uso de ácidos en el decapado 53
9.1.1.3 Ácido sulfúrico 53
9.1.1.4 Ácido clorhídrico 54
9.1.1.5 Proceso de decapado de los aceros (Baño acido) 54
9.1.2 Identificar limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad del método actual 56
9.1.2.1 Limitaciones técnicas. 56
9.1.2.2 Control químico. 56
9.1.2.3 Control de infraestructura. 56
9.1.2.4 Limitaciones ambientales. 57
9.1.2.5 Limitaciones de seguridad. 58
9.2 Investigar los principios físicos y parámetros técnicos de la limpieza láser aplicables a superficies metálicas, con el fin de determinar su viabilidad en la remoción de óxidos y contaminantes sin afectar el material base. 59
9.2.1 Recolectar información bibliográfica y análisis técnico sobre tecnologías de limpieza láser aplicables a superficies metálicas. 59
9.2.1.1 Principio físico 59
9.2.1.2 Mecanismo de ablación laser 60
9.2.1.3 Mecanismo de Estrés Térmico por Láser 61
9.2.1.4 Mecanismo de Estrés Térmico por Láser 61
9.2.2 Seleccionar el tipo de láser, criterios y parámetros operativos adecuados para la limpieza laser 62
9.2.2.1 Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz Reci 62
9.2.2.2 Componentes de la máquina laser 62
9.2.2.3 Parámetros de control esenciales para el manejo del proceso de limpieza laser. 65

9.3 Diseño de un Sistema Automatizado que Integre Tecnología Láser y Componentes de Control para la Limpieza de Tuberías Conduit: Considerando Criterios de Eficiencia Energética y Precisión Operativa 66
9.3.1 Diseñar la estrategia de control adecuada para el sistema (Selección de Hardware. arquitectura del sistema y flujo de procesos). 66
9.3.1.1 Método de solución propuesto para el sistema de automatización. 66
9.3.1.2 Selección de componentes: 66
9.3.1.3 Selección de máquina laser. 67
9.3.1.4 Selección de sistema de visión. 68
9.3.1.5 Selección PLC 69
9.3.1.6 Actuadores mecánicos 71
9.3.1.7 Arquitectura del sistema – Diagrama de bloques 72
9.3.2 Diseño de la lógica de control (Elaboración de la secuencia de control, diagramas eléctricos y de instrumentación) 73
9.3.2.1 Secuencia de control. 73
9.3.2.3 Diagrama P&ID 75
9.3.2.4 Diagrama eléctrico del sistema. 76
9.3.3 Programación del controlador/es e integración de comunicación entre el láser y el sistema de control. 77
9.3.3.1 Programación PLC Mp2600iec 77
9.3.3.2 Programación Raspberry 3B 1.2´ 78
9.3.3.3 Integración del sistema 81
9.4 Evaluar los beneficios operativos del sistema propuesto en comparación con el método químico tradicional, mediante pruebas simuladas en entornos controlados. 81
9.4.1 Realizar simulaciones y/o pruebas experimentales controladas para comparar el desempeño del sistema. 82
9.4.2 Evaluar la eficiencia de remoción, tiempo de operación, consumo energético, impacto ambiental, nivel de riesgo para el operario. 83
9.4.3 Validación técnica del sistema propuesto como alternativa viable. 84
10. CONCLUSIONES 85
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 87

Índice de figuras

Figura 1. Ciclo de corrosión del acero.[5] 15
Figura 2. Clasificación de las formas de corrosión según localización[5] 16
Figura 3. Tipos de corrosión más comunes.[5] 17
Figura 4. Ejemplo de corrosión galvánica[6] 17
Figura 5. Ejemplo de corrosión por picadura[5] 18
Figura 6. Corrosión por grietas[7] 18
Figura 7. Corrosión por cavitación desgaste en turbinas de bombas[8] 19
Figura 8.Corrosión por erosión en tubería [9] 19
Figura 9. Corrosión por exfoliación[9] 19
Figura 10. corrosión por desaleación en Zinc 20
Figura 11. Aplicación de inhibidor de corrosión a lamina metálica[10] 21
Figura 12. Esquema básico de protección catódica [12] 21
Figura 13. Corrosión atmosférica presente en tubería [11] 22
Figura 14.Proceso de limpieza química de ácidos. Elaboración propia 23
Figura 15. Proceso de granallado de una superficie[15] 25
Figura 16. Ejemplo discos abrasivos flap para retiro de oxido.[18] 26
Figura 17. Aplicación de tecnología láser[18] 26
Figura 18. Fuente convencional de soldadura laser[19] 27
Figura 19. Esquema básico de un láser [19] 27
Figura 20. Reacción estimulada de los átomos.[19] 28
Figura 21. Fuente de estado sólido Innova[20] 28
Figura 22. Proceso de ablasión laser[21] 29
Figura 23. Comportamiento de ablación laser según el tiempo [19] 30
Figura 24. PLC siemens s7-1200.[23] 32
Figura 25. Sensor de proximidad capacitivo[25] 33
Figura 26. Sensor de corrosión de resistencia eléctrica.[27] 33
Figura 27. Sensor ultrasónico instalado en tubería [26] 34
Figura 28. Sensor Encoder incremental[28] 34
Figura 29. Sensor Encoder lineal kd 100 [29] 35
Figura 30. Encoder magnético 20 CPR [31] 36
Figura 31, Pantalla HMI Siemens.[33] 36
Figura 32. Servomotor GDM[35] 37
Figura 33.Sistema autocentrante de tubería [38] 38
Figura 34. Electroválvula para vacío YCSM41[38] 39
Figura 35. Sistema de parada de emergencia[39] 39
Figura 36. Sistema de barrera de luz Omron[40] 40
Figura 37. Esquema de limpieza por método laser, sobre pintura [42] 42
Figura 38. Efecto de incidencia de ángulo de aplicación del láser [41] 43
Figura 39. Probetas de caucho Buna-N [40] 44

Figura 40. Sección transversal de aluminio sometido a laser vs con oxido [45].... 45
Figura 41. Cronograma del proyecto - Elaboración propia. 49
Figura 42.Proceso de limpieza química de ácidos. Elaboración propia 55
Figura 43. Corrosión en tuberías presente en infraestructura[51] 57
Figura 44. Esquema del mecanismo de ablación térmica por láser [53] 60
Figura 45. Probeta de ensayo - proceso de ablación térmica. [53] 61
Figura 46.Esquema del mecanismo de estrés térmico por láser. [53] 61
Figura 47.Esquema del mecanismo de onda de choque. [53] 62
Figura 48. Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz[54] 62
Figura 49. Componentes esenciales de equipo laser - Elaboración propia..... 63
Figura 50. Cabezal de limpieza convencional sup23t [55] 63
Figura 51. Panel de control equipo de limpieza laser [55] 64
Figura 52. Fuente laser Reci-2000W [55]..... 64
Figura 53. Sistema de enfriamiento para sistemas laser [55]..... 65
Figura 54. Método de selección mediante rechazo - Elaboración propia. 67
Figura 55. Raspberry 3 modelo B 1.2 [56]..... 69
Figura 56. PLC Yaskawa Mp2600iec..... 70
Figura 57. Actuador lineal de tornillo[57] 71
Figura 58. Rotador de tubos de banco 71
Figura 59. Soporte adaptable antorcha laser[59] 71
Figura 60. Diagrama de bloques de sistema de limpieza – Elaboración propia 72
Figura 61. Diagrama de flujo proceso de limpieza. 74
Figura 62. Diagrama P&ID sistema automático de limpieza -Elaboración propia.. 75
Figura 63. Diagrama eléctrico de control- Elaboración propia..... 76
Figura 64. Interfaz MotionWorks IEC 2 Pro 2.2.0.18 77
Figura 65. Diagrama ladder para el sistema de limpieza automatizado- Elaboración propia 77
Figura 66. Código en Python de programación y detección de oxido - Elaboración Propia. 79
Figura 67. Ejecución código Python modbus4.py – Elaboración propia..... 79
Figura 68. Prueba detección de oxido 0% y 5.1%, parámetros y mascara – Elaboración propia 80
Figura 69. Prueba detección voltaje gpio17 – Elaboración propia..... 80
Figura 70. Montaje mecánico sistema de limpieza laser 82
Figura 71. Parámetros de trabajo prueba laser. 83

Índice de tablas

Tabla 1 . Factores de Corrosión[5] 16
Tabla 2. Parámetros de ajuste en máquinas laser - elaboración propia 30
Tabla 3. Parámetros sugeridos para limpieza de oxido y pintura [42] 42
Tabla 4. Parámetros para limpieza de óxido de aluminio [45] 45
Tabla 5. Etapas generales de la fabricación del acero. [48] 52
Tabla 6. Limitaciones ambientales. Elaboración propia. 57
Tabla 7. Limitaciones de seguridad en limpieza con ácido - Elaboración propia. .. 58
Tabla 8. Parámetros técnicos de limpieza laser [14] 65
Tabla 9. Matriz decisión equipo laser - Elaboración propia. 68
Tabla 10. Matriz decisión sistema de visión - Elaboración propia. 69
Tabla 11. Matriz decisión PLC- Elaboración propia. 70
Tabla 12. Lista de tags para el diagrama P&ID 76
Tabla 13. Comparación parámetros método laser vs químico. 83

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. reacción del Óxido de hierro y Ácido Clorhídrico[3] 11
Ecuación 2. Reacción del Carbonato de calcio con y ácido Clorhídrico 11
Ecuación 3. Ecuación óxido de hierro y ácido sulfúrico 24
Ecuación 4. Reacción hierro y ácido sulfúrico 24
Ecuación 5. Ecuación de Bohr 27
Ecuación 6. Ecuación de relajación térmica del material. [17] 30
Ecuación 7. Reacción hierro y ácido sulfúrico 53
Ecuación 8. Reacción óxido de hierro III y ácido clorhídrico 54
Ecuación 9. Reacción óxido de hierro I y ácido clorhídrico 54
Ecuación 10.Reacción hierro y cloruro de hierro, formación de sales. 54
Ecuación 11. Tasa de absorción térmica.[53] 60

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa Consorcio Metalúrgico Nacional SAS “Colmena”, es una compañía colombiana con operación desde 1957, se encarga de la fabricación y comercialización de productos de acero y se especializa en ofrecer soluciones integrales para el sector de metalmecánico y de construcción. Entre sus productos de fabricación se encuentran tuberías conduit, perfiles estructurales, cubiertas, fachadas y entrepisos.[1]

Los materiales metálicos como lo son aceros, fundiciones o hierros sufren el fenómeno de corrosión y los productos fabricados por Colmena no son la excepción. Ya que al estar expuestos al aíre son susceptibles a sufrir una reacción electroquímica que produce un envejecimiento superficial, aunque esta corrosión no es perceptible en algunos casos, es necesario realizar un proceso de limpieza químico el cual permita que el material este en óptimas condiciones para ser metalizado.

La limpieza química de esta tubería es realizada por inmersión en la cual la tubería que esta con aparente corrosión es sumergida en una solución de 5-10% de HCl “ácido clorhídrico”[2]; en contenedores, generando un efecto de decapado de esta manera obtenemos:

$$Fe_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2FeCl_3 + 3H_2O$$

Ecuación 1. reacción del Óxido de hierro y Ácido Clorhídrico[3]

El óxido de hierro Fe2O3, reacciona con el HCl, generando cloruros y agua que permiten separarse de la tubería expuesta al acido, adicional si es más severa la corrosión, es posible que se puedan encontrar depósitos calcáreos los cuales reaccionan así:

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + CO_2 \uparrow + H_2O$$

Ecuación 2. Reacción del Carbonato de calcio con y ácido Clorhídrico

El carbonato de calcio reacciona con el ácido clorhídrico, desprendiéndolo del material y adicional generando Co2 y agua, este proceso se lleva a cabo en intervalos de 15 minutos en la cual la reacción no ocasiona ataques sobre el material base, es necesario realizar el enjuague del material con agua abundante. Este proceso genera grandes cantidades de desperdicios y consumos excesivos de agua, que no son tratadas adecuadamente.

El uso desproporcionado de las soluciones de HCl, provoca la contaminación de fuentes hídricas, el suelo y de la atmosfera, ocasionando vertimientos no deseados, y a su vez exponiendo a peligros químicos a los trabajadores[2]. Para lo cual se buscan alternativas diferentes al uso de químicos que permitan la limpieza de esta tubería garantizando la buena apariencia y adherencia mecánica para postprocesos.

1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Es posible diseñar un sistema automatizado para la limpieza de tubería conduit por medio de la tecnología láser actual?

2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación busca encontrar una alternativa eficiente, segura y sostenible al proceso de limpieza química de tuberías conduit mediante químicos. Este trabajo propone explorar el uso de tecnología láser como método de limpieza superficial además de establecer los parámetros técnicos óptimos que garanticen la eliminación de óxidos y contaminantes sin comprometer la integridad del material base, aportando conocimiento nuevo y útil tanto a nivel industrial como académico.

Este trabajo de grado representa una oportunidad para aplicar conocimientos de ingeniería mecánica, automatización, materiales y tecnologías emergentes. El diseño de un sistema automatizado con tecnología láser permite integrar y documentar un caso real de innovación aplicada en la industria nacional, convirtiéndose en un material de referencia para futuras investigaciones o desarrollos similares.

La implementación de este sistema tiene un impacto social significativo al reducir la exposición de los operarios a sustancias químicas peligrosas como el ácido clorhídrico, mejorando la salud ocupacional y se reduciendo los riesgos de accidentes laborales, generando un ambiente de trabajo más seguro.

Uno de los principales motivos de esta investigación es el alto impacto ambiental del método actual de limpieza química. El uso de soluciones de HCl conlleva la generación de residuos peligrosos, el consumo excesivo de agua y el riesgo de contaminación de fuentes hídricas y suelos. La tecnología láser, en cambio, permite una limpieza en seco, sin generación de efluentes ni residuos tóxicos, lo cual representa una solución ambientalmente responsable.

Se realizará la valoración de la inversión económica de la implementación de este sistema y si el sistema automatizado de limpieza láser puede significar una reducción significativa en los costos asociados a la compra, manejo y disposición de productos químicos, así como al consumo de agua y los tratamientos posteriores de residuos. Por lo tanto, se analizará económicamente si esta solución puede mejorar la rentabilidad operativa de la empresa y aumentar su competitividad en el mercado.

Este trabajo de grado representa un reto personal ya que es una tecnología emergente de la cual no hay conocimiento ni fuentes previas, sin embargo, la oportunidad de integrar un sistema automatizado de limpieza por medio de la tecnología láser me emociona al creer en que se pueden desarrollar aplicaciones no convencionales a los procesos desarrollados en la industria.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Proponer el diseño un sistema automatizado de limpieza para tuberías conduit utilizando tecnología láser, que permita mejorar la eficiencia operativa, reducir el impacto ambiental y garantizar la seguridad de los trabajadores en la empresa Consorcio Metalúrgico Nacional SAS “Colmena”.

3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar los procesos actuales de limpieza química de tuberías conduit, identificando sus limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad laboral.
2. Investigar los principios físicos y parámetros técnicos de la limpieza láser aplicables a superficies metálicas, con el fin de determinar su viabilidad en la remoción de óxidos y contaminantes sin afectar el material base.
3. Diseñar un sistema automatizado que integre tecnología láser y componentes de control para la limpieza de tuberías conduit, considerando criterios de eficiencia energética y precisión operativa.
4. Evaluar los beneficios operativos del sistema propuesto en comparación con el método químico tradicional, mediante pruebas simuladas en entornos controlados.

4. MARCO TEORICO

El desarrollo de este proyecto de diseño comprende contextualizar el entorno industrial y tecnológico en el que se basa el proyecto y su idea es identificar conceptos claves como la corrosión, sus tipos y causas, también se hablara de limpieza industrial, el láser como herramienta de tratamiento de superficies y la propuesta a usar para la automatización de este diseño.

4.1 Corrosión.

La corrosión es un fenómeno natural que se caracteriza por el deterioro de los materiales metálicos y afines, los cuales mediante reacciones químicas y electroquímicas reaccionan a su entorno y buscan alcanzar su estado natural, buscando llegar a un estado energético de menor potencial.[4]

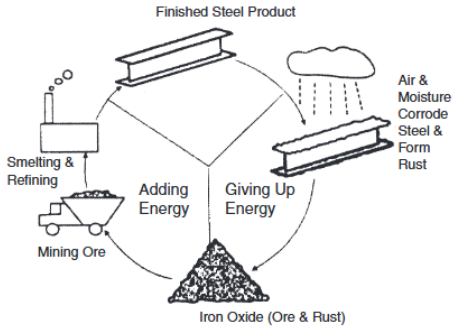


Figura 1. Ciclo de corrosión del acero.[5]

4.1.1 Mecanismo de acción de la corrosión.

Todos los materiales metálicos en general poseen un gradiente de potencial electroquímico el cual es la capacidad de resistir a ser corroídos, en donde las condiciones ambientales, de carga o de temperatura y la presencia de electrolitos se comportan como agentes libres y permiten la interacción con el material base buscando llegar a un estado energético de menor potencial.

4.1.2 Reacción reducción-oxidación

La reacción más común que se genera en corrosión es la de oxidación en la cual se necesitan 3 elementos importantes como lo son los electrodos (Ánodo y Cátodo), los electrolitos (generalmente es el ambiente) y una diferencia de potencial, la cual, aunque no se induce una corriente eléctrica los materiales presentes en esta reacción ya llevan una carga eléctrica, que en reacción con el medio comienzan a producir el fenómeno de corrosión

Un ejemplo común, donde ocurre este bajón energético es el hierro y el acero (Electrodos) que una vez que se combinan comúnmente con partículas de oxígeno (electrolito) y agua que hacen parte de su entorno, forman óxidos de hierro (oxido),

cuyo material resultante es similar a la composición del hierro mineral, produciendo un deterioro en el material y sus propiedades.[5]

Es necesario mencionar que además del entorno, también hay una serie de variables que influyen en la corrosión de los materiales metálicos, como lo son; el estado físico, composiciones químicas (componentes y concentraciones), temperatura, velocidades relativas de solución y las cargas mecánicas que pueden influir sobre el material.[5]

4.2 Tipos de Corrosión

La corrosión puede presentarse en diversas formas, pero, en general se puede clasificar basado en 3 tipos de factores:

Tabla 1 . Factores de Corrosión[5]

Factores	Descripción
Naturaleza del corrosivo	El corrosivo puede ser húmedo o seco
Mecanismo de corrosión	Implica las reacciones químicas o electroquímicas en el proceso
Morfología del metal corroído	Se basa en la identificación de la forma de corrosión según inspección visual

Entre las formas de corrosión más comunes podemos evidenciar entre ellas; que, dependiendo el ataque corrosivo, lo podemos clasificar en uniforme o localizado, y si esta corrosión es localizada podemos clasificarla entre ataque macroscópico y microscópico. Ver figura 2.

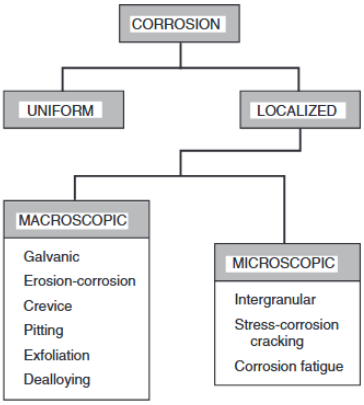


Figura 2. Clasificación de las formas de corrosión según localización[5]

A su vez podemos clasificarlas en corrosión de acuerdo con el mecanismo; (galvánico, erosión-corrosión, grietas, cavitación, exfoliación, ver figura 3.

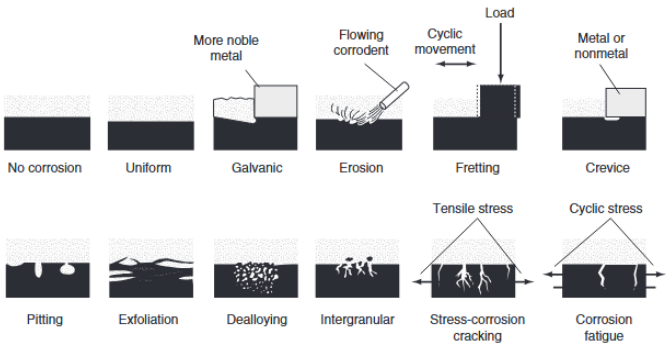


Figura 3. Tipos de corrosión más comunes.[5]

También es necesario mencionar, que, dependiendo el ataque corrosivo, lo podemos clasificar en uniforme o localizado, y si esta corrosión es localizada podemos clasificarla entre ataque macroscópico y microscópico.

4.2.1 Corrosión uniforme

Ocurre en la superficie de algún material de manera uniforme deteriorándolo y penetrando su superficie, ocurre generalmente en aceros al carbón y aceros aleados con componentes inoxidables como niqueles y cromos, generalmente ocurre por la aparición de impurezas y fases distintas al material base que contienen diferencia de potencial, ambientes industriales contaminados, presencia de sales o atmosferas con presencia de humedad relativamente alta.[4]

4.2.2 Corrosión galvánica

Sucede cuando existe la unión entre dos metales que poseen diferente potencial electroquímico y el material que tiene menor potencial es el que sufre la corrosión actuando como el ánodo y el cátodo distribuyendo la diferencia de potencial. Ver figura 4.


Figura 4. Ejemplo de corrosión galvánica[6]

4.2.3 Corrosión por picadura

Generalmente se desarrolla cuando un material metálico es expuesto a agentes corrosivos demasiado fuertes los cuales contienen agentes oxidantes que deterioran la superficie del metal base volviendo anódico ciertos puntos

concentrados del material que al momento de reaccionar van disolviendo el material generando huecos en la superficie metálica. Ver figura 5.



