

ANÁLISIS DE FATIGA TÉRMICA EN ACERO INOXIDABLE 316L PARA APLICACIÓN EN ENERGIA SOLAR CONCENTRADA A ALTA TEMPERATURA

BRAYAN DANIEL ARIAS SABOGAL

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, diciembre 01 de 2022

ANÁLISIS DE FATIGA TÉRMICA EN ACERO INOXIDABLE 316L PARA APLICACIÓN EN ENERGÍA SOLAR CONCENTRADA A ALTA TEMPERATURA

BRAYAN DANIEL ARIAS SABOGAL

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: JUAN PABLO FLOREZ MERA

Ing. Mecánico, PhD.

juan.florez37@unipamplona.edu.co

Co-director: NURY AUDREY NIETO GARZÓN

Ing. Mecánico, PhD.

nury.nietogar@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
Pamplona, diciembre 01 de 2022**

AGRADECIMIENTOS

- Agradecer a mis padres Orlando Arias y Clara Sabogal, por haber sido apoyo moral y económico durante todo el proceso de formación.
- Agradecimiento especial a mi tutor Juan Flórez y a mi codirectora Nury Nieto por ser los guías en este proyecto de investigación.
- A demás profesores que hicieron parte de este proceso, en especial a los docentes de mi programa de Ingeniería Mecánica.
- A la Universidad de Pamplona por prestarme sus servicios académicos y permitir formarme como profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
2. JUSTIFICACION	21
3. OBJETIVOS	22
3.1 Objetivo general.....	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. ESTADO ACTUAL	23
4.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO	23
4.2 MARCO TEORICO	27
4.2.1 Energía solar concentrada, <i>Concentrated Solar Power</i> (CSP).....	27
4.2.2 Termosifón	28
4.2.3 Acero inoxidable 316L.....	28
4.2.4 Calentamiento por inducción.....	29
4.2.4.1 Ley de Faraday.....	30
4.2.5 Fatiga térmica.....	30
4.2.6 Prueba metalográfica	31
4.2.7 Prueba de dureza.....	31
5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	33
5.1 CONSTRUCCION DEL BANCO DE EXPERIMENTOS.....	33
5.1.1 Selección de componentes	33
5.1.2 Diseño CAD	38
5.1.3 Programación en Arduino.....	39
5.1.4 Ensamblaje	41
5.2 FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE INDUCCION ELECTROMAGNÉTICA	44
5.2.1 Menú de opciones.....	44
5.2.2 Acondicionamiento del banco e inicio de pruebas.....	45
5.3 PRUEBA METALOGRÁFICA Y DE DUREZA SIN FATIGA TÉRMICA.....	46
5.3.1 Preparación de las muestras.....	46
5.3.2 Caracterización de las muestras	47
5.4 INDUCCIÓN DE FATIGA TERMICA.....	48
5.5 PRUEBAS METALOGRÁFICAS Y DE DUREZA CON FATIGA TÉRMICA	50

5.5.1	Preparación de las muestras.....	50
5.5.2	Prueba metalográfica	51
5.5.3	Prueba de dureza.....	52
5.5.4	Equipos utilizados	53
5.6	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES DE LAS MEDICIONES	53
5.7	INCERTIDUMBRES EN LA FATIGA TERMICA	54
5.8	INCERTIDUMBRES EN LA DUREZA.....	54
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	57
6.1	FATIGA TÉRMICA DE ACERO INOXIDABLE 316L.....	57
6.1.1	Prueba metalográfica	57
6.1.2	Prueba de dureza.....	58
6.1.3	Aplicabilidad del acero inoxidable 316L	59
6.2	BANCO DE PRUEBAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	59
7.	CONCLUSIONES.....	62
8.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	63
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
10.	ANEXOS	66
10.1	Anexo 1	66
10.2	Anexo 2	73
10.3	Anexo 3	75
10.4	Anexo 4	76