Figura 5. Ejemplo de corrosión por picadura[5]

4.2.4. Corrosión por grietas

Ocurre por la interacción entre un material metálico y otro no metálico, donde existe un espacio entre estas dos superficies hay presencia de oxígeno el cual actúa electroquímicamente funcionando como un cátodo y el metal como un ánodo, desgastando la superficie metálica, ver Figura 6.



Figura 6. Corrosión por grietas[7]

4.2.5 Corrosión por cavitación

Se genera por la implosión de burbujas de aire en un ambiente en el que se transporta algún fluido las cuales dañan la superficie metálica, este colapso de las burbujas produce microfracturas en la superficie del material, eliminando las capas protectoras como las de un acero inoxidable dejando expuesta la superficie metálica a procesos de oxidación y degradación acelerada.

Se presenta en piezas como válvulas, turbinas, bombas, tuberías y cuando el desgaste es continuo su desarrollo puede inducir a fracturas del material, generalmente a piezas que son sometidas a esfuerzos mecánicos.[8], ver figura 7.



Figura 7. Corrosión por cavitación desgaste en turbinas de bombas[8]

Es una forma de corrosión que generalmente sucede en sistemas de transporte de fluidos (tuberías), en los cuales el fluido transporta partículas que generalmente cuentan con una dureza mayor que el material en donde se transporta el fluido, estas partículas impactan con esta superficie desgastándola y consumiendo el material, debilitando la superficie permitiendo la aparición de corrosión. Ver figura 8.



Figura 8.Corrosión por erosión en tubería [9]

4.2.6 Corrosión por Exfoliación

Este tipo de corrosión se genera debajo de la superficie del material atacado el cual está sometida a esfuerzos y cargas cíclicas que permiten un desprendimiento laminar interno del material, su característica principal es la forma de escamas de pescado la cual se forma en la pieza, esta corrosión es característica en materiales como aluminios, magnesio o zincs.[9]. Ver figura 9.



Figura 9. Corrosión por exfoliación[9]

4.2.7 Corrosión por desaleación

Es un tipo de corrosión muy similar a la galvánica, en la que el material base pierde su elemento reactivo y retiene al componente que resiste la corrosión, el cual busca un estado de energía más bajo y se vuelve un material poroso en el que va perdiendo sus propiedades mecánicas. Los materiales que más sufren este tipo de corrosión son el zinc, aluminios y fundiciones grises.[5], ver figura 10.



Figura 10. corrosión por desaleación en Zinc

4.3 Métodos de control de corrosión.

Entre ellos podemos destacar 3 métodos primarios para el control de la corrosión entre ellos podemos encontrar (Selección de materiales, uso de recubrimientos, inhibidores de corrosión y protección catódica)

4.3.1 Selección de materiales

Una buena selección de materiales permite extender la vida útil del componente que se necesita cuidar aunque existan materiales más resistentes a la corrosión de otros es necesario tener en cuenta que todos los materiales van a sufrir algún tipo de desgaste por corrosión y el ambiente al que ellos estén sometidos acelera su desgaste; usualmente podemos definir que la velocidad de corrosión de algún metal es proporcional a la corrosión del ambiente y a la resistencia a la corrosión del material, por lo tanto para disminuir este velocidad de corrosión se puede evaluar usar elementos con mejores propiedades frente a este fenómeno, un ejemplo particular es el oro y el platino al contrario de los aceros que son metales activos.

4.3.2 Recubrimientos

Estos son materiales que se aplican a la superficie que se busca proteger entre ellos encontramos dos tipos de materiales, como lo son metálicos y no metálicos. Los recubrimientos metálicos se aplican a una superficie y la idea de ellos es que estos tengan un potencial energético mayor para que sean usados como ánodo de sacrificio, el ejemplo más común que se encuentra es el Zinc que se aplica en láminas de acero, actuando como par galvánico protegiendo las láminas de acero. Los recubrimientos inorgánicos podemos hablar de compuestos cerámicos que son

adheridos al material base para protegerlo de calor y/o desgaste, a su vez también se utilizan pinturas las cuales generan una barrera para incrementar tanto la resistividad eléctrica cortando el ciclo de corrosión.[4]

4.3.3 Inhibidores

Son elementos que se aplican al medio corrosivo con el fin de proteger o aislar el material expuesto a corrosión y existen de dos tipos; tipo anódicos y catódicos Los inhibidores anódicos, llamados pasivadores las cuales son sustancias oxidantes, por lo general, inorgánicas, que aumentan el potencial electroquímico del material por proteger, volviéndolo más noble[4] Los otros inhibidores son los catódicos, los cuales controlan el ph del medio corrosivo, con el fin de que estos no reacción. Estos inhibidores se utilizan para disminuir la velocidad de corrosión. Ver figura 11.



Figura 11. Aplicación de inhibidor de corrosión a lamina metálica[10]

4.3.4 Protección Catódica

Utilizan electrodos de sacrificio, materiales nobles como el zinc o el magnesio para inducir una corriente en el material que se quiera proteger con el fin de que todos los iones libres busquen y consuman los electrodos de sacrificio, generalmente se induce una corriente para que estos materiales se depositen. Ver figura 12.

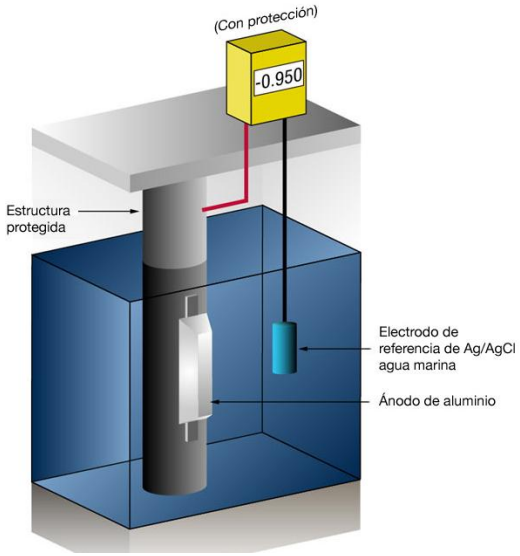


Figura 12. Esquema básico de protección catódica [12]

4.4 Corrosión atmosférica

Para analizar el fenómeno de la corrosión es necesario analizar el ambiente en el que se desarrolla esta condición por lo tanto con el fin de este anteproyecto es conocer el tipo de corrosión más común que puede definirse como el proceso de degradación natural causado por el aire y sus poluciones.

De acuerdo con esto podemos encontrar diferentes ambientes en la atmosfera, como lo son; el rural, industrial y marino, el más agresivo se puede catalogar como el marino, ya que la presencio de iones cloruro genera una velocidad de corrosión más alta, otro aspecto a destacar es la atmosfera industrial típico de la ciudad en donde podemos encontrar partículas de nitruros, azufres, fosfatos y ácidos que van a estar presentes junto la humedad en la atmosfera e inducen a la corrosión. Ver figura 13.



Figura 13. Corrosión atmosférica presente en tubería [11]

4.5 Tecnologías de limpieza industrial en Metales.

Es necesario describir los diversos procesos que se usan actualmente para la limpieza de aceros industriales, ya que estos materiales desde que son fabricados son expuestos a ambientes que promueven la aparición de corrosión, la cual afecta su apariencia, postproceso, y aún más importante sus propiedades físicas y mecánicas, por lo tanto en el entorno industrial se encuentran diversas alternativas para cumplir con este objetivo, por lo tanto se analizaran los tipos de limpieza química, mecánica y abrasiva.

4.5.1 Limpieza química.

La limpieza química es un conjunto de actividades que se desarrollan con el fin de preparar las superficies metálicas con el fin de eliminar aceites, grasas, sales solubles, óxidos ligeros y otros contaminantes que no se pueden eliminar fácilmente por medios. Para estos procesos se pueden utilizar soluciones químicas u orgánicas bien llamados desengrasantes.[11] Es necesario mencionar que existen varias técnicas para esta limpieza química, y entre ellas podemos encontrar la limpieza por

disolución que es la técnica usada para la limpieza de superficies metálicas con químicos.

4.5.2 Limpieza por disolución

Es un proceso en el cual se sumerge la pieza contaminada en un solvente que puede ser de tipo orgánico o acido, con el fin de restaurar el estado original del metal que permita tener una superficie limpia en la que se pueda adherir recubrimientos, este proceso también es llamado decapado. los solventes orgánicos se utilizan principalmente para disolver aceites y grasas, mientras que los ácidos se utilizan para disolver óxidos metálicos.

Entre los agentes de limpieza más utilizados se encuentra el ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fosfórico y ácido nítrico. Su principal función es eliminar la presencia de soldaduras, óxidos, manchas de humedad o corrosión, estos ácidos generalmente se combinan con inhibidores para mejorar el proceso de limpieza, entre ellos podemos encontrar que el uso de uso de formaldehído y la urotropina[10], son opciones a considerar como inhibidores ya que su acción en este proceso es acelerar el proceso de limpieza, disminuir la cantidad de ácido y de emisiones presentes en esta reacción y por ultimo evitar la pérdida de peso del material atacado por uso de este proceso. En la siguiente figura se describirá el proceso de limpieza por acido, ver figura 14.[12]

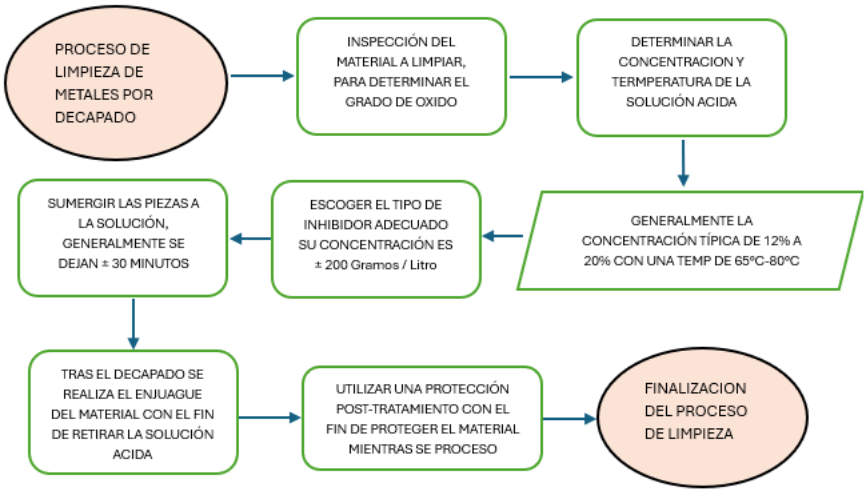


Figura 14.Proceso de limpieza química de ácidos. Elaboración propia

Dentro de este proceso de limpieza suceden algunas reacciones químicas que deben tenerse en cuenta ya que el uso de ácidos genera gases y subproductos. Un ejemplo en específico podría ser el uso de ácido sulfúrico H_2SO_4 que, al reaccionar con el óxido de hierro o magnetita, tiene la siguiente reacción:

$$Fe2o3 + H2SO4 \rightarrow FE2(SO4)3 + H20$$
Ecuación 3. Ecuación óxido de hierro y ácido sulfúrico

Los subproductos que se generan son FE2SO4, que son sulfato de hierro, el cual es un material que es soluble con el agua y queda en el fondo de la solución y además también es generada agua en el proceso. También es común que el ácido actúe con el material limpio, si esto ocurre puede ocurrir la siguiente reacción:

$$Fe + H2SO4 \rightarrow FE(SO4) + H2$$
Ecuación 4. Reacción hierro y ácido sulfúrico

Esto reacción es volátil ya que se genera hidrogeno y puede sugerir que el material base se encuentra afectado, además que su aspiración por un tiempo prolongado puede producir irritación en los ojos y en las vías respiratorias [13], también se debe tener en cuenta que si la limpieza es de otro tipo de material se pueden generar otro tipo de gases aún más peligrosos. Entre sus desventajas se encuentra la contaminación e impacto ambiental que genera debido a que sus residuos como el ácido o los sulfatos de hierro son considerados peligrosos y no pueden disponerse como desechos comunes o en el alcantarillado.

4.5.3 Limpieza por medios mecánicos y abrasivos

Son un tipo de limpieza en la cual se puede aprovechar la energía motriz o potencial de algún dispositivo y se basa en la eliminación física de impurezas mediante métodos como el sandblasting, granallado o el pulido con el fin de eliminar algún tipo de oxido, pintura o grasa.[14]

4.5.3.1 Limpieza por sandblasting

Es un proceso de limpieza mecánica que proyecta arena a presión por medio de un compresor de aire para limpiar superficies a alta velocidad, para limpiar oxido o pintura. La arena utilizada es un material bastante abrasivo, generalmente se utiliza arena de sílice o algún abrasivo fino y entre sus desventajas se encuentra su polución excesiva ya que causa contaminación del aire[15].

4.5.3.2 Limpieza por granallado

Este es un proceso en el cual se lanza un material abrasivo con una geometría definida como esferas, por medio de aire a presión o de una bomba mecánica, con el objetivo de retirar también oxido, pinturas o grasas pero con la ventaja de que al ser un proceso que en donde las partículas que utiliza tienen una forma definida otorga una regularidad en la superficie que se limpia, aporta dureza a las piezas y uniformidad para algún postproceso.[15] Estas granallas se pueden encontrar de varios materiales entre ellas se encuentran; acero al carbón, cobre, aluminio o incluso vidrio que se usan para casos específicos de limpieza, su fortaleza radica

en una buena preparación superficial, y que generalmente la granalla se puede volver a recuperar y usa en otro proceso. Ver Figura 15.



Figura 15. Proceso de granallado de una superficie[15]

4.5.3.3 Limpieza abrasiva

Es un proceso en el cual se ensambla un disco de pulir o de lijar a una máquina rotatoria con el fin de desbastar o lijar alguna superficie metálica mediante el roce y resistencia que produce la superficie que se quiere tratar y el disco de desbaste. Estos discos abrasivos tienen 3 componentes el material o partícula abrasiva, el aglomerante para unir estas partículas y la base donde se conformó el disco para su uso.[16]

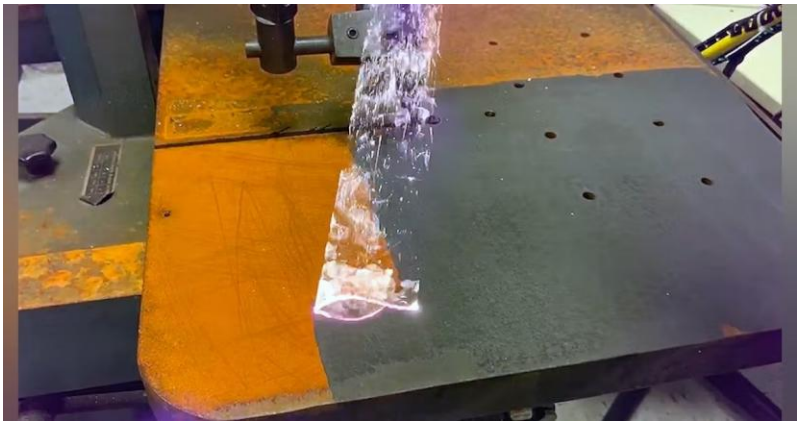
Entre los granos más usados en la industria se usan los conformados por oxido de aluminio, granos cerámicos, carburo de silicio y zirconio, y de acuerdo con su morfología tienen su respectivo tamaño de grano, dureza, estructura y aglutinante especifico, estos discos pueden ser usados por 2 tipos de máquinas como lo son las pulidoras y los dispositivos roto-orbitales que, de acuerdo con la velocidad de trabajo, y aplicación especifica se usaran. Los discos más comunes son los de; corte, pulir, desbaste y lengüeteados y se usan principalmente para retirar oxido, pintura, grasa, cordones de soldadura. Ver figura 16.



Figura 16. Ejemplo discos abrasivos flap para retiro de oxido.[18]

4.6 Tecnología láser aplicada a la limpieza

La limpieza laser es el procedimiento en el cual se eliminan capas de contaminantes sobre distintos materiales, usando un láser pulsado con una potencia, frecuencia y una intensidad especifica, para producir una ablación láser.[17]. Ver Figura 17.


Figura 17. Aplicación de tecnología láser[18]

La tecnología láser es un proceso relativamente nuevo el cual tiene diversas aplicaciones en la industria como lo es la soldadura, el corte de piezas metálicas y por último el de la limpieza, la cual puede usarse para limpieza de microorganismos, recubrimientos o limpieza de óxidos.

En este caso el láser tiene una aplicación especial la cual es la limpieza de superficies metálicas en el cual se proyecta el haz de laser provocando un cambio de fase en el material atacado de esta manera eliminando los residuos que tenga la superficie para eliminar contaminantes como óxido, pintura, óxidos y recubrimientos sin dañar el sustrato metálico. Este sistema entre sus ventajas podemos incluir que es un sistema; rápido, preciso, eficiente y de carácter ecológico, ya que estamos reemplazando el uso de químicos o en su defecto de abrasivos para el mismo fin. Ver Figura 18.



Figura 18. Fuente convencional de soldadura laser[19]

4.7 Principios físicos de la limpieza laser (absorción, ablación, fototérmico)

Para entender este proceso de limpieza por tecnología láser es necesario conocer los principios de funcionamiento de este proceso, entre ellos encontramos la absorción, ablación y el fototérmico.

4.7.1 Funcionamiento básico del laser

El láser es un haz de luz coherente, el cual se compone de fotones que viajan ordenados y fijados en una dirección especifico, este láser se genera de la siguiente manera; se encuentra constituido en su forma más simple por un medio de amplificación o ganancia en donde ocurre la emisión del láser, un serie de espejos que realizan la retroalimentación de la luz, una cavidad óptica resonante de alta calidad y por ultimo una fuente de excitación que generalmente es generada por una descarga eléctrica o una fuente de luz, generando un cambio de estado energético emitiendo una radiación. Ver figura 19.

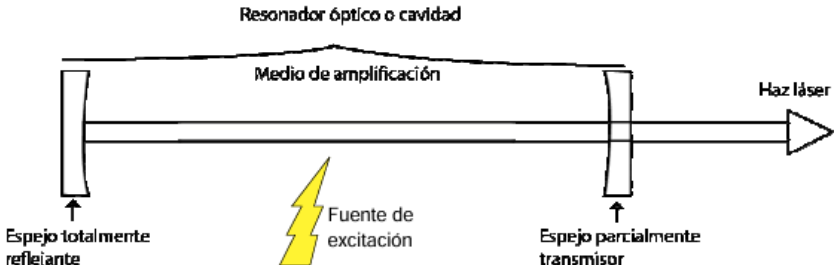


Figura 19. Esquema básico de un láser [19]

Es necesario mencionar que la energía del fotón emitida en la transición está dada por la ecuación de Bohr.

$$E2 - E1 = H * V$$

Ecuación 5. Ecuación de Bohr.

Donde E, son los estados de energía, H es la constante de Plank y V es la frecuencia de la radiación emitida, esta relación indicad que cuando un solo átomo es excitado genera una reacción en cadena excitando el resto de los fotones del sistema. Ver Figura 20.

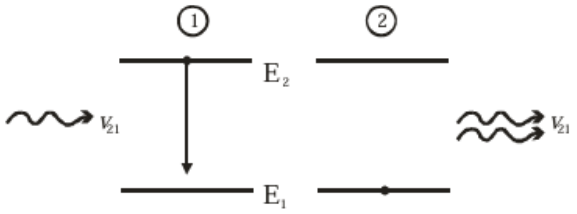


Figura 20. Reacción estimulada de los átomos.[19]

La luz laser posee algunas propiedades distintivas como lo son la propiedad de coherencia, direccionalidad, brillo y mono cromaticidad; la coherencia es la propiedad que tienen los fotones laser de estar en el mismo nivel de energía, por lo tanto, al ser coherentes poseen la característica de que la luz laser sea emitida en una misma dirección y para que esto suceda los fotones deben tener la misma longitud de onda.[17]

Podemos encontrar 2 tipos de fuentes laser en el mercado, como lo son por la forma de excitación y podemos encontrar fuentes de estado sólido, ver figura 21, y de estado gaseoso; las fuentes de estado sólido se caracterizan porque su medio de activación es un cristal sólido, mientras que en los gaseosos su medio de activación son gases generalmente nobles que actúan entre si generando el medio propicio para su activación.



Figura 21. Fuente de estado sólido Innova[20]

4.8 Interacción del láser de limpieza sobre las superficies

Según la ley de la conservación de la energía al proyectarse el haz de energía laser, esta energía se puede dividir en 3, como lo son energía de reflexión sobre la superficie del material, absorción dentro del material y conducción.

Dependiendo de la intensidad y la potencia del láser al momento en que se proyecte en alguna superficie pueden ocurrir ciertos fenómenos que provocan la limpieza de la superficie entre ellos tenemos en cuenta; la absorción que es el fenómeno que se presenta cuando la energía generada por el haz de luz láser puede lograr el cambio de fase del material atacado de esta manera, esta energía será disipada en el medio como energía térmica y cuando esta radiación llega aproximadamente a unos valores de ± 10x105 W / Cm2, es absorbida por el material atacado y pueden suceder otros fenómenos como lo son la ablación laser, vaporización, fusión o la generación de ondas de choque.

4.8.1 Ablación láser

Es el fenómeno que sucede cuando se realiza la limpieza de algún material por medio de la tecnología láser en la cual por interacciones foto térmicas o foto químicas. La ablación laser se genera cuando la intensidad de la radiación generada por el láser incide sobre un medio y alcanza su densidad de energía, que permite la vaporización del algún material que puede ser sacado de la superficie, en donde se genera una onda de choque por el mismo proceso de ablación. Ver figura 22.

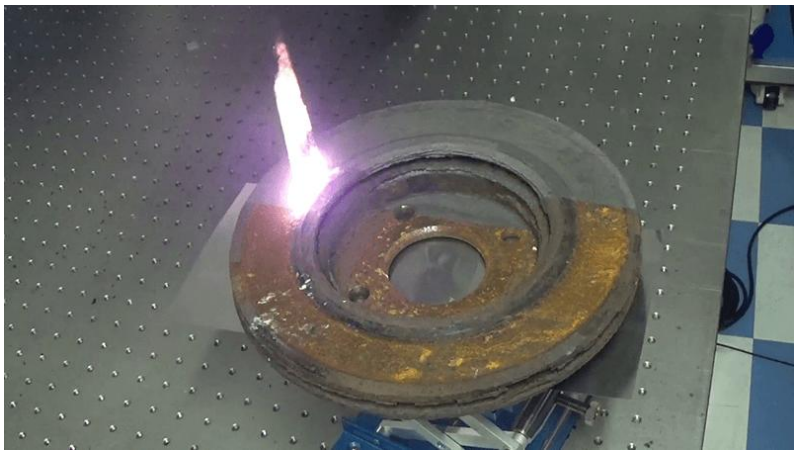


Figura 22. Proceso de ablasión laser[21]

Esta ablación puede ser foto térmica o foto química, la foto térmica se produce cuando la energía laser se convierte en energía térmica y se desarrolla una reacción vaporización violenta, y la reacción foto química que es la más deseada en la cual se busca el rompimiento de las cadenas moleculares y de enlaces químicos para que se lleve a cabo el desprendimiento del material que se requiere remover.

Es necesario tener en cuenta el parámetro de relajación térmico del material que se expresa con la siguiente función:

$$\Upsilon = \frac{d^2}{2\alpha}$$

Ecuación 6. Ecuación de relajación térmica del material. [17]

Este sistema representa el tiempo que toma el sistema para disipar la energía térmica y depende de la profundidad de penetración d y del coeficiente de dilatación térmico del material α, cuando el tiempo del pulso laser es mayor al establecido en la formula la radiación se disipa en forma de calor y provoca daños en el material limpiado, mientras si se usa en tiempo adecuado podría pasar la reacción foto-química en donde se desprende el material como oxido o pintura sin dañar la matriz del material[17]. Ver figura 23.

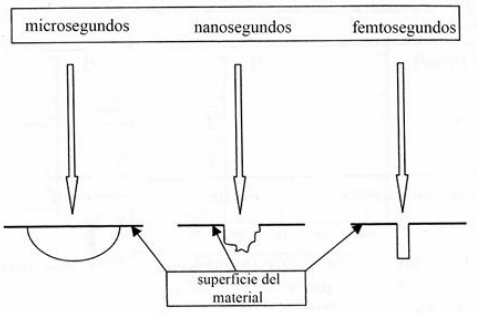


Figura 23. Comportamiento de ablación laser según el tiempo [19]

4.9 Parámetros operativos relevantes: Potencia, Frecuencia y velocidad.

Existen varios parámetros que son necesarios para ajustar en las maquinas laser los cuales dependiendo del material a limpiar podemos ajustar, ver Tabla 1.

Tabla 2. Parámetros de ajuste en máquinas laser - elaboración propia

Parámetro	Descripción	Rango	Cómo ajustarlo
Potencia del láser	Energía emitida por el láser por unidad de tiempo.	20W-3000W	Aumenta para capas más gruesas o recubrimientos muy adheridos; reduce para evitar dañar el sustrato.
Energía por pulso	Energía entregada en cada pulso (para modos pulsados).	1 – 50 J	Mayor energía para limpieza profunda; menor para eliminar contaminantes ligeros.
Frecuencia de pulso	Número de pulsos por segundo (Hz) en modo pulsado.	1 – 500 Hz	Más alta para soldaduras continuas; más baja para mayor energización por pulso.

Duración de pulso	Tiempo que dura cada pulso de láser.	0,1 – 10 ms	Alta frecuencia para superficies lisas y uniformes; baja para capas muy adheridas.
Velocidad de escaneo	Velocidad a la que el haz se desplaza sobre la superficie (mm/s).	10 – 5.000 mm/s	Más lento para retirada completa de capas gruesas; más rápido para limpiar contaminantes superficiales.
Wavelength (longitud de onda)	Color del láser, influye en absorción por el material.	355 nm – 1.064 µm	UV (355 nm) para plásticos y pinturas; IR (1.064 µm) para óxidos y metales.
Gas de protección	Tipo y flujo de gas (p. ej. argón, nitrógeno) que evita oxidación.	5 – 20 L/min	Aumentar flujo para proteger áreas amplias; reducir para evitar turbulencias.
Superposición de pulsos	Porcentaje de solapamiento entre impactos sucesivos del haz.	30 – 70 %	Más solapamiento para cordones continuos; menos para ciclos más rápidos.
Forma de pulso	Perfil de potencia dentro del pulso (rectangular, trapezoidal, ramp).	Depende del equipo	Seleccionar trapecio para entrada suave; rectangular para máxima intensidad.

4.10 Ventajas sobre métodos químicos, mecánicos y abrasivos

Esta tecnología de limpieza posee muchas aplicaciones que hoy en día se siguen desarrollando entre las bondades más importantes de este sistema es necesario mencionar:

- No es invasiva; no requiere productos químicos ni abrasivos.
- No hay contacto mecánico con la pieza a tratar.
- Efectos térmicos despreciables.
- Elevado control y precisión en limpieza.
- Rapidez en aplicación.
- Versatilidad, ya que permite la eliminación de cualquier contaminante.
- Preserva el relieve superficial.
- Produce un mínimo daño ambiental y de salud humana.

4.11 Automatización industrial

La propuesta para llevar a cabo la automatización industrial de este sistema la podemos dividir en varias partes como lo son los elementos de control, sensores, sujeción y motriz aplicados, los cuales se desarrollarán en los siguientes apartados.

4.11.1 Elementos de control

Entre los elementos de control que se podrían usar para estos sistemas tenemos el PLC como una unidad de control del sistema, nuestros sensores; de proximidad, corrosivos, encoder y pantallas hmi.

4.11.1.1 PLC (Controlador lógico programable)

Es un dispositivo digital electrónico con una memoria programable el cual cumple con la función de controlar y gestionar las entradas y salidas de un sistema, además de ello el realiza el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como pueden ser lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos. [22]

Para este sistema podríamos usar un PLC modular que cuente con 16 e/s digitales y si es posibles con 8 e/s analógicas un ejemplo podría ser el S7-1200 de Siemens. Ver Figura 24.



Figura 24. PLC siemens s7-1200.[23]

4.11.1.2 Sensores de proximidad

Están diseñados con la finalidad de detectar la presencia de objetos cercanos sin requerir el contacto físico, se encuentran los capacitivos que identifican la presencia de un área conductiva que altera un campo eléctrico existente y los inductivos que detectan los cambios en la resistencia magnética mediante un bucle de inducción.[24] La idea de este sensor es que nos ayude a detectar la ubicación de la pieza metálicas sin tener contacto con ella. Ver figura 25.



Figura 25. Sensor de proximidad capacitivo[25]

4.11.2 Sensores de corrosión

Son sensores específicos para medir la perdida de metal en ambientes corrosivos, generalmente se utilizan en tubería, entre los tipos de sensores que podemos encontrar en la industria; tenemos el de resistencia eléctrica, ultrasonido, electroquímicos y sensores de imagen.

4.11.2.1 Sensores de resistencia eléctrica

Tienen como función monitorean la resistencia eléctrica de una superficie metálica y detectan las variaciones de esta propiedad; la cual, indica la presencia de corrosión. A medida que avanza, la resistencia eléctrica aumenta, lo que se traduce en una señal de alarma, estas ondas proporcionan una medida básica de la pérdida de metal.[26], ver Figura 26.



Figura 26. Sensor de corrosión de resistencia eléctrica.[27]

4.11.2.2 Sensores de ultrasonido

Utilizan ondas sonoras de alta frecuencia para inspeccionar la integridad de los materiales metálicos, detectando la disminución de espesor.[26], ver Figura 27.



Figura 27. Sensor ultrasónico instalado en tubería [26]

4.11.2.3 Sensores electroquímicos

Son dispositivos químicos altamente sensibles que responden a cambios específicos en el potencial o a la corriente eléctrica como consecuencia de la presencia de una especie química; lo cual, es indicio de la formación de productos de corrosión.[26]

4.11.3 Sensores de Imagen

Son como las cámaras termográficas, pueden identificar patrones de calor anormales en la superficie de los activos industriales, indicando daños o desviaciones en la operación de un activo.[26]

4.11.4 Sensores encoder

Es un sensor que convierte el movimiento en señales eléctricas digitales o analógicas el cual traduce la posición, velocidad o dirección de un objeto en información que puede ser interpretada por un sistema de control, ver figura 28. Entre los encoders según el tipo de movimiento, tecnología y salida de datos, entre ellos tenemos los siguientes:



Figura 28. Sensor Encoder incremental[28]

4.11.4.1 Encoder rotativo

Estos sensores convierten el giro de un eje en señales eléctricas que representan su posición o velocidad. Son esenciales en sistemas donde se necesita un control

preciso del movimiento angular.[28] unos de sus usos en específico es la robótica, motores eléctricos o bandas transportadoras.

4.11.4.2 Encoder lineal.

Los encoders lineales, en lugar de medir rotaciones, detectan desplazamientos en línea recta. Funcionan mediante una escala graduada que un sensor lee para determinar la posición exacta en un eje, ver figura 29. Entre sus aplicaciones tenemos máquinas cnc, impresoras 3d o elevadores de transporte vertical.[28]



Figura 29. Sensor Encoder lineal kd 100 [29]

4.11.4.3 Encoder incremental.

Los encoders incrementales generan una serie de pulsos eléctricos a medida que giran o se desplazan. Su gran ventaja es su simplicidad y su capacidad para medir velocidad y dirección de movimiento en tiempo real.[28]

4.11.4.4 Encoder absoluto.

Se denomina encoder absoluto debido a que sus posiciones son especificadas por el operador del dispositivo y las posiciones siempre permanecen igual, por lo tanto, las posiciones que se codifican nunca van a cambiar, son absolutas y no varían.[30]

4.11.4.5 Encoder óptico.

Los encoders ópticos utilizan un disco con patrones de líneas y un sensor de luz para detectar el movimiento. Ofrecen una resolución extremadamente alta, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren mediciones precisas.[28]

4.11.4.6 Encoder magnético.

Los encoders magnéticos detectan el movimiento mediante campos magnéticos. Son mucho más robustos que los ópticos, lo que los hace perfectos para ambientes industriales con polvo, humedad o vibraciones.[28], ver Figura 30.



Figura 30. Encoder magnético 20 CPR [31]

4.12 Pantallas HMI (Interfaz Hombre–Máquina)

Es un panel de operación cuya función es la de permitir la comunicación entre el usuario y el sistema, software o máquina a la que esté conectado. Es capaz de traducir las variables existentes en los procedimientos que son demasiado complejos en información que el operador del sistema utilizará en las operaciones, haciendo más fácil la producción en fábricas e industrias.[32] esta interfaz permite monitorear el estado del proceso, alarmas o parámetros de limpieza. Ver figura 31.



Figura 31, Pantalla HMI Siemens.[33]

4.13 Actuadores y ejes motorizados.

Para llevar a cabo esta propuesta también es necesario utilizar componentes que nos permitan la sujeción de la tubería y el movimiento de esta, por lo tanto, se deben conocer los tipos de actuadores y/o motores que podrían ser usados en esta aplicación.

4.13.1 Sistema de rodillos motorizados.

Este sistema lo que pretende es hacer girar la tubería a una velocidad controlada con el fin de que esta rote y el láser pueda ser aplicado uniformemente, para este sistema podríamos usar; servomotores y reductores que junto unidos a unos rodillos

podrán hacer girar la tubería y para conocer la posición se usaran encoders absolutos.

4.13.2 Servomotores.

Un servomotor es un motor eléctrico que contiene un juego de engranes junto con un circuito electrónico de control, con la finalidad de poder controlar el giro de dicho motor y así poder elegir siempre la posición deseada.

Normalmente estos dispositivos tienen un rango de operación de 180°. Los servomotores funcionan a través de una señal eléctrica que tenemos que modificar según la posición en la que queremos girar nuestro motor. A estas modificaciones se le conoce como PWM por sus siglas en ingles Pulse Wide Modulation o Modulación por ancho de pulso. Todos los servos tienen tres cables uno de Voltaje (4.8v a 6v), uno para tierra (Gnd) y el tercero que se utiliza para recibir la señal modulada que se utiliza para controlar el giro.[34], ver imagen 32.



Figura 32. Servomotor GDM[35]

4.13.3 Reductores.

Un reductor es un dispositivo de transmisión mecánica que conecta un motor a una carga accionada que permite modificar el par y la velocidad entre un motor y una carga. El reductor consiste en un conjunto de engranajes. Existen cuatro principales tipos de reductores: los reductores planetarios, los reductores de tornillo sin fin, los reductores de tren de engranajes y los reductores de engranajes cónicos.

4.14 Sistema de mandril neumático

Este sistema permitirá centrar y bloquear el extremo de la tubería, con el fin de que esta tenga un seguro y no permita un movimiento no deseado al momento de limpiar la tubería por tecnología láser.

4.14.1 Mandril neumático y plato autocentrantes

Son dispositivos robustos de alto par mecánico que permiten obtener un agarre fiable y antideslizante, proporcionando el máximo control de balanceo y funcionamiento de las máquinas a máxima velocidad. Estos elementos sujetan gran parte del área de la tubería, con una presión firme y uniforme que impide el deslizamiento.

además del mandril es necesario un plato de 3 mordazas autocentrantes con cilindro neumático incorporado Estos platos se pueden utilizar en tornos CNC, tornos convencionales, divisores o dispositivos especiales que no cuenten con cilindros de accionamiento, ya que los mismos tienen un cilindro incorporado. Estos sistemas son ideales para el mecanizado de barras o tubos largos[36]. Ver Figura 33.

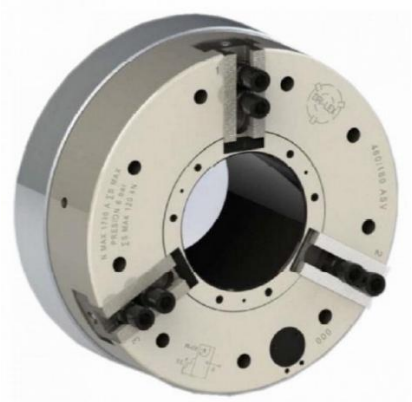


Figura 33.Sistema autocentrante de tubería [38]

4.15 Sistema de enfoque

Ya que el sistema va a tener la antorcha del láser enclavada a un soporte, para controlar el enfoque y el ángulo de aplicación del láser se necesita controlar su eje z que es la distancia focal a la que el láser va a atacar el metal y es variable ya que dependiendo del diámetro de la tubería se debe bajar o subir la distancia focal debido a que este diámetro no es constante para todos los casos, por lo tanto, se utilizara un encoder lineal para este fin, con un final de carrera para su movimiento.

4.16 Sistema de autolimpieza

Para este sistema se propone el uso de un sistema de vacío para la extracción del humo generado por la ablación laser, en la cual al desprenderse el material del metal se generan gases contaminantes y nocivos para la salud humana, por lo tanto, se utilizará un sistema de electroválvulas de vacío que se activaran una vez comience a iniciarse el proceso de limpieza.

4.16.1 Electroválvulas de vacío

Una válvula solenoide para sistemas de vacío regula el flujo de aire para generar o liberar un vacío, desempeñando un papel vital en el mantenimiento de los niveles de presión requeridos. Seleccionar la válvula solenoide de vacío adecuada es esencial para lograr un rendimiento óptimo en diversas aplicaciones, incluyendo bombas de vacío, robótica y dispositivos médicos.[37] ver Figura 34.



Figura 34. Electroválvula para vacío YCSM41[38]

4.17 Seguridad industrial en sistema de limpieza

En el diseño de estos sistemas se debe tener cuenta la integridad tanto del operario como de los componentes de la maquina por lo tanto se sugieren 3 sistemas de seguridad, en los que podemos mencionar; Sistema de parada de emergencia y sistema control de movimiento.

4.17.1 Sistema de parada de emergencia

Se sugiere el uso de pulsadores de emergencia en el PLC, la pantalla HMI y en la zona de acceso del sistema con el fin de parar el proceso el proceso en cualquier momento. Ver figura 35.



Figura 35. Sistema de parada de emergencia[39]

4.17.2 Sistema de control de movimiento

Como la tubería se encuentra en movimiento es recomendable usar límites de torque en los servomotores para cuidar la integridad de estos en tal caso que la tubería se atasque. Otro sistema de seguridad es usar barreras de luz que interrumpan la operación o la limpieza si detectan algún objeto extraño dentro del área de trabajo. Ver figura 36.



Figura 36. Sistema de barrera de luz Omron[40]

5. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se enumeran los documentos base que se encuentran relacionados al proyecto:

1. A review of thermal effects and substrate damage control in laser cleaning[37]
2. Laser cleaning of metal surfaces: Physical processes and applications[41]
3. The quality improvement of laser rubber removal for laminated metal valves[42]
4. Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy [1]
5. Estudio de parámetros físicos importantes en los procesos de objetos de vidrios con láser con aplicación a objetos patrimoniales[43]

5.1 A review of thermal effects and substrate damage control in laser cleaning[44]

Este artículo se centra en los efectos térmicos que se desarrollan al momento de aplicar el haz láser y en las estrategias para minimizar los daños en la limpieza láser.

Se explica detalladamente el mecanismo de eliminación de ciertos contaminantes como lo es la pintura sobre el metal y los efectos térmicos, reacciones, ondas de choque, evaporización y la radiación térmica residual en la superficie del sustrato.

Se analizaron los distintos mecanismos tipos de limpieza laser que puede realizarse como lo es la limpieza en seco o en húmedo y porque para el proceso de limpieza se prefiere realizarse en seco.

Especifican la importancia de parámetros del láser como lo son la frecuencia, la potencia del láser, y la velocidad de aplicación que debe usarse para una limpieza optima.

Se llevaron a cabo simulaciones por medio de programas como Ansys con el método de análisis finitos para validar la teoría con los datos analizados para estudiar el comportamiento los perfiles de temperatura, ablación, densidades de energía en el proceso de limpieza laser.

Además de ello profundizan en un ejemplo realizado por Zhang[44] acerca del comportamiento de una superficie con pintura, pero de color rojo y azul y como fue la limpieza de la pintura azul con parámetros de frecuencia de 1064nm que fue una limpieza optima, pero al momento de realizar la limpieza de la pintura de color roja lo que hizo fue dañar el sustrato del material pintado. Ver figura 37.

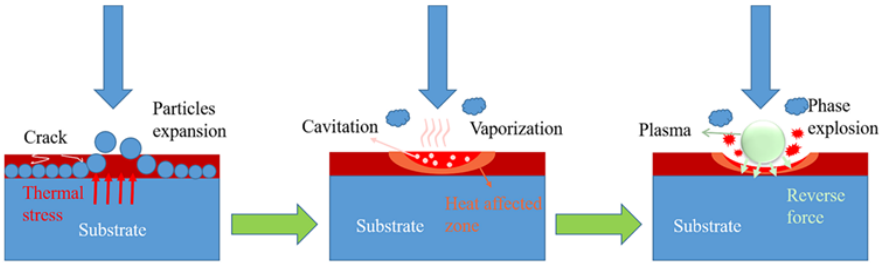


Figura 37. Esquema de limpieza por método laser, sobre pintura [42]

Este articulo permite evidenciar definir cual ¿los efectos térmicos que se presentan en material que se limpia y que puede suceder si encuentran contaminantes al momento de la limpieza, a su vez desarrolla estrategias y establece parámetros para cuidar el sustrato sin tener que afectarlo incluso sugiere métodos para que el proceso de limpieza mejore el sustrato de la pieza.

Ver tabla 3, en la cual nos sugiere algunos parámetros para limpieza de oxido y pintura en superficies metálicas, como lo son aluminio y aceros.

Tabla 3. Parámetros sugeridos para limpieza de oxido y pintura [42]

Cleaning object	Parameter	Improved performance
5083 aluminum alloy[40]	Wavelength 1064 nm, average power 40 W, scanning speed 2500 mm/s, repetitive frequency 85 kHz	The stress and strain of joints were 277.9 MPa and 13.88 %
Oxide layers of AA5083-O aluminum alloy[41]	Wavelength 1064 nm, pulse duration 10 ns, frequency 10KHz, scanning velocity 600 mm/s, spot diameter 0.6 mm, number of pulses per unit area 10, laser fluence 3.5,7.1,8.5 J/cm^2	Corrosion resistance improved
Surface paint layer 0f 5A06 aluminum alloy [42]	Wavelength 1070 nm, spot size 5.0 mm, laser power density 11.9 W/cm^2	Corrosion resistance improved
Surface painting layer of AH36 steel [43]	Wavelength 355 nm, laser pulse width 15 ns, repetition rate 100 kHz, laser fluences 2,5,7J/cm^2	Microhardness, tensile strength, and bending strength dramatically improved

5.2 Laser cleaning of metal surfaces: Physical processes and applications

Es este artículo se busca definir los procesos físicos que se producen mediante la limpieza láser de superficies metálicas para eliminar partículas de suciedad, recubrimientos y capas de óxido o corrosión cercanas a la superficie.