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del acero inoxidable 316L. Fuente: Jnblog (2019).....	29
Tabla 2. Propiedades químicas del acero inoxidable 316L. Fuente: Jnblog (2019)	29
Tabla 3. Dureza Rockwell A del acero inoxidable 316L sin fatigar.....	48
Tabla 4. Datos de la prueba de fatiga térmica.	50
Tabla 5. Dureza Rockwell A - Probeta 1 fatigada térmicamente.....	52
Tabla 6. Dureza Rockwell A - Probeta 2 fatigada termicamente.....	52
Tabla 7. Desviación estándar de temperaturas máximas	54
Tabla 8. Desviación estándar de temperaturas mínimas	54
Tabla 9. Desviación estándar de durezas – Probeta sin fatiga	55
Tabla 10. Desviación estándar de durezas – Probeta 1	55
Tabla 11. Desviación estándar de durezas – Probeta 2	56
Tabla 12. Comparativa de durezas antes y después de la fatiga térmica.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa mundial del recurso energía solar. Fuente: Bueso (2011).	23
Figura 2. Mapa de recurso solar en Colombia. Fuente: Global Solar Atlas (2022).	24
Figura 3. Mapa del recurso solar en la Guajira. Fuente: Global Solar Atlas (2022).	25
Figura 4. Comparación ante corrosión de Acero inoxidable 316L y 304. Fuente: Li (2022b).	26
Figura 5. Planta de energía solar térmica tipo torre. Fuente: Rodríguez (2016).	27
Figura 6. Termosifón bifásico.	28
Figura 7. Microestructura del acero inoxidable 316L a 100X. Fuente: Vega (2012).	31
Figura 8. Módulo de calentamiento por inducción.	33
Figura 9. Fuentes de alimentación	33
Figura 10. Relé de estado sólido.	34
Figura 11. Breaker.	34
Figura 12. Cable AWG 10	35
Figura 13. Placa Arduino UNO.	35
Figura 14. Modulo I2C.	35
Figura 15. Pantalla LCD 16x2	35
Figura 16. Módulo MAX6675.	36
Figura 17. Termopar tipo K.	36
Figura 18. Módulo micro SD.	36
Figura 19. Módulo KY-040.	36
Figura 20. Jumpers.	37
Figura 21. Mini bomba.	37
Figura 22. Tanque de almacenamiento de 4 litros.	38
Figura 23. Manguera de silicona 4 mm.	38
Figura 24. Radiador.	38
Figura 25. Estructura.	38
Figura 26. Banco de pruebas de inducción electromagnética.	39
Figura 27. Diagrama de flujo de la programación.	40
Figura 28. Ensamblaje del banco de pruebas.	41
Figura 29. Esquema de conexiones del ensamblaje del banco de pruebas.	41
Figura 30. Ensamblaje sistema de control.	42
Figura 31. Estructura pintada.	42
Figura 32. Conexiones del sistema de control.	43
Figura 33. Esquema de conexiones del sistema de refrigeración.	44
Figura 34. Navegación por menús.	45
Figura 35. Tubos de 12" de acero inoxidable 316L.	46
Figura 36. Probetas de 10 cm de acero inoxidable 316L.	47
Figura 37. Microestructura sin fatigar del acero inoxidable 316L. Aumento 200X	48
Figura 38. Microestructura sin fatigar del acero inoxidable 316L. Aumento 1000X	48
Figura 39. Prueba de dureza inicial.	48
Figura 40. Ubicación de la muestra.	49

Figura 41. Muestra de acero inoxidable 316L siendo fatigada térmicamente.	49
Figura 42. Grafica de fatiga térmica	50
Figura 43. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 200X Probeta 1 fatigada térmicamente.	51
Figura 44. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 1000X Probeta 1 fatigada térmicamente.	51
Figura 45. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 200X Probeta 2 fatigada térmicamente.	51
Figura 46. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L Aumento de 1000X Probeta 2 fatigada térmicamente.	51
Figura 47. Pruebas de dureza - Probeta 1 fatigada térmicamente.	52
Figura 48. Prueba de dureza - Probeta 2 fatigada térmicamente.	52
Figura 49. Pulidora BUEHLER Ecomel.	53
Figura 50. Microscopio metalográfico Olympus GX41.	53
Figura 51. Durómetro Wilson Rocwell.	53
Figura 52. Comparativa de la microestructura de una muestra antes y después de la fatiga térmica. Microestructura A) y C) fatigadas, y B) sin fatigar.	58
Figura 53. Vista isométrica del banco de inducción electromagnética.	60