Se proponen métodos no convencionales de limpieza láser que mejoran la calidad y la eficacia de la limpieza, así como la solución al problema de la acumulación de suciedad. Se estudian aplicaciones como la limpieza de poros, la eliminación de recubrimientos, la eliminación de capas contaminadas radiactivas y la limpieza de monumentos. [41]

En este artículo se realizaron pruebas con un láser Nd:YAG de 10 ns/50 Hz, en el cual se realizaron algunas pruebas experimentales, entre ellas se utilizaron métodos no convencionales en los que utilizaron una película fina en la cual el haz de laser se traspasaba con el fin de que esta película retuviera el material desprendido del sustrato metálico, aparte realizaron ensayos donde cambian el ángulo de incidencia del láser, demostrando que utilizando un ángulo de 20° mejora la apariencia del perfil limpiado, ver figura 38.

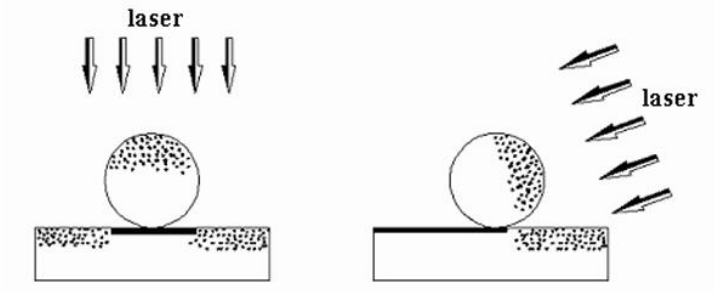


Figura 38. Efecto de incidencia de ángulo de aplicación del láser [41]

Los experimentos demostraron las ventajas que ofrece la limpieza láser para la eliminación de recubrimientos, la eliminación de capas superficiales contaminadas radiactivamente y la posibilidad que ofrece usar una película, para recoger ese material. Además, intenta explicar cuantitativamente que si se utiliza mayor potencia de la que el material puede soportar este podría generar un daño en la superficie.

5.3 The quality improvement of laser rubber removal for laminated metal valves[42]

En este trabajo se investigó una aplicación nueva aplicación para la remoción de la capa de caucho (Buna-N) laminado sobre unas válvulas de acero inoxidable mediante limpieza láser, comparando métodos “seco” y “húmedo” para evaluar su efecto sobre la superficie metálica atacada. El objetivo fue determinar si la limpieza láser, especialmente en ambiente acuoso (liquido), podía eliminar eficientemente el caucho envejecido sin dañar la rugosidad, la estructura metalográfica ni la dureza del metal base, ya que, con otros métodos tradicionales como ácidos, granallado o limpieza por abrasivo no se logra el objetivo de limpiar la válvula.

Se llevo a cabo un método experimental para evaluar el comportamiento de la eliminación del caucho en las probetas de acero inoxidable, ver Imagen 39.



Figura 39. Probetas de caucho Buna-N [40]

Después de la selección de la probeta se llevó a cabo la fase experimental en la cual se expuso el material al haz de laser para la limpieza con los siguientes parámetros; temperatura ambiente y humedad constante, y los resultados experimentales se determinaron optimizando los parámetros láser. Dado que el espesor de la capa de caucho es de hasta 2 mm, se requieren múltiples escaneos para eliminarlo. Al mismo tiempo, durante el proceso de limpieza láser, una parte del láser actúa sobre la superficie del sustrato, lo que puede afectar sus propiedades.[42]

Para garantizar la eficiencia de la eliminación láser y la limpieza de la superficie del sustrato, los parámetros finales de la eliminación de caucho láser son: potencia láser de 160 W, frecuencia de pulso de 20 kHz, ancho de pulso de 60 ns, velocidad de escaneo de 2000 mm/s y espaciado entre líneas de 0,1 mm.[42]

Adicional se llevaron a cabo ensayos de metalografía, microscopia y dureza para verificar el resultado de la limpieza después de los ensayos.

Durante la limpieza láser húmeda, la inmersión y la pulverización de agua reducen eficazmente la acumulación de calor. La rugosidad superficial, la microestructura y la microdureza Vickers se mantienen prácticamente inalteradas, lo que garantiza una eliminación de caucho de alta eficiencia y calidad en la superficie de las válvulas metálicas laminadas, sin afectar el rendimiento del sustrato. La tecnología de limpieza láser húmeda se utiliza ampliamente en la limpieza de caucho de moldes, con una aplicación universal y un avance significativo en el campo de la eliminación de caucho mediante láser húmeda.[42]

5.4 Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy[44]

Se realizo una investigación experimental en la cual se caracterizó los niveles de energía del aluminio con referencia 5754, de esta manera para conocer sus gradientes termodinámicos en donde podemos evidenciar el mecanismo de limpieza, como tal La investigación demostró que la limpieza láser puede eliminar

completamente la capa de óxido. El umbral de limpieza inicial fue de 12,7 J/cm² y el umbral de limpieza completa fue de 25,5 J/cm². [45]

Se llevo a cabo unos ensayos experimentales en probetas de aluminio en los que se llevo a cabo la prueba de quitar el oxido “alumina” de su superficie por lo tanto Se seleccionó la aleación 5754Al como material experimental y se cortó en muestras de 12 mm × 8 mm × 2 mm (largo × ancho × espesor).

La composición química nominal se muestra en la Tabla 1. Antes de la limpieza láser, las muestras se limpiaron con acetona, con el fin de eliminar el aceite y la grasa superficial, y se secaron al aire a temperatura ambiente. Las muestras se mantuvieron a temperatura constante (25 °C) y humedad relativa (32 % HR) durante aproximadamente dos meses y se oxidaron de forma natural. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) para observar la sección transversal de la muestra y la capa de óxido. Se utilizaron los siguientes parámetros de operación. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Parámetros para limpieza de óxido de aluminio [45]

Main working parameters of laser cleaning equipment.

Maximum Power	100 W
Wavelength	1064 nm
Pulse Duration	100 ns
Maximum Frequency	500 kHz
Scanning Speeds	0–12 m/s
Temperature Request	5–40 °C
Humidity Request	10–95%

Para evaluar el resultado de la aplicación se llevó a cabo unas pruebas con microscopio electrónico de barrido, donde podemos evidenciar la eliminación del oxido, ver Imagen 40.

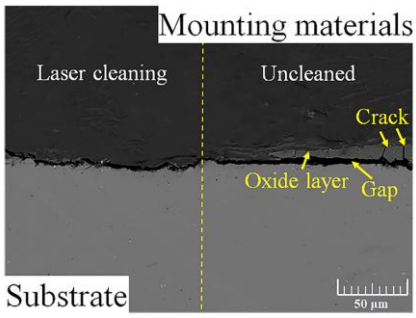


Figura 40. Sección transversal de aluminio sometido a laser vs con oxido [45]

Tras la irradiación láser, el efecto de acoplamiento de la tensión térmica provocó la separación del sustrato y la capa de óxido. A baja densidad energética, la explosión de fase causada por la ablación láser fue el principal mecanismo de limpieza. A alta densidad energética, además de la explosión de fase, la evaporación por impacto

inducida por la presión provocó la salpicadura y la eliminación de la capa de óxido.[42]

A partir de los resultados experimentales, el umbral de limpieza inicial fue de 12,7 J/cm² y el umbral de limpieza completa fue de 25,5 J/cm². El valor teórico calculado a partir del modelo fue de 16,4 J/cm², superior al umbral de limpieza inicial debido a la expansión térmica de los materiales y al diferente espesor de la capa de óxido.[44]

5.5 Estudio de parámetros físicos importantes en los procesos de objetos de vidrios con láser con aplicación a objetos patrimoniales[45]

En este trabajo se realizó un estudio de los parámetros importantes que ocurren al momento de realizar la limpieza laser ya que se considera que conociendo los parámetros se va a obtener un mejor resultado para este proceso. Se realizó un montaje experimental del proceso de limpieza laser usando una máquina laser de pulsos en la cual se hizo incidir sobre vidrios que cuentan con una pintura como recubrimiento en los cuales se caracterizó y definió los umbrales de trabajo para la limpieza por lo cual se caracterizaron parámetros, adicional como el material que se limpio fue vidrio en este análisis se intentó realizar la limpieza de manera frontal y posterior.

Se realizo un montaje para hacer pruebas de limpieza en superficies de vidrio, en las cuales se usó pintura de diferentes colores, y se hizo incidir el haz laser hacia el vidrio con el fin de limpiar la pintura aplicada lo cual permitió demostrar que el láser es capaz de sublimar la pintura y limpiar la superficie, entre las pruebas que se realizaron se usó una capa de vinilo como protección entre el láser y el vidrio con el fin de que no maltrata el material, en el documento se detalla este procedimiento y se recomienda que para una buena limpieza se recomienda realizar una limpieza mecánica posterior utilizando un paño limpio y sin para eliminar residuos sólidos o partículas remanentes generadas durante el proceso de limpieza láser. Esta acción garantiza la remoción física de depósitos sueltos y evita su redistribución o sobre la superficie tratada

Se determino que para eliminar la pintura sobre estas superficies no es necesario conocer el espesor de la pintura o el material del sustrato, para su eliminación se debe conocer el color y el tipo de pintura y que en el caso de remoción de pintura generalmente se crea una capa de material orgánico el cual absorbe parte del haz de láser

6. METODOLOGÍA

La metodología propuesta se desarrollará en cuatro etapas principales, alineadas con los objetivos específicos del proyecto. Se utilizará un enfoque cuantitativo-experimental, complementado con análisis documental y técnico, orientado al diseño y evaluación de una solución tecnológica innovadora.

6.1 Analizar los procesos actuales de limpieza química de tuberías conduit, identificando sus limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad laboral.

- Recolectar información sobre el proceso de limpieza química utilizado en la industria.
- Identificar limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad del método actual.

6.2 Investigar los principios físicos y parámetros técnicos de la limpieza láser aplicables a superficies metálicas, con el fin de determinar su viabilidad en la remoción de óxidos y contaminantes sin afectar el material base.

- Recolectar información bibliográfica y análisis técnico sobre tecnologías de limpieza láser aplicables a superficies metálicas
- Seleccionar el tipo de láser, criterios y parámetros operativos adecuados para la limpieza laser

6.3 Diseñar un sistema automatizado que integre tecnología láser y componentes de control para la limpieza de tuberías conduit, considerando criterios de eficiencia energética y precisión operativa.

- Diseñar la estrategia de control adecuada para el sistema (Selección de Hardware. arquitectura del sistema y flujo de procesos)
- Diseño de la lógica de control (Elaboración de la secuencia de control, diagramas eléctricos y de instrumentación)
- Programación del controlador/es e integración de comunicación entre el láser y el sistema de control.

6.4 Evaluar los beneficios operativos del sistema propuesto en comparación con el método químico tradicional, mediante pruebas simuladas en entornos controlados.

- Realizar simulaciones y/o pruebas experimentales controladas para comparar el desempeño del sistema.
- Evaluar la eficiencia de remoción, tiempo de operación, consumo energético, impacto ambiental, nivel de riesgo para el operario.
- Validación técnica del sistema propuesto como alternativa viable.

6.5 Realizar la documentación y socialización del proyecto.

- Presentación, finalización y radicación del documento.
- Sustentación y socialización del proyecto.

7. CRONOGRAMA

En esta sección se presenta el cronograma concorde a las actividades propuestas en la metodología. Ver figura 41.

Objetivos Específicos	Actividades	Cronograma de actividades (Agosto - Noviembre 2025)															
		ago-25				sep-25				oct-25				nov-25			
		S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Diagnóstico del proceso actual	Recolectar información sobre el proceso de limpieza química																
	Identificación de limitaciones del método actual																
Investigación sobre limpieza láser	Recolectar información bibliográfica sobre tecnologías de limpieza láser																
	Seleccionar el tipo de láser, criterios y parámetros operativos para la limpieza																
Diseño del sistema automatizado	Diseñar la estrategia de control adecuada para el sistema																
	Diseño de la lógica de control																
	Programación del controlador/es e integración de comunicación entre el láser y el sistema de control.																
Evaluación comparativa y validación	Realizar simulaciones y/o pruebas experimentales controladas para comparar el desempeño del sistema																
	Evaluar la eficiencia de remoción, tiempo de operación, consumo energético, impacto ambiental, nivel de riesgo para el operario																
	Validación técnica del sistema propuesto como alternativa viable																
Presentación y socialización	Presentación, finalización y radicación del documento																
	Sustentación y socialización del proyecto																

Figura 41. Cronograma del proyecto - Elaboración propia.

El cronograma se estipula a 16 semanas para su desarrollo y posterior socialización.

8. ALCANCE Y LIMITACIONES

8.1 Alcance

Se desarrollará una investigación técnica y documental sobre la aplicación de limpieza láser en superficies metálicas, considerando principios físicos, tipos de láser aplicables y parámetros de operación.

Se realizará el diseño de control y técnico del sistema automatizado de limpieza con tecnología láser que incluya:

- La selección preliminar de tipo de láser y componentes ópticos
- El diseño para la integración con un sistema automatizado de posicionamiento o escaneo
- El diseño asistido por computadora del sistema
- La propuesta de arquitectura de control automatizado y una simulación de los sistemas propuestos.

8.2 Limitaciones

El proyecto no contempla la fabricación ni ensamblaje de un prototipo físico completo del sistema diseñado, debido a restricciones de tiempo, presupuesto y disponibilidad de equipos, se realizará simulación.

Las pruebas experimentales (si se realizan) estarán limitadas a ensayos preliminares de caracterización de parámetros en condiciones controladas, y no incluirán pruebas en planta ni operación a escala real.

El análisis económico del sistema propuesto será de tipo referencial o estimado, basado en costos de componentes y referencias técnicas, sin incluir cotizaciones exactas o análisis financiero detallado.

9. DESARROLLO DEL PROYECTO

9.1 Analizar los procesos actuales de limpieza química de tuberías conduit, identificando sus limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad laboral.

9.1.1 Recolectar información sobre el proceso de limpieza química utilizado en la industria

Para el desarrollo de este proyecto de grado es necesario describir los diferentes procesos industriales que son usados para realizar la eliminación de partículas de oxido que son generados en la elaboración, manufactura y producción de tubería metálica, por lo tanto, se describirá el proceso de decapado convencional con mayor profundidad.

9.1.1.1 Decapado (Steel pickling)

El decapado es un proceso de acabado superficial en el cual se eliminan el óxido y las incrustaciones de la superficie de tuberías, alambres y otros tipos de acero mediante disolución en ácido. Generalmente, se utiliza una solución de cloruro de hidrógeno (HCl) o ácido sulfúrico para tratar productos de acero al carbono, mientras que para el acero inoxidable se suele utilizar una combinación de ácidos fluorhídrico y nítrico.[46]

Este proceso es usado ampliamente en la industria siderúrgica y de conformado de productos de hierro, es necesario mencionar que el instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI) estimó los envíos estadounidenses de productos de acería en 1991 en 78,8 millones de toneladas. Aunque no se dispone de estadísticas sobre el porcentaje total de productos de acería procesados mediante operaciones de decapado, podemos inferir de los datos anteriores que aproximadamente el 55 % de todos los productos de acería en 1991 fueron decapados.[46]

Por lo tanto, podemos inferir que también en nuestra industria nacional es un proceso totalmente conocido y usado el cual no ha tenido ningún cambio y/o mejora desde hace más de 30 años.

Es necesario mencionar las etapas generales de fabricación del acero entre ellos tenemos; coquización, sinterización, elaboración de hierro, elaboración de acero y laminación y acabado fino, para conocer en cual etapa se lleva a cabo el decapado. Ver tabla 5.

Tabla 5. Etapas generales de la fabricación del acero. [47]

Etapa de elaboración del acero	Descripción
Coquización	proceso de calentar carbón en ausencia de aire (oxígeno) a una temperatura superior a los 600 °C para eliminar los componentes volátiles del carbón mineral y producir un material duro, sólido y poroso, con un elevado contenido en carbono, llamado coque.[48]
Sinterización	La sinterización es el proceso que aglomera partículas finas de mineral en una masa porosa para su entrada al alto horno. Este proceso se desarrolló para hacer uso de las finas de coque, finas de mineral de hierro y polvo de humos recuperado del alto horno.[46]
Elaboración de hierro	Se produce hierro fundido reduciendo mineral de hierro en el alto horno. En este proceso, el hierro elemental se separa por reducción del oxígeno con el que está combinado en el mineral de hierro. Así, el hierro en forma fundida se separa de la parte no metálica del mineral y de impurezas como azufre y manganeso.[46]
Elaboración de acero	A partir de hierro fundido o chatarra, o ambos, implica remover cantidades relativamente pequeñas de impurezas del insumo metálico mediante oxidación. El hierro fundido está saturado de carbono y contiene cantidades indeseables de silicio, manganeso, fósforo y azufre, todos los cuales deben removerse en la operación de elaboración de acero.[46], se utilizan los denominados altos hornos para esta operación sean eléctricos o de combustión.
Laminación y acabado	Es la etapa final del proceso del acero que implica la deformación plástica del material para modificar sus propiedades mecánicas y su geometría. Durante este proceso, el acero caliente elevadas, se hace pasar a través de una serie de rodillos que ejercen fuerzas compresivas. Estos rodillos están diseñados específicamente para reducir el espesor del material y, al mismo tiempo, alargarlo, lo que resulta en láminas o placas de acero con dimensiones y grosor uniformes. Además, el proceso de laminado puede ser ‘en caliente’ o ‘en frío’, dependiendo de la temperatura a la que se realice. El laminado en caliente es efectivo para transformar grandes secciones de acero, mientras que el laminado en frío se utiliza para obtener acabados más finos y tolerancias más estrechas. [47]

Durante la laminación en caliente o el tratamiento térmico del acero, el oxígeno de la atmósfera reacciona con el hierro en la superficie del acero para formar una costra compuesta por una mezcla de óxidos de hierro, los cuales interfieren en la calidad de los postprocesos que se llevaran a cabo a estos elementos metálicos (zincados, cromados, galvanizados, etc.)

Existen numerosos métodos para remover óxidos de hierro de superficies metálicas. Estos métodos incluyen chorreado abrasivo, tamborileo, cepillado, decapado con ácido, descalcificación en baño de sal, descalcificación alcalina y limpieza con ácido. El método preferido en la producción de acero es el decapado de acero, debido a su rapidez, eficiencia y costo; algunas de sus otras ventajas son:

- Prolonga la vida útil de la matriz, elimina irregularidades y promueve la suavidad superficial del producto terminado.
- Permite la aleación o adherencia adecuada de los recubrimientos metálicos, así como una adherencia satisfactoria cuando se utiliza un recubrimiento o pintura no metálica.
- Previene la falta de uniformidad y elimina irregularidades superficiales durante la reducción en frío de chapas y flejes de acero.[46]

9.1.1.2 Uso de ácidos en el decapado

En el proceso de limpieza químico de tubería mediante el uso de ácidos para lograr la eliminación de óxidos es necesario mencionar 2 sustancias que se usan comúnmente para este fin como lo son; el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico.

9.1.1.3 Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico es un líquido denso, incoloro y corrosivo. Se produce mediante la disolución del ácido sulfúrico concentrado al 98% en plantas especiales.

Este ácido se utiliza en diferentes aplicaciones en la industria, como electrolito para baterías, desincrustante de metales, desatascador de cañerías y modificador del pH del agua, entre otros. Además, se emplea en la fabricación de fertilizantes, tratamiento de metales, preparación de abonos líquidos y limpieza industrial.[49]

Dentro de este proceso de limpieza suceden algunas reacciones químicas que deben tenerse en cuenta ya que el uso de ácidos genera gases y subproductos. Un ejemplo en específico podría ser el uso de ácido sulfúrico H2SO4 que, al reaccionar con el óxido de hierro o magnetita, tiene la siguiente reacción:

$$Fe2o3 + H2SO4 \rightarrow FE2(SO4)3 + H20$$

Ecuación 7. Reacción hierro y ácido sulfúrico

9.1.1.4 Ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico 20% (HCl), también llamado salfumán o cloruro de hidrógeno, es un ácido fuerte y corrosivo de coloración amarilla lo cual significa que contiene altas cantidades de hierro o materia orgánica. Entre sus aplicaciones podemos encontrar; desincrustante general, el decapado y limpieza de piezas metálicas, desincrustante de cemento y cal, en la construcción y/o potabilización de aguas en regeneración de resinas.

Su desventaja principal con respecto al ácido sulfúrico es su alta volatilidad ya que al reaccionar con el óxido de hierro se genera sal ferrosa e hidrogeno, algunas de las reacciones generadas son:

$$Fe2O3 + Fe + 6HCl \rightarrow 3\,FeCl2 + 3H2O$$

Ecuación 8. Reacción óxido de hierro III y ácido clorhídrico

$$\mathrm{FeO} + 2\mathrm{HCl} \rightarrow \mathrm{FeCl2} + \mathrm{H2O}$$

Ecuación 9. Reacción óxido de hierro I y ácido clorhídrico

$$Fe + 2HCl \rightarrow FeCl2 + H2$$

Ecuación 10.Reacción hierro y cloruro de hierro, formación de sales.

Al realizar la limpieza química por decapado es recomendable usar inhibidores entre ellos podemos encontrar que el uso de uso de formaldehído y la urotropina[10], son opciones para considerar como inhibidores ya que su acción en este proceso permite acelerar el proceso de limpieza, disminuir la cantidad de ácido y de emisiones presentes en esta reacción y por último evitar la pérdida de peso del material atacado por uso de este proceso.

También es necesario mencionar que en el mercado podemos encontrar otro tipo de ácidos como el ácido fosfórico y nítrico para esta aplicación con la diferencia que son usados para el decapado en aceros inoxidables.

Estas reacciones son volátiles ya que se genera hidrogeno y puede sugerir que el material base se encuentra afectado y tiene óxidos en su superficie. Entre los problemas más comunes por su uso podemos encontrar que para la salud humada; su aspiración por un tiempo prolongado puede producir irritación en los ojos y en las vías respiratorias [13], también se debe tener en cuenta que si la limpieza es de otro tipo de material se pueden generar otro tipo de gases aún más peligrosos.

9.1.1.5 Proceso de decapado de los aceros (Baño acido)

En el proceso de decapado por baño acido, el acero se sumerge en una solución ácida durante 10 a 30 minutos hasta que se elimina la cascarilla o la película de

óxido, se retira del baño, se deja escurrir y luego se enjuaga mediante inmersión posterior en uno o más tanques de enjuague.

Los tubos o láminas planas se pueden decapar por lotes, pero las láminas deben mantenerse verticales y separadas físicamente para mejorar el contacto con el ácido. Generalmente, la solución ácida se mantiene a temperatura ambiente para la limpieza o el grabado de la superficie y a una temperatura elevada para la eliminación del óxido.

Las concentraciones típicas de HCl en el proceso de decapado por lotes varían entre el 12 % al inicio de un nuevo lote y el 4 % antes de la sustitución del ácido. Se prepara un nuevo lote de solución ácida; Luego, se realiza el decapado hasta que la concentración de hierro de la solución ácida alcance la concentración máxima permitida (aproximadamente el 13 % en peso) o hasta que el HCl libre sea insuficiente para una correcta eliminación de las incrustaciones.

Cuando la solución ácida deja de ser efectiva, el ácido usado se drena o se bombea a tanques de almacenamiento y se prepara un nuevo lote de solución ácida. Para la limpieza o el grabado de superficies, el tiempo de inmersión varía de 5 a 15 minutos con el baño ácido a temperatura ambiente. Para la eliminación de óxido o incrustaciones, el tiempo de inmersión puede variar de 10 a 30 minutos y el baño ácido puede calentarse a 48 °C. El calentamiento se realiza mediante burbujeo de vapor vivo o intercambio de calor interno. En la siguiente figura se describirá el proceso de limpieza por acido, ver figura 1.[12]

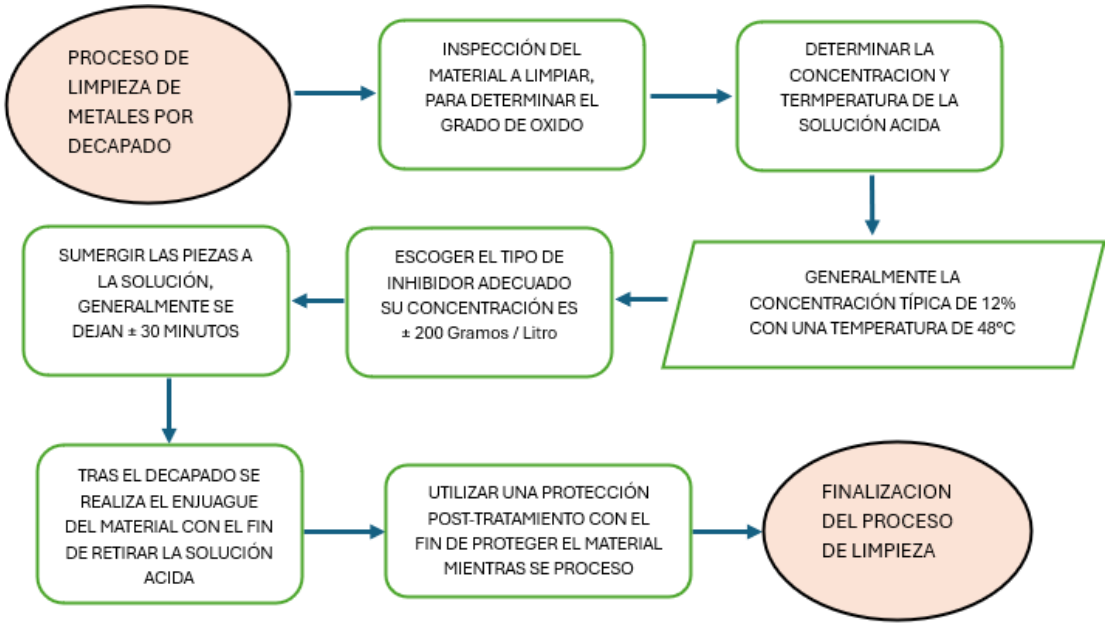


Figura 42.Proceso de limpieza química de ácidos. Elaboración propia

9.1.2 Identificar limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad del método actual.

Es importante tener a consideración tanto las ventajas y las limitaciones que se generan a partir del desarrollo de este método de limpieza con el fin de tener un paralelo con respecto al sistema de diseño propuesta, por lo tanto, se abordaran las limitaciones técnicas, ambientales y de seguridad.

9.1.2.1 Limitaciones técnicas.

El proceso de decapado en superficies metálicas “pickling”, tiene ciertas limitantes que afectan el proceso y la calidad de este, siendo un proceso de producción generan una disminución en la tasa de limpieza y el deterioro excesivo en los componentes del sistema.

9.1.2.2 Control químico.

Durante el proceso de limpieza química y al usar HCl como agente activo de limpieza es necesario tener un control optimo del proceso para obtener una tasa de limpieza optima, si esto no ocurre debido a la volatilidad del HCl, su eficiencia podría estar entre el 70-80%[46]. Entre las variables que se deben tener controlar son:

- Control de temperatura del proceso constante (20°C hasta 60°C)
- Concentración optima del ácido (entre el 5-18% de concentración)
- Tiempo de inmersión del material (± 30 min aproximadamente)

Es necesario realizar un control optimo de estas variables, las cuales, si no son controladas adecuadamente, la superficie a limpiar podría generar la perdida de espesor en el material base y/o residuos de oxido debido a falta de concentración o tiempo de inmersión.

9.1.2.3 Control de infraestructura.

Al realizar este proceso de limpieza en el cual se utilizan ácidos se debe realizar un mantenimiento y revisión continua de los elementos implicados en el proceso como lo son los tanques, tubería, bombas, contenedores y demás accesorios que entren en contacto con los líquidos empleados, ya que sufrirán de un desgaste prematuro elevando sus costos. [50]. Ver Figura 43.

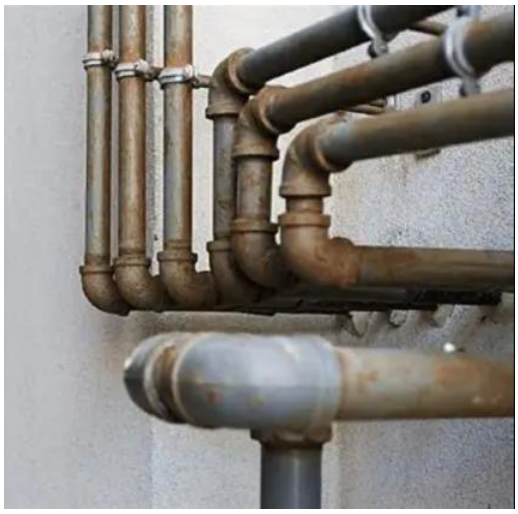


Figura 43. Corrosión en tuberías presente en infraestructura[51]

9.1.2.4 Limitaciones ambientales.

Durante el desarrollo de este proceso de limpieza química se debe tener en cuenta que se generan distintos tipos de residuos como lo son gases, vapores, sólidos y vertimientos que causan contaminación a las fuentes hídricas, acidificación en suelos, y contaminación atmosférica. Estos residuos se necesitan controlar y a su vez son limitantes. En la siguiente tabla se realizará la descripción de cada uno de estos residuos, la cusa principal y la consecuencia de su no adecuado tratamiento. Ver tabla 6.

Tabla 6. Limitaciones ambientales. Elaboración propia.

Categoría ambiental	Descripción técnica de la limitante	Causa principal	Consecuencia
Emisiones gaseosas	Generación de gases y vapores pesados en el medio ambiente como lo son; Gases nitrosos, Amoniaco y productos aromáticos	Alta volatilidad, reacciones exotérmicas, y fugas en equipos. Condensación de vapores ácidos sobre estructuras metálicas y tuberías.	Riesgo de acidificación atmosférica, corrosión ambiental y sanciones por incumplimiento de normativas ambientales.
Aguas residuales corrosivas	Generación de sales metálicas mezcladas con el líquido usado para realizar la limpieza del acero limpiado.	Disolución de óxidos metálicos y arrastre de ácido no neutralizado.	Contaminación de suelos y aguas si no se neutralizan o regeneran adecuadamente.

Gestión de residuos sólidos	Lodos y metales pesados generados durante el desarrollo del proceso de limpieza, como lo son: Plomo, cloro, manganeso neutralización y flujos de regeneración con alta carga férrica.[52]	Precipitación de impurezas metálicas y sedimentos.	Disposición final costosa y potencial lixiviación de metales en vertederos.
Consumo energético excesivo	Durante el desarrollo de este proceso, entre ellos el de pirohidrolisis y evaporación demandan alta energía para recuperar HCl.	Temperaturas de operación entre 400–900 °C.	Alta huella de carbono y costo energético elevado, contradiciendo estrategias de economía circular.

9.1.2.5 Limitaciones de seguridad.

Las limitaciones más críticas que pueden afectar al personal durante el desarrollo de la actividad son; exposición a vapores y/o quemaduras con ácidos, derrames o fugas accidentales. En la siguiente tabla se encontrarán los riesgos asociados a la manipulación e interacción de este proceso. Ver tabla 7.

Tabla 7. Limitaciones de seguridad en limpieza con ácido - Elaboración propia.

Riesgos	Acto de incidencia	Causa técnica u operacional	Efecto sobre el operador	Medida de control
Exposición a vapores ácidos	Alta volatilidad del HCl durante el llenado, agitación o fugas en el sistema.	Temperatura elevada, ventilación deficiente o fallas en torres de lavado.	Irritación respiratoria severa, quemaduras pulmonares, pérdida de conciencia.	Sistemas cerrados, extracción localizada y monitoreo continuo de Cl_2/HCl en aire (<6 ppmv).
Contacto dérmico con ácido	Manipulación directa en tareas de carga o mantenimiento de tanques.	Uso inadecuado de EPP o salpicaduras por presión.	Quemaduras químicas graves, lesiones oculares, necrosis localizada.	EPP completo: guantes de neopreno, careta facial, delantal PVC, calzado anticorrosivo.

Fugas o derrames accidentales	Fallo de válvulas, corrosión de tuberías o rotura de mangueras.	Desgaste de materiales no resistentes al HCl.	Riesgo de salpicaduras, intoxicación o caída por superficies resbaladizas.	Mantenimiento preventivo, inspección visual diaria y piso con recubrimiento antideslizante.
Ambientes confinados o cerrados	Acumulación de gases densos (HCl y Cl_2) en zonas bajas.	Deficiente renovación de aire o falta de ventilación cruzada.	Asfixia, mareos o pérdida de conciencia por inhalación concentrada.	Monitoreo atmosférico permanente y ventilación mecánica con detección automática.
Falta de capacitación y protocolos	Operarios no entrenados en neutralización o emergencia.	Ausencia de procedimientos documentados.	Respuesta ineficiente ante fugas, exposición o incendios.	Entrenamiento anual, simulacros de emergencia y señalización obligatoria.

9.2 Investigar los principios físicos y parámetros técnicos de la limpieza láser aplicables a superficies metálicas, con el fin de determinar su viabilidad en la remoción de óxidos y contaminantes sin afectar el material base.

9.2.1 Recolectar información bibliográfica y análisis técnico sobre tecnologías de limpieza láser aplicables a superficies metálicas.

Para el desarrollo de esta actividad es necesario conocer el principio físico que involucra el funcionamiento de la tecnología láser para este proceso, a su vez los mecanismos de interacción que ocurren al momento de hacer la limpieza laser sobre superficies metálicas.

9.2.1.1 Principio físico

La limpieza con láser es una tecnología avanzada de limpieza de superficies que puede llevar a la evaporación instantánea y despojo de los residuos encontrados en la superficie de un sustrato, como contaminantes, óxido y recubrimientos, el cual utiliza un rayo láser de alta energía para irradiar la superficie de los componentes. En comparación con las tecnologías comunes de limpieza de superficies como lo son la limpieza mecánica, química o por ultrasonido, la limpieza con láser tiene las ventajas de precisión, eficiencia y controlabilidad.[53]

Los mecanismos físicos que ocurren en el momento de realizar la limpieza laser son; ablación, estrés térmico y onda de choque. Estos mecanismos se diferencian

entre sí por la profundidad de penetración térmica y las longitudes de onda que se desarrollen en la parametrización del objeto a limpiar.

9.2.1.2 Mecanismo de ablación laser

Sucede cuando un rayo láser pulsado irradia directamente las uniones en las superficies del material base, la temperatura de las uniones y del material del sustrato aumenta rápidamente. Cuando la temperatura supera el umbral de gasificación, las uniones se vaporizarán; esto va acompañado de los fenómenos de combustión, descomposición, ablación, exfoliación, etc.

Cuando la superficie del sustrato se expone a luz láser ultravioleta de alta energía, puede llevar a la aparición de efectos fotoquímicos. El efecto fotoquímico ocurre solo cuando la energía del fotón es mayor que la energía de enlace molecular.

En este momento, los enlaces moleculares se rompen de las uniones, y el material se transforma en un estado suelto, lo que ayuda a promover la evaporación de la capa sucia. Ver Figura 3.

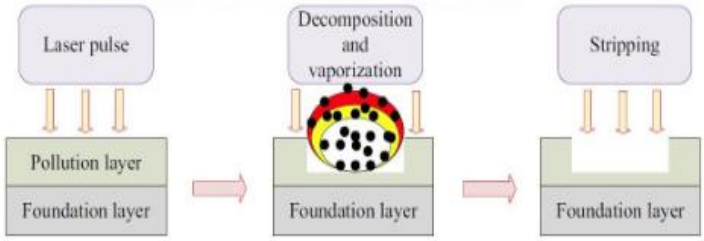


Figura 44. Esquema del mecanismo de ablación térmica por láser [53]

Es necesario describir la siguiente formula que relaciona la tasa de absorción del láser. Ver ecuación 11.

$$\Delta T = \frac{P}{\pi \omega 0 K}$$

Ecuación 11. Tasa de absorción térmica.[53]

El aumento de temperatura es ΔT, P es la tasa de absorción del láser, ω_0 es el radio del punto del rayo láser, y K es la conductividad térmica. El desprendimiento del material se da cuando el umbral de ablación es mayor que el umbral de unión del oxido en este caso, pero por debajo del umbral del sustrato con el fin de que no altere el material base, debido a la alta concentración de energía. Un ejemplo de esto podemos evidenciarlo en la Figura 45. Ver figura 45.

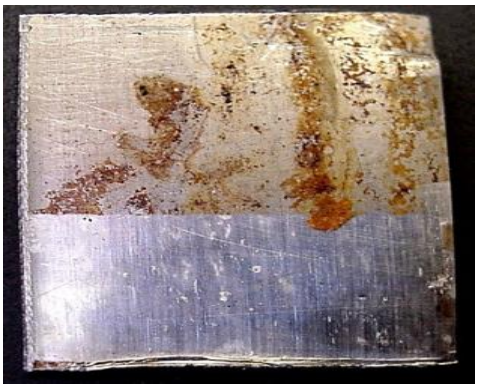


Figura 45. Probeta de ensayo - proceso de ablación térmica. [53]

9.2.1.3 Mecanismo de Estrés Térmico por Láser

El mecanismo de estrés térmico por láser utiliza el efecto de estrés inducido por el haz de láser en lugar del efecto térmico del láser. Cuando el haz de láser pulsado irradia directamente la superficie del sustrato, el material de la unión y el sustrato absorben la energía del pulso láser, causando un aumento de temperatura.

Debido a que la duración del pulso láser es muy corta, el proceso de calentamiento y enfriamiento de los materiales se completa en un tiempo muy corto, resultando en una rápida expansión térmica generando un efecto de explosión que genera la eliminación de los contaminantes de la superficie del sustrato.[53]. Ver figura 46.

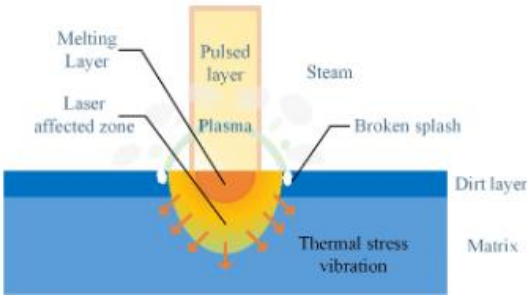


Figura 46.Esquema del mecanismo de estrés térmico por láser. [53]

9.2.1.4 Mecanismo de Estrés Térmico por Láser

El mecanismo de onda de choque de plasma sucede cuando el láser pulsado pasa a través de la lente de enfoque se enfoca paralelamente al material base creando un ambiente ionizado usando un gas inerte. Cabe señalar que el haz de láser no entra en contacto directo con el material a limpiar. Cuando la densidad de energía del láser es mayor que el umbral de ruptura del aire ambiente, el aire se descompone, y el fenómeno de ionización se produce al mismo tiempo, lo que lleva a la introducción de las ondas de choque de plasma.

El desprendimiento del material se lleva a cabo cuando el efecto de estrés inducido por las ondas de choque de plasma supera la fuerza de van der Waals. Como

resultado, las partículas adjuntas pueden ser eliminadas de la superficie del sustrato. [53]. Ver figura 47.

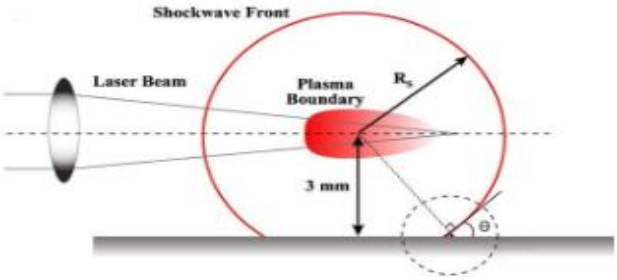


Figura 47.Esquema del mecanismo de onda de choque. [53]

9.2.2 Seleccionar el tipo de láser, criterios y parámetros operativos adecuados para la limpieza laser.

9.2.2.1 Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz Reci

Para este proyecto se utilizará el láser de fibra óptica con las siguientes características “Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz con fuente RECI”, Ver Figura 48. El mecanismo en el cual trabaja esta máquina es por ablación laser, donde se hará incidir el láser en la superficie a limpiar con el fin de que remueva el material no deseado.



Figura 48. Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz[54]

9.2.2.2 Componentes de la máquina laser

Estas máquinas en general cuentan con los siguientes componentes, ver Figura 49:

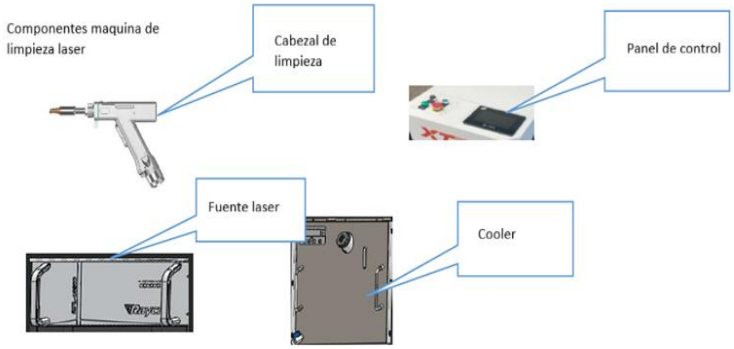


Figura 49. Componentes esenciales de equipo laser - Elaboración propia.

Entre sus componentes más importantes tenemos:

- Cabezal de limpieza: Es la “pistola” y la parte operativa la cual el operador sostiene y dirige al objeto que se va a limpiar. Allí sale el haz láser y también suele venir integrada la óptica de enfoque, protección y colimación, la boquilla de salida y mecanismos para protección o soplado de aire/gas. Ver figura 50.

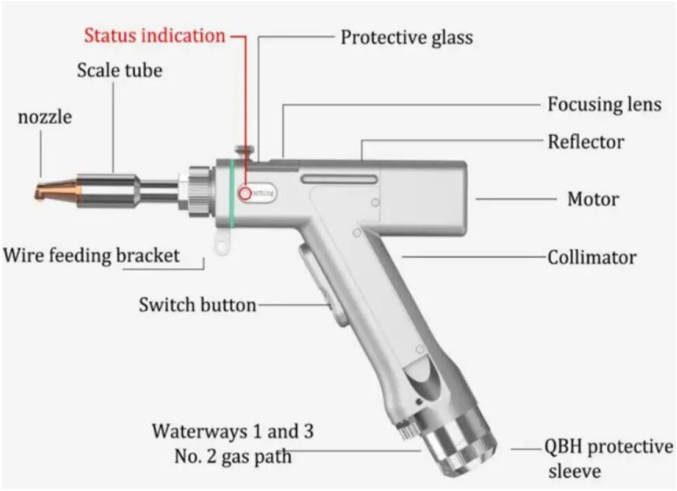


Figura 50. Cabezal de limpieza convencional sup23t [55]

- Panel de control: Es la interfaz a través de la cual el operador ajusta parámetros de la limpieza: potencia, velocidad de escaneo, ancho de escaneo, patrón de barrido, modo (continuo vs pulsado) y en general monitorea el estado del equipo (temperatura, alertas, etc.). Ver Figura 51.