Análisis de fatiga térmica en acero inoxidable 316L para aplicación en energía solar concentrada a alta temperatura

Arias Sabogal Brayan Daniel, Flórez Mera Juan Pablo, Nieto Garzón Nury Nieto

Pamplona University, Km 1 Via B/manga, Pamplona, Colombia

Resumen

Las energías limpias o renovables actúan de mejor manera ante el medio ambiente, ya que ayuda a mitigar los gases de efecto invernadero que las industrias dependientes del petróleo emiten. Las plantas de Energía de Concentración Solar (CSP) de torre central, son una tecnología que promete a futuro. El uso de termosifones en el receptor solar de estas plantas se encuentra en fase de investigación por su alta eficiencia como intercambiador de calor a altas temperaturas. Se realizó un análisis de la fatiga térmica en acero 316L para aplicación en energía de concentración solar de alta temperatura, simulando así las condiciones a la que un termosifón se encuentra sometido en cuanto a cambios de temperatura, dados por la diferencia de radiación solar recibida. Se construyó un horno de inducción y se fatigaron térmicamente muestras de acero inoxidable 316L a temperaturas entre 700 °C y 550 °C, dejándolas enfriar al ambiente, por una cantidad de 500 ciclos. Se realizaron pruebas de dureza y metalográficas al acero inoxidable 316L sin ser fatigado térmicamente y a 3 muestras fatigadas térmicamente. Fueron comparadas y no se observó cambios en su dureza y microestructura. No se pudo determinar la implementación de acero inoxidable 316L en termosifones bifásicos de sodio a falta de realizar una fatiga térmica con un rango de temperaturas más elevadas y a un mayor número de ciclos.

Palabras clave: fatiga; térmica; acero; inoxidable; horno

Abstract

Clean or renewable energies act in a better way towards the environment, since they help to reduce the greenhouse gases that oil-dependent industries emit. Central tower Concentrated Solar Power (CSP) plants are a technology that promises a future. The use of thermosiphons in the solar receiver of these plants is in the research phase due to its high efficiency as a heat exchanger at high temperatures. An analysis of thermal fatigue in 316L steel for application in high-temperature solar concentration energy was carried out, thus simulating the conditions to which a thermosiphon is subjected in how many temperature changes, given by the difference in solar radiation received. An induction furnace was built allowing the temperature of steel samples to be quickly raised to 700°C and allowed to cool in the environment up to 550°C for 500 cycles. Hardness and metallographic tests were performed on 316L stainless steel without being thermally fatigued and on 3 thermally fatigued samples. They were compared and no changes in their hardness and microstructure were lost. The implementation of 316L stainless steel in two-phase sodium thermosiphons could not be determined in the absence of thermal fatigue with a higher temperature range and a greater number of cycles.

Keywords: fatigue; thermal; steel; stainless; oven

1. Introducción

Las energías alternativas como la energía solar, denominadas limpias o renovables, son el futuro de las plantas de generación de potencia eléctrica. Como es bien conocido, las centrales termoeléctricas convencionales funcionan con combustibles fósiles que generan residuos y emisiones que contaminan el medio ambiente, además de su evidente influencia en el calentamiento global [1]. El planeta cada vez requiere más energía debido a su crecimiento poblacional y las energías fósiles se encuentran limitadas debido a su agotamiento y costo natural que su uso requiere [2].