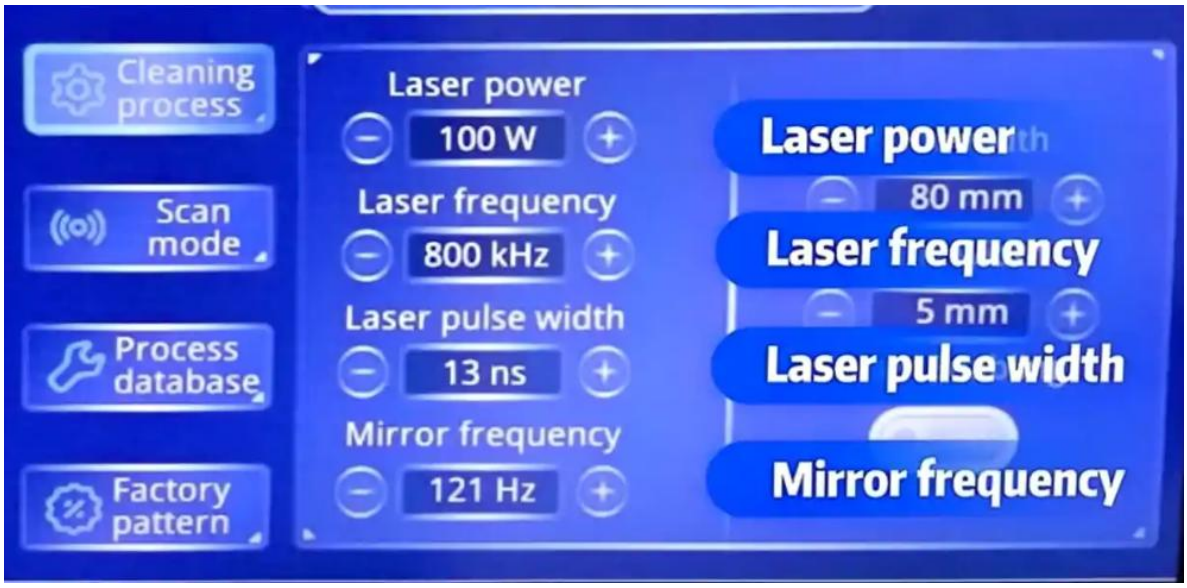


Figura 51. Panel de control equipo de limpieza laser [55]

- Fuente laser: Es un dispositivo el cual genera el haz laser de luz coherente, monocromático y colimado, el cual funciona excitando átomos o moléculas para que emitan luz de manera organizada. Entre sus parámetros técnicos principales, podemos encontrar; Potencia, Longitud de onda 1064-1080 nm y sus dimensiones. Ver figura 52.



Figura 52. Fuente laser Reci-2000W [55]

- Cooler: Mantiene la fuente láser y otras partes críticas a una temperatura adecuada para permitir funcionamiento continuo sin sobrecalentamiento. Puede ser enfriamiento por agua (chiller) o híbrido agua/aire, dependiendo del modelo. Ver figura 53.



Figura 53. Sistema de enfriamiento para sistemas laser [55]

9.2.2.3 Parámetros de control esenciales para el manejo del proceso de limpieza laser.

Para el adecuado funcionamiento del proceso de limpieza laser con la maquina Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz, es necesario parametrizar algunos valores como lo son; la velocidad de escaneo, ancho de escaneo, potencia y frecuencia, los cuales se explicarán a continuación, Ver tabla 8.

Tabla 8. Parámetros técnicos de limpieza laser [14]

Parámetro	Rango / Valor recomendado	Descripción
Potencia del láser (Laser Power)	Potencia nominal del equipo rango entre (500w-1500w)	Controla la energía emitida. Cuanto mayor la potencia, mayor la tasa de ablación. Se recomienda mantenerla entre **60–80 %** para limpieza estándar.
Frecuencia de escaneo (Scanning Frequency)	10 – 100 Hz	Número de veces que el haz barre una superficie por segundo. Frecuencias bajas producen limpieza más profunda; altas, más uniforme y suave.
Ancho de escaneo (Scanning Width)	0 – 30 mm (hasta 130 mm con lente F800)	Determina el ancho del área cubierta por el láser. Un valor pequeño concentra energía; uno mayor limpia superficies amplias con menos intensidad.

Parámetro	Rango / Valor recomendado	Descripción
Frecuencia de pulso (Pulse Frequency)	5 – 5000 Hz (por defecto 2000 Hz)	Cantidad de pulsos por segundo. Afecta el acabado: frecuencias bajas = mayor remoción; altas = acabado más fino.
Ciclo de trabajo (Duty Cycle)	0 – 100 % (por defecto 100 %)	Porcentaje del tiempo activo dentro del ciclo de pulso. Menor ciclo reduce el calor; útil para materiales sensibles.
Retraso de gas (Gas Delay)	200 – 3000 ms (ideal 200–500 ms)	Tiempo de pre y post flujo de gas protector. Protege la lente y evita oxidación.
Temperatura máx. de alarma	65 °C (recomendado)	El sistema se detiene si la óptica o el cabezal exceden este umbral, evitando daños.
Coeficiente de corrección de escaneo	0.01 – 4 (= ancho objetivo / ancho medido)	Ajusta la precisión del barrido según el lente o cabezal instalado.
Desplazamiento del centro del láser	−3 a +3 mm (en modo limpieza solo lectura)	Permite corregir el eje óptico y centrar el haz.

9.3 Diseño de un Sistema Automatizado que Integre Tecnología Láser y Componentes de Control para la Limpieza de Tuberías Conduit: Considerando Criterios de Eficiencia Energética y Precisión Operativa

En este objetivo del proyecto se busca conocer los componentes, secuencias y diagramas de proceso del sistema de limpieza con el fin de que este sistema no solamente limpie las superficies de la tubería, si no que su operación sea eficiente y confiable.

9.3.1 Diseñar la estrategia de control adecuada para el sistema (Selección de Hardware. arquitectura del sistema y flujo de procesos).

9.3.1.1 Método de solución propuesto para el sistema de automatización.

Con el fin de desarrollar este proyecto se planteó, la integración de los siguientes componentes; máquina de limpieza laser (Equipo laser Riland de 2000W 220V/60HZ RECI), el conjunto motriz (actuador lineal de tornillo), el sistema de visión (Raspberry 3B + cámara Rev 1.3), PLC (Yaskawa MP2600) con su respectivo servomotor (SGM7J de 11.5kw), el siguiente apartado describirá la selección de cada componente.

9.3.1.2 Selección de componentes:

Para escoger los componentes críticos de este sistema se usará el método de selección mediante “rechazo”, el cual se basa en escoger algún material o componente, evaluándolo mediante criterios y ponderaciones que justifiquen su

aceptación. La metodología para la selección se realizará de acuerdo al diagrama presentado en la Figura 54. Ver figura 54.



Figura 54. Método de selección mediante rechazo - Elaboración propia.

9.3.1.3 Selección de máquina laser.

Para la selección de la máquina laser, se consideraron las siguientes especificaciones para desarrollar el proceso de limpieza.

- Tipo de láser: Fibra óptica, modo continuo.
- Potencia de salida nominal: 1500–2000 W, adecuada para soldadura y también para funciones de corte/limpieza superficial.
- Longitud de onda: ~1070 nm (típica de los láseres de fibra para metales).
- Modo de trabajo: Continuo / modulado, lo que permite ajustar la energía entregada según el tipo de superficie y el nivel de oxidación.
- Método de enfriamiento: Cooler, diseñado para trabajo sostenido.
- Alimentación eléctrica: 220v.
- Disponibilidad: Disponibilidad inmediata.

Se consideraron 2 opciones de máquinas laser, con representación local:

A. Equipo laser Riland 2000w 220v/60hz reci – procedencia china
B. Equipo laser Hanten htcm 500 – Procedencia china.[55]

Tabla 9. Matriz decisión equipo laser - Elaboración propia.

Matriz decisión laser			Tipos de Laser					
			Equipo Riland			Equipo Hanten		
Criterio de diseño	**Peso del criterio**	**Unidades**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**
Tipo de laser	0,1429	Fibra / Co2	Fibra	10	1,429	Fibra	10	1,4286
Potencia de salida	0,1429	W	2000	9	1,286	500	6	0,8571
Longitud onda	0,1429	Nm	1064	9	1,286	1064	9	1,2857
Modo de trabajo	0,1429	Continuo	SI	9	1,286	NO	2	0,2857
Método de enfriamiento	0,1429	Cooler / Aire	SI	8	1,143	Aire	7	1,0000
Alimentación	0,1429	V	220	7	1,000	110/220V	9	1,2857
Disponibilidad	0,1429	Si /No	SI	9	1,286	NO	4	0,5714
				Total	**8,714**		**Total**	**6,7143**

De acuerdo con los resultados de la tabla de decisión, el componente seleccionado fue el Equipo laser de limpieza RILAND 2000W 220V/60HZ REC, es necesario mencionar que los parámetros y/o ajustes de limpieza se realizaran mediante la interfaz HMI, ya que estos dependerán de la experiencia del usuario y se optimizaran bajo la experiencia de este. Esta máquina cuenta con la pantalla HMI, para asignar los parámetros, como potencia, ancho de escaneo, velocidad de escaneo, y frecuencia.

9.3.1.4 Selección de sistema de visión.

Para la selección del sistema de visión que identifique colores, se consideraron las siguientes especificaciones para capturar el color rojizo del oxido.

- Procesamiento de imagen en tiempo real (detección de óxido, color, suciedad).
- Captura de video con cámara digital .
- Comunicación con el PLC MP2600 (Modbus TCP, Ethernet, o señales digitales).
- Capacidad de ejecutar algoritmos en Python/OpenCV.
- Estabilidad operativa en entornos industriales.
- Capacidad de manejar periferia externa (GPIO, sensores, triggers).

Se consideraron 3 opciones para el sistema de visión:

A. Arduino – Modelo UNO R3
B. Raspberry – Modelo 3 B V1.2
C. Esp32-C3 – Modelo Super Mini V1601

Tabla 10. Matriz decisión sistema de visión - Elaboración propia.

Matriz decisión sistema de visión			Sistema de control de visión								
			Raspberry 3 B V1.2			Arduino UNO R3			Esp32-C3		
Criterio diseño	**Peso Criterio**	**Unidades**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**
Procesamiento de imagen	0,1667	Si /No	SI	10	1,667	NO	3	0,5000	SI	7	1,1667
Captura de video	0,1667	Si /No	SI	9	1,500	NO	3	0,5000	SI	6	1,0000
Comunicación Modbus TCP/	0,1667	Si /No	SI	9	1,500	NO	4	0,6667	SI	7	1,1667
Ejecuta Python / OpenCV	0,1667	Si /No	SI	9	1,500	NO	4	0,6667	SI	6	1,0000
Estabilidad operativa	0,1667	Si /No	SI	8	1,333	SI	7	1,1667	SI	6	1,0000
Costo	0,1667	$COP	$ 340.000	4	0,667	$ 80.000	7	1,1667	$ 20.000	9	1,5000
			Total		8,167	**Total**		4,6667	**Total**		6,8333

El análisis realizado sugiere que la Raspberry Pi 3 es la única plataforma capaz de ejecutar un sistema operativo completo, procesar video en tiempo real y utilizar bibliotecas avanzadas de visión. Su interfaz CSI permite la conexión directa con la cámara oficial, asegurando estabilidad, alta tasa de fotogramas y baja latencia, por lo tanto, se eligió la Raspberry como sistema de control de visión. Ver figura 55.



Figura 55. Raspberry 3 modelo B 1.2 [56]

9.3.1.5 Selección PLC.

Para la selección del sistema de control, se consideraron las siguientes especificaciones para la selección del PLC.

- Control preciso de servomotor.
- Facilidad en la programación.
- Integración con variedad de dispositivos, sin requerir módulos adicionales.
- PLC especializado en control de movimiento “Motion”.
- Costo y disponibilidad.
- Capacidad de manejar periferia externa (GPIO, sensores, triggers).

Se consideraron 2 opciones:

A. PLC Yaskawa MP2600
B. PLC Siemens S7-1500

Tabla 11. Matriz decisión PLC- Elaboración propia.

Matriz de decisión PLC			**Sistema de control**					
			Yaskawa MP2600			**Siemens S7-1500**		
Criterio de diseño	**Peso Criterio**	**Unidades**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**	**Magnitud**	**Puntaje**	**Total**
Control de servo	0,1667	Optimo	Optimo	10	1,667	Bueno	8	1,3333
Fácil programación	0,1667	Si / No	SI	9	1,500	500	8	1,3333
Integración	0,1667	Si / No	SI	9	1,500	1064	8	1,3333
Especializado en Motion	0,1667	Si / No	SI	10	1,667	NO	7	1,1667
Costo	0,1667	$USD	$ 2.800	8	1,333	$ 3.200	7	1,1667
Resolución	0,1667	0.152mv	0.152mv	10	1,667	0.152mv	10	1,6667
				Total	9,333		Total	8,0000

Para el sistema de control de movimiento del actuador lineal se evaluaron dos alternativas: el controlador Yaskawa MP2600iec y el PLC Siemens S7-1500 con funciones de control de movimiento “ Motion”. El controlador Yaskawa MP2600iec se encuentra diseñado para aplicaciones de movimiento, integrando de manera nativa las librerías PLCopen para el control de ejes e integración con servomotores Sigma-7 facilita la configuración del actuador lineal del prototipo. Ver Figura 56.



Figura 56. PLC Yaskawa Mp2600iec

9.3.1.6 Actuadores mecánicos

Para desarrollar este proyecto se usaron 3 tipos de actuadores mecánicos:

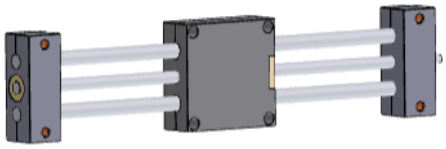


Figura 57. Actuador lineal de tornillo[57]

Este actuador permitirá el acople y desplazamiento del soporte que contiene la antorcha para hacer su desplazamiento lineal de limpieza. Ver figura 57.

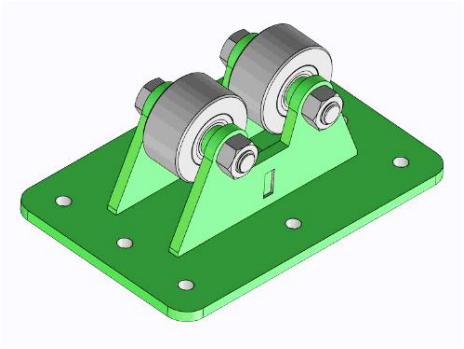


Figura 58. Rotador de tubos de banco

El siguiente dispositivo permite colocar la tubería en el sitio de trabajo y a su vez también el movimiento rotacional del mismo. Ver figura 58.[58]

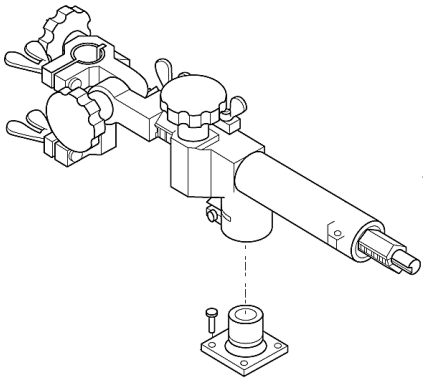


Figura 59. Soporte adaptable antorcha laser[59]

El soporte permitirá sujetar la antorcha laser, además de soportar el desplazamiento longitudinal y angular para darle los grados de inclinación necesarios para el correcto uso del láser.

9.3.1.7 Arquitectura del sistema – Diagrama de bloques

En el siguiente apartado se describirá el funcionamiento del sistema y de cada una de sus partes ya seleccionadas, el cual cuenta con 3 subsistemas principales; el módulo de control de movimiento, el módulo de visión artificial y el módulo de procesamiento del láser. Cada uno de ellos intercambia señales de estado, el cual cuenta con una retroalimentación para en un sistema de lazo cerrado de control. Ver figura 60.

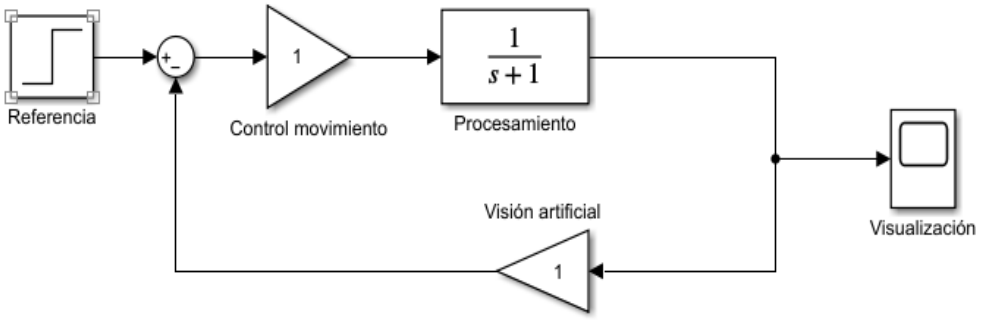


Figura 60. Diagrama de bloques de sistema de limpieza – Elaboración propia

A. Módulo de control de movimiento.

El PLC MP2600 actúa como unidad central de control. Gestiona:

- La secuencia de operación del ciclo automático.
- El control del servomotor mediante rutinas de posicionamiento y retorno.
- La habilitación del láser únicamente bajo condiciones seguras
- La lectura de sensores de fin de carrera y pulsadores.
- La supervisión de alarmas del servo y del láser.
- El PLC recibe y envía señales tanto digitales como de comunicación Ethernet, funcionando como el núcleo lógico y de seguridad del sistema.

B. Módulo de visión artificial Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi 3, equipada con la cámara Rev 1.3, ejecuta algoritmos de visión artificial basados en Python y OpenCV para detectar manchas de óxido o contaminación en la superficie de la tubería.

- Superficie apta → habilitar láser
- Superficie no apta → bloquear láser

Esta comunicación se realiza mediante Ethernet (TCP/Modbus) o mediante E/S digitales, según la configuración seleccionada. La Raspberry no controla actuadores

directamente; su función es estrictamente evaluar la superficie y enviar un criterio de habilitación al PLC.

C. Módulo de procesamiento.

El actuador lineal tipo es accionado mediante un servomotor conectado al servo motor Yaskawa. El controlador recibe:

- Señal de activación desde el PLC.
- Comandos de movimiento programados en el MP2600.
- Retroalimentación del encoder desde el servomotor.

Este conjunto garantiza un movimiento preciso y repetible para posicionar la boquilla del láser durante la limpieza, a su vez en esta fase de procesamiento se activa la máquina laser.

El láser Riland se integra al sistema mediante señales discretas, que son enviadas desde el PLC

- Trigger ON/OFF → comandado por el PLC.
- Laser Ready → entrada al PLC.

La activación del láser depende simultáneamente del estado del servo, de la Raspberry Pi y de las condiciones de seguridad del sistema

Estos dispositivos transmiten señales al PLC para garantizar la operación segura:

- Fin de carrera (home y fin de desplazamiento).
- Parada de emergencia.
- Pulsadores de Start/Stop/Reset.
- Alarmas del láser.

El PLC inhibe el disparo del láser o la operación del servo cuando cualquiera de estas señales indica una condición insegura.

9.3.2 Diseño de la lógica de control (Elaboración de la secuencia de control, diagramas eléctricos y de instrumentación)

9.3.2.1 Secuencia de control.

Lo que se describe a continuación es el método de solución propuesto para el sistema de automatización de limpieza laser. Se planteo un diseño secuencial donde a partir del posicionamiento de la tubería el sistema empieza a ejecutar un número determinado de tareas, de acuerdo con la propuesta desarrollada para el equipo en

específico, todo lo anterior programado en un PLC y una interfaz de visión (Raspberry). La supervisión y modificación de parámetros del láser y velocidad de los motores se da por intermedio de una interfaz hombre-maquina (HMI). Ver figura 61.

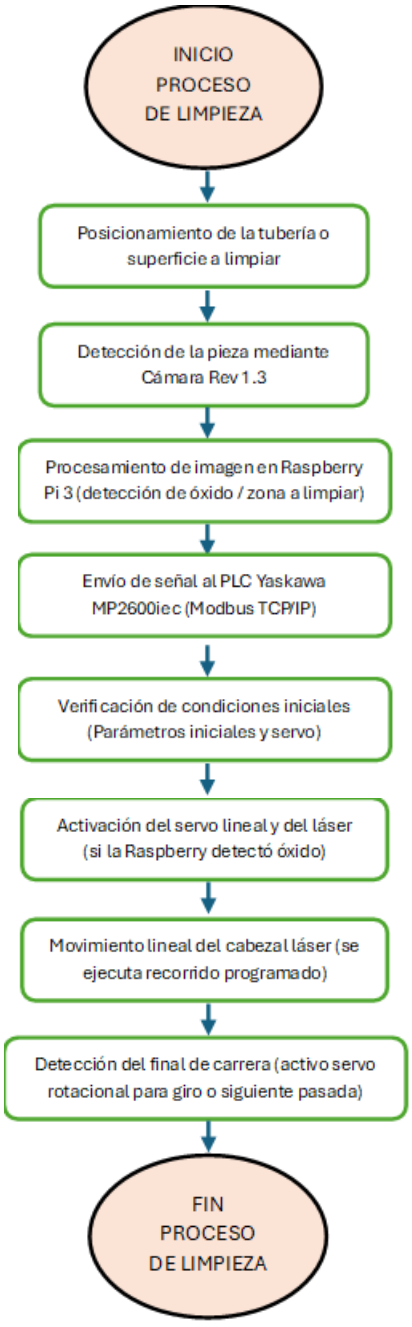


Figura 61. Diagrama de flujo proceso de limpieza.

9.3.2.2 Modos de operación.

El uso de este sistema debe tener con varios modos de funcionamiento, entre ellos tenemos lo siguiente

1. Modo Paro de emergencia / Reset
    - Todos los actuadores apagados.
    - Láser deshabilitado.
    - Servo en paro (sin movimiento).
2. Modo Manual
    - Puede posicionar el cabezal, probar movimientos, SIN activar secuencia automática.
    - El láser solo se puede habilitar en modo prueba, con condiciones extra de seguridad (por ejemplo, baja potencia o solo disparos cortos).
3. Modo Automático
    - El PLC ejecuta la secuencia de limpieza completa de forma automática.
    - Se usa para producción / ensayo formal.

9.3.2.3 Diagrama P&ID

Ver figura 62.

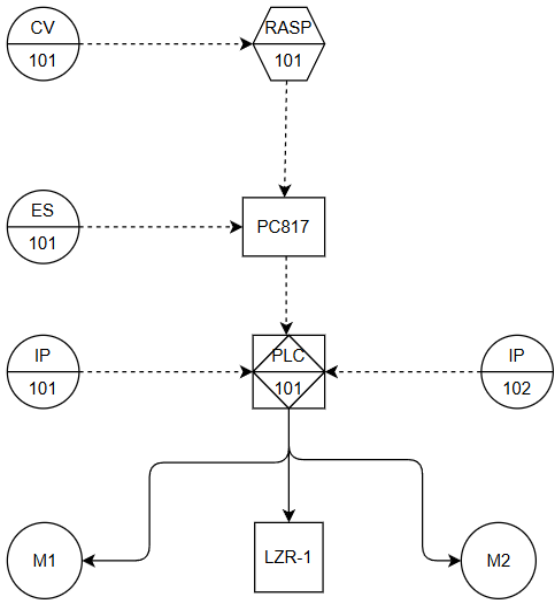


Figura 62. Diagrama P&ID sistema automático de limpieza -Elaboración propia

El anterior diagrama representa el diagrama de instrumentación y control del sistema propuesto. A continuación, se encontrará la tabla 12, en la cual estará la descripción de los elementos propuestos junto con su descripción.

Tabla 12. Lista de tags para el diagrama P&ID

TAG	Componente	Tipo en el P&ID
LZR-1	Máquina láser de limpieza	Equipo principal de proceso
M1	Servomotor Sigma-5 (eje X)	Equipo rotativo / accionamiento
M2	Servomotor Sigma-5 (eje Y)	Equipo rotativo / accionamiento
CV-101	Cámara de visión	Instrumento de medición / inspección
RASP-101	Raspberry Pi 3B	Computador / controlador de proceso
PC-817	Optoacoplador PC817	Módulo de interfaz / aislamiento
PLC-101	PLC Yaskawa MP2600iec	Controlador lógico principal
ES-101	Pulsador de parada de emergencia	Instrumento de seguridad

9.3.2.4 Diagrama eléctrico del sistema.

A continuación, se presentará el diagrama eléctrico diseñado para el sistema de automatización de limpieza laser. Ver figura 63.

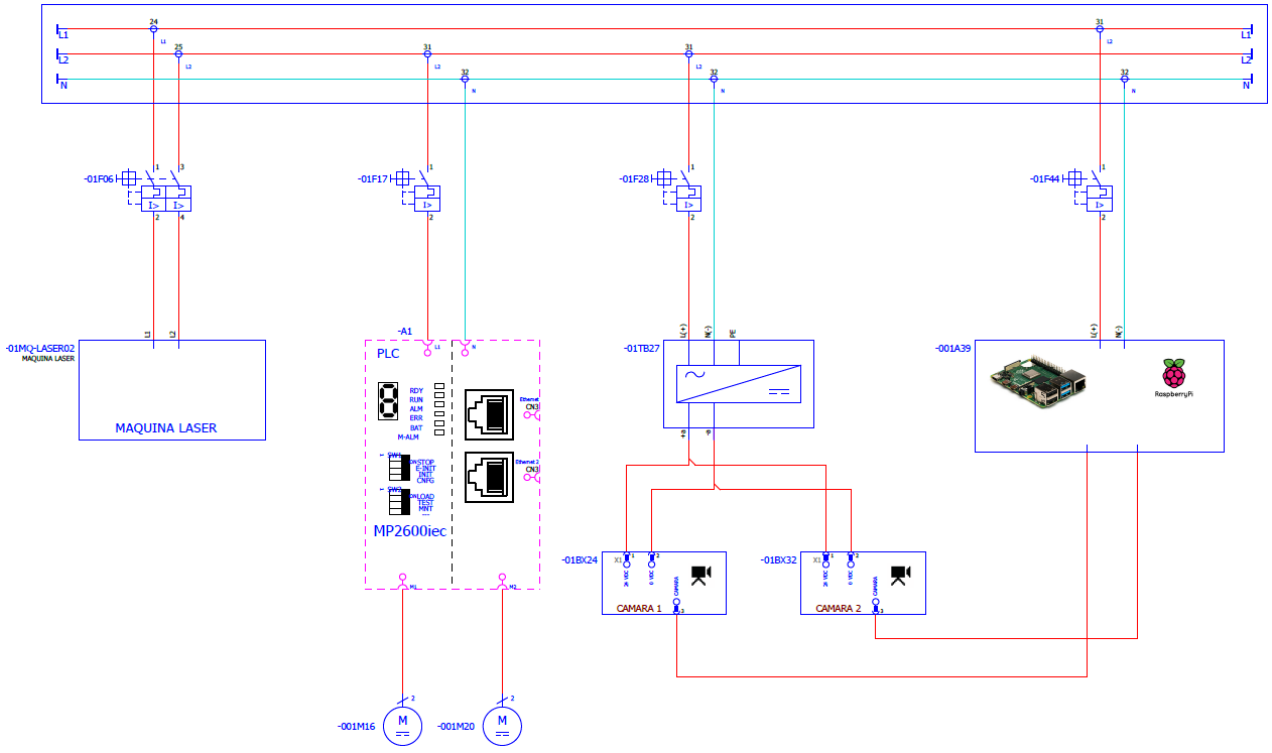


Figura 63. Diagrama eléctrico de control- Elaboración propia.

9.3.3 Programación del controlador/es e integración de comunicación entre el láser y el sistema de control.

A continuación, se presentará la secuencia de control de los programas MotionWorks, usado para programar el PIC Mp2600iec de Yaskawa, y Python para programar las Raspberry 3B 1.2.

9.3.3.1 Programación PLC Mp2600iec

Para realizar la programación del PLC Mp2600iec del sistema automatizado de limpieza laser, se usó el programa MotionWorks IEC 2 Pro 2.2.0.18, el cual permite programar, generar y transferir la secuencia de control al PLC. Ver Figura 64.

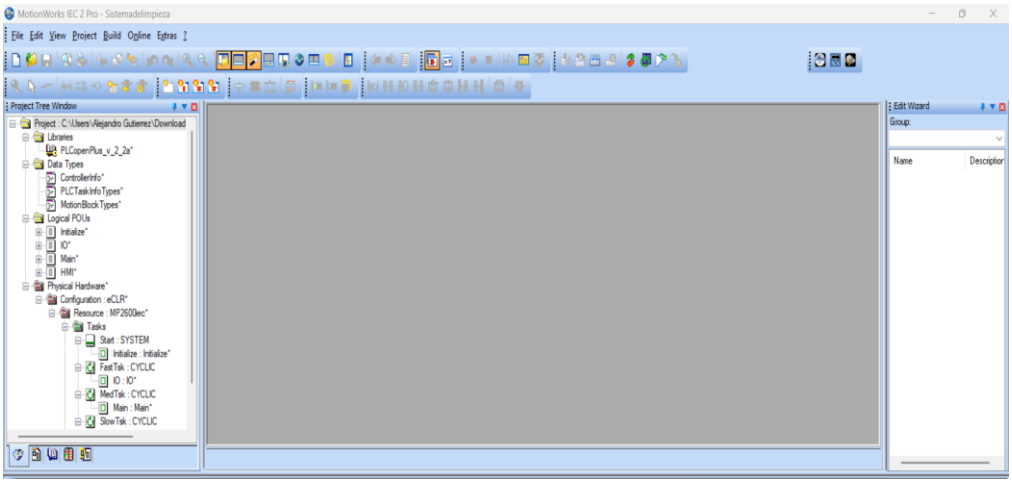


Figura 64. Interfaz MotionWorks IEC 2 Pro 2.2.0.18

En la figura 65, podemos observar la secuencia realizada para la implementación del sistema automatizado de limpieza laser

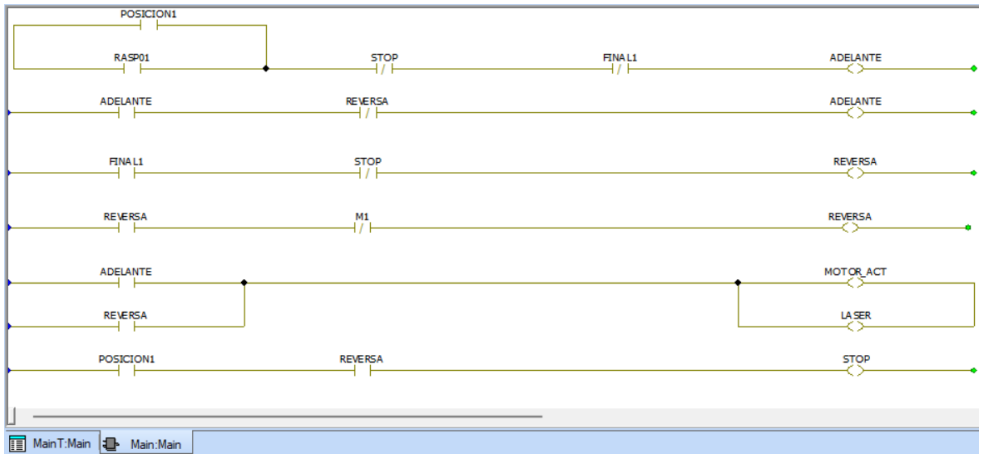
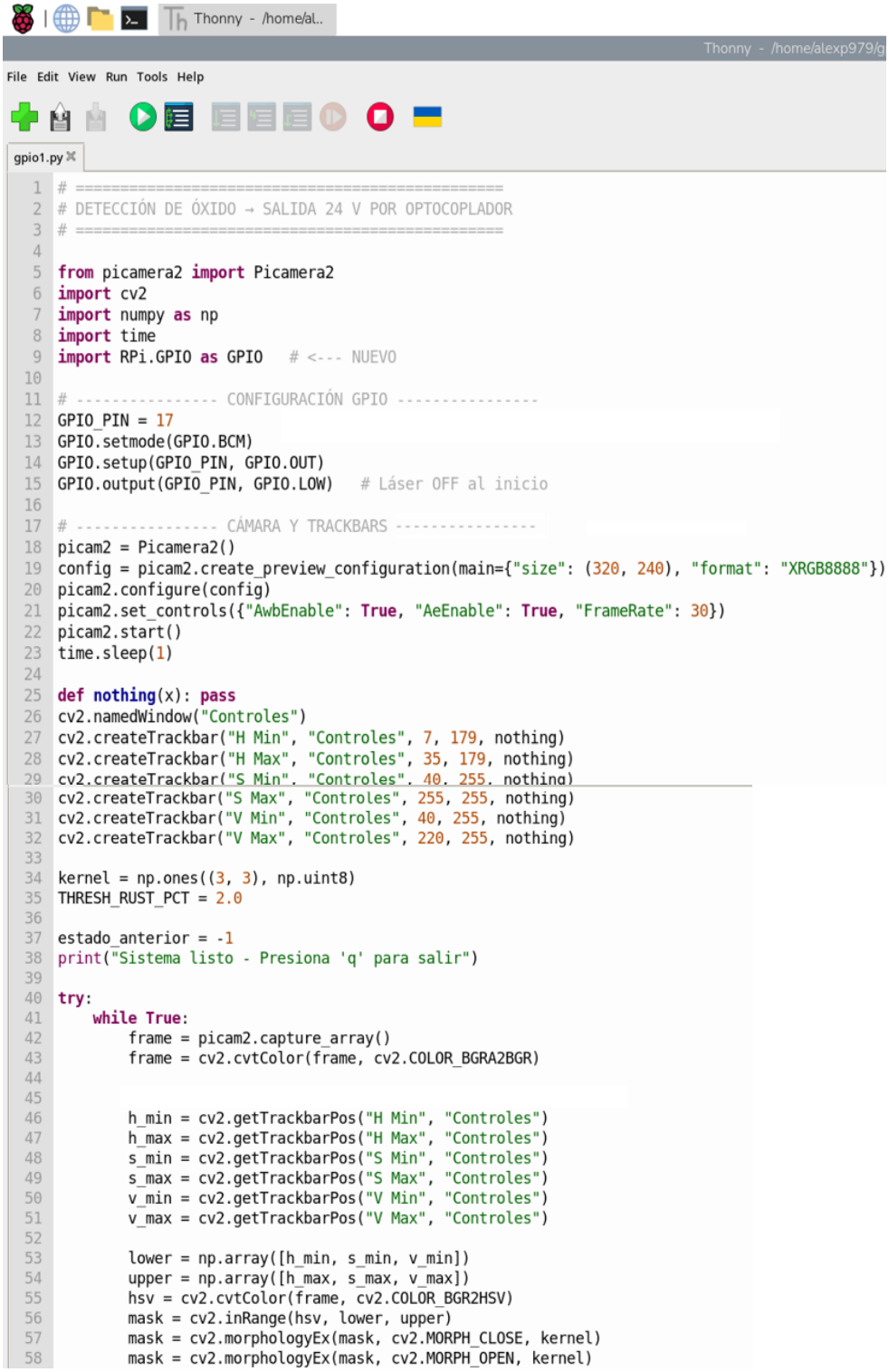


Figura 65. Diagrama ladder para el sistema de limpieza automatizado- Elaboración propia

9.3.3.2 Programación Raspberry 3B 1.2´

Para la programación de la Raspberry se utilizó la biblioteca de opencv, Python, numpy, pycamera, gpio y pymodbus, adicional se utilizó la interfaz de Thonny para hacer las correcciones del código. Podemos evidenciar el código realizado en la figura 66, que se usó para hacer la detección de colores del sistema.



```
        rust_pct = (cv2.countNonZero(mask) / mask.size) * 100.0
        hay_oxido = rust_pct >= THRESH_RUST_PCT
        señal = 1 if hay_oxido else 0

        # --- ENVÍO POR GPIO (optoacoplador) ---
        if señal != estado_anterior:
            GPIO.output(GPIO_PIN, GPIO.HIGH if señal else GPIO.LOW)
            print(f"SEÑAL 24V → {'LÁSER ON (24V)' if señal else 'LÁSER OFF'}")
            estado_anterior = señal

        # --- Visualización ---
        texto = f"Oxido: {rust_pct:.1f}%"
        color = (0, 0, 255) if hay_oxido else (0, 255, 0)
        cv2.putText(frame, texto, (5, 20), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, color, 1)
        if hay_oxido:
            cv2.putText(frame, "LASER ON (24V)", (5, 40), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.6, (0, 0, 255), 2)

        result = cv2.bitwise_and(frame, frame, mask=mask)
        mask_bgr = cv2.cvtColor(mask, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
        combined = cv2.hconcat([frame, mask_bgr, result])
        cv2.imshow("Camara | Mascara | Resultado", combined)

        if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
            break

finally:
    GPIO.output(GPIO_PIN, GPIO.LOW)   # Láser OFF al salir
    GPIO.cleanup()
    picam2.stop()
    cv2.destroyAllWindows()
    print("Sistema apagado - Láser forzado a 0V")
```

```
Shell
Python 3.13.5 (/usr/bin/python3)
>>>
```

Figura 66. Código en Python de programación y detección de oxido - Elaboración Propia.

Después por medio del dash se ejecutó el código de este, el archivo es denominado gpio1.py. Ver figura 67.

```
alexp979@raspberrypi: ~
Archivo  Editar  Pestañas  Ayuda
alexp979@raspberrypi:~ $ python3 modbus4.py
[0:01:38.176287377] [1504]  INFO Camera camera_manager.cpp:330 libcamera v0.5.2+
99-bfd68f78
[0:01:38.243677156] [1525]  INFO IPAProxy ipa_proxy.cpp:180 Using tuning file /u
sr/share/libcamera/ipa/rpi/vc4/ov5647.json
[0:01:38.265632780] [1525]  INFO Camera camera_manager.cpp:220 Adding camera '/b
ase/soc/i2c0mux/i2c@1/ov5647@36' for pipeline handler rpi/vc4
[0:01:38.265826430] [1525]  INFO RPI vc4.cpp:440 Registered camera /base/soc/i2c
0mux/i2c@1/ov5647@36 to Unicam device /dev/media3 and ISP device /dev/media0
[0:01:38.265937474] [1525]  INFO RPI pipeline_base.cpp:1107 Using configuration
file '/usr/share/libcamera/pipeline/rpi/vc4/rpi_apps.yaml'
[0:01:38.290047126] [1504]  INFO Camera camera.cpp:1215 configuring streams: (0)
 320x240-XRGB8888/sRGB (1) 640x480-SGBRG10_CSI2P/RAW
[0:01:38.291062982] [1525]  INFO RPI vc4.cpp:615 Sensor: /base/soc/i2c0mux/i2c@1
/ov5647@36 - Selected sensor format: 640x480-SGBRG10_1X10/RAW - Selected unicam
format: 640x480-pGAA/RAW
```

Figura 67. Ejecución código Python modbus4.py – Elaboración propia

Al iniciar el código podemos identificar en la figura 66, parte izquierda superior, que no se detecta el óxido, ya en la parte derecha superior al presentar la pieza con oxido, la cámara este ya es capaz de detectarlo.

Es necesario mencionar que podemos ajustar los rangos de colores para que la cámara detecte el color que se necesite, los parámetros que se pueden ajustar son los HSV; H (Tono), S (Saturación) y Valor (V), los cuales con el panel presente podemos seleccionar los rangos para una correcta detección, los valores encontrados fueron los que mejor se ajustaron a la detección de colores rojizos y/o marrones para detectar el óxido. Ver figura 68.



Figura 68. Prueba detección de oxido 0% y 5.1%, parámetros y mascara – Elaboración propia

Comprobamos que este enviando la salida de 3.3 V a la salida del puerto 17, para esto conectamos el voltímetro en 20vdc, y verificamos el voltaje, el ground fue conectado al puerto 20. Ver figura 69.



Figura 69. Prueba detección voltaje gpio17 – Elaboración propia

9.3.3.3 Integración del sistema

La integración del sistema se realizará en dos niveles: primero, la Raspberry Pi 3B procesará en tiempo real las imágenes de la cámara para detectar la presencia de óxido, una vez se cumpla el criterio de limpieza, la Raspberry activará una salida digital (GPIO) que alimenta el LED del optoacoplador PC817, el cual permite la comunicación de 3,3 V de la Raspberry del circuito de 24 V del PLC.

En el lado de 24 V, el transistor del PC817 conmuta una entrada digital del PLC MP2600iec enviando la señal de la Raspberry en una señal 1/0 segura y compatible con la lógica industrial. A partir de esa entrada, el PLC ejecuta la secuencia de control: referencia y posicionamiento de los servomotores, verificación de seguridades (E-STOP, finales de carrera, condiciones de proceso) y, solo cuando todo es correcto, activa mediante una salida digital la señal de ENABLE/TRIGGER hacia la máquina láser LZR-301, permitiendo que el haz se dispare únicamente en la posición adecuada y bajo condiciones seguras, cerrando así la cadena de integración Raspberry–PC817–PLC–láser.

9.4 Evaluar los beneficios operativos del sistema propuesto en comparación con el método químico tradicional, mediante pruebas simuladas en entornos controlados.

La evaluación de los beneficios operativos del sistema automatizado de limpieza láser propuesto, se realizó mediante pruebas físicas experimentales en un entorno controlado de laboratorio, se realizaron en la sede de ingenieria de la Universidad Francisco Jose de Caldas, utilizando un montaje prototipo que incorpora una fuente de láser de limpieza de 2000 W acoplada a un actuador lineal para simular el movimiento automatizado lineal, junto con un dispositivo rotacional para hacer girar la tubería, todo esto controlado por un modelo de visión que identificaba oxido de la superficie.

Esta metodología permite una validación practica de la viabilidad del sistema propuesto, considerando parámetros clave como la eficiencia de remoción de contaminantes, el tiempo de operación, el consumo energético, el impacto ambiental y el nivel de riesgo para el operario.

Los resultados se contrastan con el método químico tradicional empleado en la mayoría de las industrias, basado en inmersión en soluciones de HCl al 5-10% durante intervalos de 15-30 minutos, seguido de enjuague con agua abundante. Las pruebas se llevaron a cabo sobre muestras de tubería conduit de acero con diámetros de 15 mm y capas de óxido superficial de 0,1-0,2 mm de espesor, replicando condiciones reales observadas en la producción industrial.

9.4.1 Realizar simulaciones y/o pruebas experimentales controladas para comparar el desempeño del sistema.

Las pruebas experimentales se realizaron en un laboratorio controlado, empleando un láser de fibra pulsado de 200 W (con parámetros operativos de potencia de 200 W, frecuencia de pulso de 20-50 kHz, duración de pulso de 50-100 ns y velocidad de escaneo de 1000-2000 mm/s), acoplado a un actuador lineal para garantizar un movimiento uniforme y preciso a lo largo de la tubería. Ver figura 70.

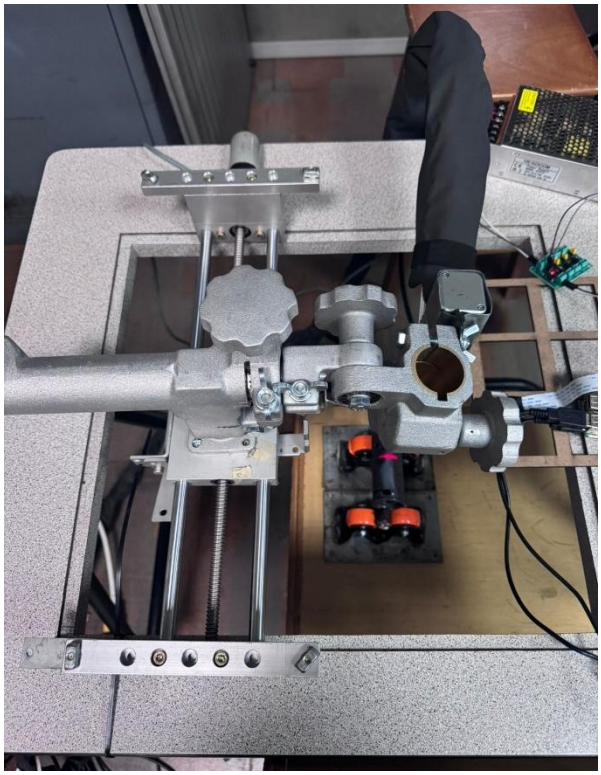


Figura 70. Montaje mecánico sistema de limpieza laser

Este montaje simuló el sistema automatizado propuesto, permitiendo la ablación selectiva del óxido mediante procesos fototérmicos y fotoquímicos, donde el láser induce vaporización y ondas de choque para remover contaminantes sin afectar el material base. Se procesaron 2 muestras: para el láser, se aplicó un escaneo lineal automatizado.

Los resultados experimentales demostraron que el láser logra una remoción completa del óxido en un solo pase, con temperaturas superficiales máximas de 400-600 °C disipadas en menos de 1 ms, evitando daños térmicos al material base.

Los parámetros utilizados para realizar la limpieza de estas probetas se pueden observar en la figura 71. Entre ellos podemos mencionar; la frecuencia de escaneo

de 50 Hz, Ancho de escaneo de 70 mm, potencia de trabajo de 800W, ciclo de trabajo del 100% y una frecuencia de 2000 Hz. Ver Figura 71.

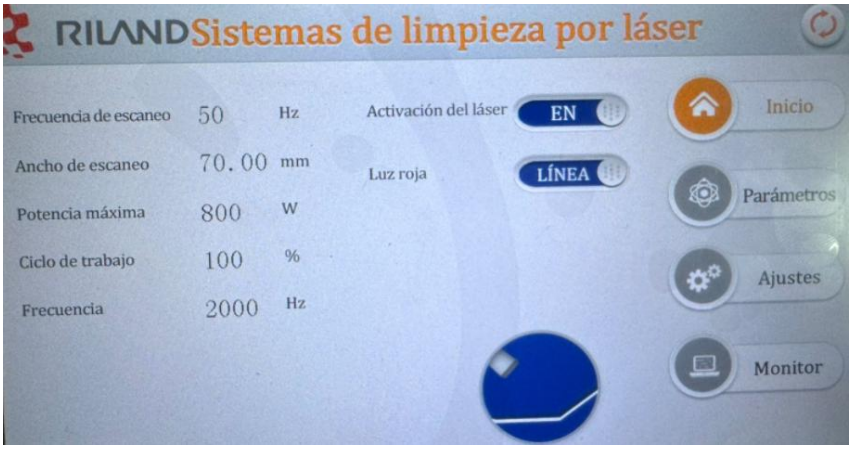


Figura 71. Parámetros de trabajo prueba laser.

9.4.2 Evaluar la eficiencia de remoción, tiempo de operación, consumo energético, impacto ambiental, nivel de riesgo para el operario.

La evaluación y análisis de los resultados obtenidos, se estructuró en una comparación cuantitativa y cualitativa, resumida en la siguiente tabla. Los datos del método láser provienen de las pruebas experimentales y referencias bibliográficas, mientras que los del método químico se basan en observaciones del proceso actual. Ver tabla 13.

Tabla 13. Comparación parámetros método laser vs químico.

Parámetro	Método Químico Tradicional	Sistema Láser Propuesto	Beneficio Operativo
Eficiencia de remoción	85-95% (depende del tiempo de la inmersión y enjuague; riesgo de residuos calcáreos)	95-100% (ablación selectiva sin daño al sustrato; remoción completa en un pase, hasta 99.9% en pruebas)	Mayor precisión y consistencia, reduciendo reprocesos en un 50-90%.
Tiempo de operación	15-30 minutos por tubería (inmersión + enjuague)	1-5 minutos por tubería (escaneo automatizado a 1000-2000 mm/s; hasta 20 m²/h para óxidos ligeros)	Reducción del 80-90%, incrementando la productividad en entornos industriales.

Consumo energético	Bajo directo (eléctrico para agitación), pero alto indirecto (tratamiento de agua y residuos, >50% más que láser en ciclos equivalentes)	0,5-1 kWh por tubería (láser de 2000 W operando 1-5 min; eficiencia >30%, 50% menos que métodos abrasivos)	Comparable o inferior, con ahorro energético a largo plazo mediante optimización de parámetros.
Impacto ambiental	Alto (generación de efluentes tóxicos con HCl, consumo de agua >100 L por tubería, emisiones de CO2 y residuos químicos)	Bajo (proceso en seco, sin químicos ni residuos tóxicos; reducción de emisiones hasta 90%, solo polvo mínimo recolectable)	Reducción significativa de contaminantes, alineado con normativas ambientales y sostenibilidad.
Nivel de riesgo para el operario	Alto (exposición a HCl: irritación respiratoria, dérmica; riesgo de salpicaduras y manipulación manual)	Bajo (no-contacto; requiere gafas protectoras, ventilación y botones de emergencia; sin exposición química)	Mejora en seguridad laboral, minimizando accidentes y exposición a sustancias peligrosas.

Los resultados de las pruebas confirman que el sistema láser supera al químico en todos los parámetros, con un enfoque en el método de ablación, que preserva la integridad del acero. Factores como el grosor del óxido influyen en la velocidad, pero la ajustabilidad de parámetros (potencia, frecuencia y velocidad) permite optimizaciones específicas para tuberías Conduit y cualquier superficie metálica.

9.4.3 Validación técnica del sistema propuesto como alternativa viable.

La validación técnica se basa en la integración de los resultados y experimentación realizada con evidencias de la literatura, demostrando que el sistema láser es viable como alternativa al método químico, debido a su eficiencia, rapidez, seguridad para el operador, amigable al medió ambientes. Es necesario mencionar que en los ensayos que se realizaron no se identificaron daños térmicos significativos al sustrato, y los beneficios operativos cuantificados indican una mejora del 70-90% en velocidad de operación.

En aplicaciones similares de limpieza, como mantenimiento en diversos componentes metálicos, el láser ha prolongado la vida útil de los componentes al eliminar corrosión sin residuos, alineándose con los objetivos de sostenibilidad industrial. Además de ser una alternativa para también poder cambiar los procesos de granallado convencional el cual, si se ajustara adecuadamente permitiría generar un perfil de anclaje, necesario para el proceso de pintura.

10. CONCLUSIONES

- El análisis revela que los procesos químicos convencionales presentan limitaciones técnicas con una baja precisión y eficiencia en la remoción de óxidos, lo que genera desperdicios de materiales e intervenciones manuales repetitivas, impactando negativamente en la productividad general del proceso industrial.
- Desde una perspectiva ambiental, se identifica un alto impacto derivado al uso de disolventes y generación de efluentes contaminantes, lo cual incumple con los principios de sostenibilidad y podría exponer a la industria a sanciones ambientales, destacando la necesidad de transitar hacia alternativas ecológicas.
- En términos de seguridad laboral, las limitaciones incluyen exposición prolongada a sustancias químicas corrosivas, aumentando el riesgo de enfermedades ocupacionales y accidentes, lo que remarca la importancia de adoptar tecnologías automatizadas para minimizar la intervención humana en entornos peligrosos, como este proceso de pickling.
- La investigación sobre los principios físicos de la limpieza láser como la ablación confirmó su eficacia para la remoción selectiva de óxidos y contaminantes en superficies metálicas, sin comprometer la integridad del material base.
- Se determina que la tecnología láser supera métodos mecánicos y químicos en precisión, al ajustar variables como la longitud de onda para enfocarse en óxidos específicos, reduciendo así el consumo energético y mejorando la eficiencia en la limpieza de tuberías conduit.
- Los hallazgos indican que, bajo condiciones controladas, la limpieza láser no altera las propiedades mecánicas del material base, posicionándola como una alternativa viable que alinea con estándares de control de corrosión y promueve la longevidad de los componentes metálicos en entornos corrosivos.
- Estos resultados posicionan al sistema propuesto como una alternativa viable y superior al método químico tradicional, contribuyendo a la optimización de procesos industriales en términos de productividad, sostenibilidad y cumplimiento normativo.
- Al realizar un prototipo a escala se comprobó que es posible realizar la automatización e integración de componentes mecánicos, electrónicos y de control para sustituir procesos manuales como el de limpieza de tubería laser.
- El diseño integra exitosamente componentes como PLC, actuadores mecánicos y sensores junto con la tecnología láser, logrando un control

preciso de parámetros operativos que optimiza la eficiencia energética mediante algoritmos de retroalimentación en tiempo real.

- Al considerar criterios de sostenibilidad, el diseño reduce el consumo energético en comparación con sistemas tradicionales, mediante la implementación de protocolos de autolimpieza y protección catódica, fomentando una operación industrial más eficiente y ecológica.
- Las evaluaciones simuladas demuestran que el sistema láser ofrece beneficios operativos significativos, como una reducción en tiempos de limpieza de hasta un 50%, incluso hasta más, en contraste con el método químico, mejorando la productividad en entornos industriales controlados.
- En términos ambientales, las pruebas revelan una disminución drástica en la generación de residuos tóxicos y contaminantes para el medio ambiente, posicionando al sistema propuesto como una alternativa superior que mitiga impactos ecológicos y cumple con regulaciones ambientales estrictas.
- La comparación destaca mejoras en la seguridad laboral, al eliminar la exposición a químicos corrosivos en las simulaciones, lo que resulta en una reducción de riesgos ocupacionales y potenciales ahorros en costos de salud y capacitación para los trabajadores.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

[1] "Tubos Colmena". Consultado: el 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tuboscolmena.com/

[2] "Soluciones al ácido clorhídrico en la contaminación ambiental". Consultado: el 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ecologiadigital.bio/como-afecta-el-acido-clorhidrico-a-la-contaminacion-ambiental/

[3] "La oxidación del hierro: formación de óxido férrico, herrumbre | Quimitube". Consultado: el 8 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.quimitube.com/proceso-oxidacion-hierro/

[4] "Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica) Introduction to Corrosion Phenomena: Types, Influencing Factors and Control for Material's Protection (Technical note)".

[5] "DavisJ.R._2000_TheDefinitionofCorros_CorrosionUnderstandin".

[6] "1 nuevo mensaje". Consultado: el 3 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://f4.com.ar/corrosion-galvanica/

[7] "corrosión por grietas - ingeniería mecánica". Consultado: el 27 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ingenieriamecanicacol.blogspot.com/2016/06/corrosion-por-grietas.html#google_vignette

[8] "Corrosión por Cavitación: Conoce sus Mecanismos de Falla". Consultado: el 4 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://inspenet.com/articulo/mecanismos-de-la-corrosion-por-cavitacion/

[9] "Corrosion Exfoliaxion y Filiforme". Consultado: el 5 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://1library.co/document/qoog175q-corrosion-exfoliaxion-y-filiforme.html

[10] H. E. Sánchez Vargas, M. de L. De la Cruz Aragoneses, M. F. Nápoles García, y F. Castillo Picón, "Evaluación del uso de inhibidores de corrosión en el decapado ácido de una planta galvánica", *TAYACAJA*, vol. 4, núm. 1, pp. 62–72, abr. 2021, doi: 10.46908/TAYACAJA.V4I1.153.

[11] "Limpieza Química Especializada | Preparación de Superficies | Bogotá, Colombia | Servicio de Limpieza Química Profesional | Expertos en Preparación de Superficies | Limpieza Química para Adherencia Superior - Montajes, Ingeniería y Construcción. MIC SAS." Consultado: el 6 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://www.estructurasmetalicascolombia.com/que-hacemos/sandblasting-pintura-acabados-industriales-y-pintura-electrostatica-en-bogota-colombia/preparacion-de-superficies/limpieza-quimica-soluciones-para-contaminantes-especificos

[12] “La mejor concentración de ácido sulfúrico y contenido de hierro para el decapado: Preguntas frecuentes + Foro de preguntas y respuestas”. Consultado: el 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.finishing.com/584/40.shtml

[13] “Que pasa si se aspira hidrogeno? – RESPUESTASRAPIDAS”. Consultado: el 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://respuestasrapidas.com.mx/que-pasa-si-se-aspira-hidrogeno/

[14] “Decapado mecánico para la limpieza de metales » Mecanicos Valencia”. Consultado: el 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://mecanicosvalencia.es/decapado-mecanico/#decapado_mecanico_metodos_y_tecnicas_

[15] “Diferencias entre Arenado, Sandblasting y Granallado en Bogotá, Colombia - Sandblasting Bogotá Colombia”. Consultado: el 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sandblastingcolombia.com/sandblasting-chorro-de-arena-y-granallado/diferencias-entre-samblasteado-granallado-y-arenado-en-bogota-colombia

[16] “Discos abrasivos: herramientas indispensables | Bright Abrasives”. Consultado: el 17 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.brightabrasives.com/discos-abrasivos/

[17] F. DE Ciencias, J. David Vallejo Rueda, y G. Mario Bilmes, “\376\377\000C\000D\000-\0002\0008\0004\0009”, 2010.

[18] “Guía para Elegir la Máquina de Limpieza Láser Adecuada - YUPEC”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.yupeclaser.com/es/guide-to-choose-the-right-laser-cleaning-machine/

[19] “Máquina de limpieza láser con fuente de láser IPG 500W para fabricantes y proveedores de eliminación de óxido China - Precio bajo y barato - MRJ-Laser”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mrjlaser.com/laser-cleaning-machine/laser-cleaning-machine-with-ipg-laser-source.html

[20] “CNI LASER Ürünler”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.innova-teknoloji.com/lazer/cni-laser-urunler

[21] “Limpieza de óxido con láser: el futuro de la eliminación de óxido”, *https://www.kirinlaser.com/es/*, Consultado: el 17 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.kirinlaser.com/es/the-benefits-of-using-laser-rust-cleaning-machines-a-game-changer/

[22] J. Alfonso, T. Ortiz, J. A. Tristancho, y D. Bogotá, “PARTE UNO. HARDWARE DE LOS PLCs”.

[23] “▷ PLC SIEMENS S7-1200 El mejor PLC”. Consultado: el 17 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sensoricx.com/plc-siemens-s7-1200/

[24] “Tipos de sensores industriales | ¿Cuales son los beneficios?” Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://emacstores.com/tipos-de-sensores-industriales/

[25] “Tipos y aplicaciones de sensores de proximidad: la guía definitiva”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.geya.net/es/different-types-of-proximity-sensors/

[26] “Tecnologías de sensores para la detección de la corrosión”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://inspenet.com/articulo/tecnologias-de-sensores-avanzados/

[27] “Sensor De Proximidad De Resistencia A La Corrosión, Sensor Inductivo Rápido, Metalurgia Para Máquinas Herramienta YLSHRF Inductive Sensor | Walmart en línea”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.walmart.com.mx/ip/electricidad/sensor-de-proximidad-de-resistencia-a-la-corrosion-sensor-inductivo-rapido-metalurgia-para-maquinas-herramienta-ylshrf-inductive-sensor/00624508488735

[28] “Encoders: Qué Son, Tipos, Funcionamiento y Usos en Industria”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://suministrosparalaindustria.com/que-son-los-encoders/

[29] “Encoder lineal incremental óptico ELAP KD - KP - Sensing, Sensores de Medida”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sensores-de-medida.es/catalogo/encoder-lineal-incremental-optico-elap-kd-kp/

[30] “Encoder absoluto -¿Qué es? Tipos, ventajas y desventajas.” Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder-absoluto/?cn-reloaded=1#%C2%BFQue_es_un_encoder_absoluto

[31] “Magnetic Encoder Pair Kit for 20D mm Metal Gearmotors, 20 CPR, 2.7-18V at MG Super Labs India”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mgsuperlabs.co.in/estore/Magnetic-Encoder-Pair-Kit-for-20Dmm-Metal-Gearmotors-20-CPR-2-7-18V

[32] “HMI | ¿Qué son, para qué sirven, cómo funcionan? | SDI”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sdindustrial.com.mx/blog/hmi/#%C2%BFQue-es-un-HMI

[33] “Siemens HMI at ₹ 25000/piece | Siemens in Chennai | ID: 2850042778691”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.indiamart.com/proddetail/siemens-hmi-2850042778691.html

[34] “Que es un servomotor y como funciona”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ingmecafenix.com/electronica/motores-electronicos/servomotor/

[35] “servomotores - General Driver Motor”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.generaldrivermotor.com/servomotores/

[36] “Modelo ASV | Productos | DRI-LEX®”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dri-lex.com/#!/producto/16/

[37] “Cómo Elegir una Electroválvula de Vacío | Tameson.es”. Consultado: el 19 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tameson.es/pages/electrovalvulas-para-aplicaciones-en-vacio

[38] “Electroválvula para vacío - Todos los fabricantes industriales”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/electrovalvula-vacio-262256.html

[39] “Emergency Switch, 10A Emergency Stop Switch Plastic For Contactor Relay ANGGREK Emergency Switch | Bodega Aurrera en línea”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.bodegaaurrera.com.mx/ip/muebles-de-jardin/emergency-switch-10a-emergency-stop-switch-plastic-for-contactor-relay-anggrek-emergency-switch/00881101984808

[40] “E3SAT11 | Fotocélula rectangular Omron, Sistema Barrera de Luz, alcance 7 m, salida NPN, Precableado, IP67 | RS”. Consultado: el 7 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.rs-online.com/web/p/fotocelulas/2887382

[41] V. P. Veiko, T. J. Mutin, V. N. Smirnov, E. A. Shakhno, y S. A. Batishche, “<title>Laser cleaning of metal surfaces: physical processes and applications</title>”, SPIE, ene. 2008, pp. 69850D-69850D–8. doi: 10.1117/12.786975.

[42] G. Li *et al.*, “The quality improvement of laser rubber removal for laminated metal valves”, *Opt. Laser Technol.*, vol. 139, jul. 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106785.

[43] F. DE Ciencias, J. David Vallejo Rueda, y G. Mario Bilmes, “\376\377\000C\000D\000-\0002\0008\0004\0009”, 2010.

[44] L. Hou, F. Yin, S. Wang, J. Sun, y H. Yin, “A review of thermal effects and substrate damage control in laser cleaning”, el 1 de julio de 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.optlastec.2024.110613.

[45] G. Zhang *et al.*, “Investigation on mechanism of oxide removal and plasma behavior during laser cleaning on aluminum alloy”, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 506, mar. 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.144666.

[46] J. Robson, “Steel Pickling: A Profile Draft Report Prepared for”, 1993.

[47] “Laminado de acero”. Consultado: el 5 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://fabricacionindustrial.com/laminado-de-acero/

[48] “La industria de la coquización | SOLVAir®”. Consultado: el 5 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.solvairsolutions.com/es/sectores/empresas-industriales/la-industria-de-la-coquizacion

[49] “Decapado de metales: guía completa”. Consultado: el 5 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.vadequimica.com/blog/todos-los-articulos/decapado-de-metales.html

[50] “ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY 40 CFR Part 63 National Emission Standards for Hazardous Air Pollutant Emissions: Hard and Decorative Chromium Electroplating and Chromium Anodizing Tanks; and Steel Pickling-HCl Process Facilities and Hydrochloric Acid Re…”, Consultado: el 8 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.regulations.gov,

[51] “Cómo solucionar de manera rápida y eficaz los problemas en las tuberías”. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.merca2.es/2023/05/18/solucionar-rapida-eficaz-tuberias-1312485/

[52] J. M. Rojas Gómez, “FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL”, 2023.

[53] Z. Zhou, W. Sun, J. Wu, H. Chen, F. Zhang, y S. Wang, “The Fundamental Mechanisms of Laser Cleaning Technology and Its Typical Applications in Industry”, el 1 de mayo de 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/pr11051445.

[54] “SOLDADOR LÁSER RILAND 2000 - Soldaduras Industriales”. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://soldadurasindustriales.com/producto/soldador-laser-riland-2000/

[55] “laser marking machine Manufacturer, laser welding machine, laser cleaning machine Supplier - Jinan Hanteng Laser Technology Co., Ltd.” Consultado: el 15 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hantengmachine.en.made-in-china.com/

[56] “Raspberry Pi product series explained - Raspberry Pi”. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.raspberrypi.com/news/raspberry-pi-product-series-explained/

[57] “Mejore su tecnología con los motion plastics® | igus España”. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.igus.es/

[58] “ROTADORES DE SOLDADURA DE TUBOS DE BANCO | Biblioteca de Modelos CAD 3D | GrabCAD”. Consultado: el 22 de noviembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://grabcad.com/library/bench-pipe-welding-rotators-1

[59] “PORTABLE FLAME CUTTING MACHINE VCM-200 SERIES”, 2008, [En línea]. Disponible en: www.victorequip.com.