En 1891, Clarence Kemp diseñó el primer calentador de agua que aprovechaba la energía solar, dando inicio a investigaciones posteriores acerca de esta tecnología, hasta hoy en día, donde surge como una fuerte alternativa para abastecer la energía mundial. En la energía solar térmica la posición geográfica juega un papel importante, debido a que entre más radiación se obtenga del sol durante el día, mayor eficiencia tendrá una planta de este tipo [1]. La energía solar concentrada Concentrated Solar Power (CSP), ofrece una gran ventaja a causa de su capacidad de almacenamiento térmico, por lo tanto, puede producir energía eléctrica en periodos de ausencia de radiación solar. La tecnología CSP también brinda la posibilidad de ser utilizada en procesos industriales. La desventaja que presenta una aplicación CSP es el transporte ineficiente de su energía, ya que sus centrales se encuentran muy alejadas de las grandes ciudades [3].

Entre los diversos tipos de centrales de energía solar térmica se encuentra la central de torre solar, donde espejos llamados heliostatos, siguen la trayectoria del sol y reflejan la radiación hacia un receptor que se encuentra en una torre. El calor recolectado en el receptor es transportado por medio de intercambiadores de calor para los almacenadores y otros componentes del proceso de generación eléctrica. Los termosifones bifásicos están siendo estudiados para auxiliar la transferencia de calor desde el colector hasta los generadores impulsados por motores Stirling o turbinas de vapor. Los termosifones son intercambiadores de calor que basan su funcionamiento en el cambio de fase de un fluido de trabajo. En este tipo de aplicaciones, el sodio es empleado como fluido de trabajo para operar en temperaturas que superan los 1000 °C. Los materiales empleados en los modelos experimentales incluyen la aleación Inconel y aceros inoxidable. En la operación, el material del conjunto receptor puede sufrir ciclos térmicos que van desde 700 °C a 1000 °C. Esta operación cíclica puede reducir la vida de los termosifones debido a la fatiga térmica del material. El acero inoxidable 316L es un material que se presenta como una alternativa para ser implementado en esta aplicación debido a su bajo costo en comparación con otros materiales de propiedades similares, su alta resistencia a la corrosión y sus buenas propiedades mecánicas [4].

En este sentido, considerando que el material de construcción de los termosifones puede tener fallas por fatiga térmica, en esta investigación se estudió el comportamiento del acero inoxidable 316L sometido a fatiga térmica con temperaturas que oscilan entre 550 °C y 700 °C, con el fin de analizar su posible implementación en termosifones de acero en plantas termosolares tipo torre. Para ello, se analizaron los cambios en la dureza y la microestructura del material, reproduciendo las condiciones físicas a la que se encuentra sujeto el acero en el funcionamiento del termosifón. La producción experimental de los ciclos térmicos se realizó mediante un banco de pruebas de inducción electromagnética que fue construido durante el desarrollo de esta investigación.

2. Marco teórico

El calentamiento por inducción es utilizado principalmente para realizar tratamientos térmicos en metales. Es un proceso muy veloz, de fácil control y alta eficiencia energética. Su principio de funcionamiento se basa en la Ley de Faraday. Una bobina actúa como inductor, alimentada con corriente alterna genera un campo magnético y una pieza metálica atravesada por este campo magnético experimenta la inducción de corrientes de Foucault. Estas corrientes fluyen en contra de la resistividad eléctrica de la pieza metálica generando así calor, obedeciendo la ley de Joule. Este calentamiento puede llevar a una pieza a temperaturas muy elevadas o fundirlas, en pocos segundos, teniendo una eficiencia energética de 90 %, además de poder tener un control preciso sobre su calentamiento [5].

2.1. Fatiga térmica.

La fatiga térmica ocurre cuando hay cambios cíclicos de temperatura lo que genera tensiones por la expansión y contracción debido al calentamiento y enfriamiento del material, respectivamente. La fatiga térmica es un proceso que se da gradualmente en un material donde se puede dar distorsión, agrietamiento superficial y ruptura. Esta puede ser contribuyente a la falla de un equipo o simplemente ser la causa principal, teniendo varias consideraciones. En primera instancia cuando ocurre un ciclo mecánico en una gran área y esfuerzos térmicos moderados. Luego en un choque térmico con bastante diferencia de temperatura que sea lo suficientemente grande, ocasionando fallas en muy pocos ciclos o en su defecto en un solo ciclo. Finalmente, una región de falla por termofluencia (creep) a causa de ciclos térmicos y cargas mecánicas frecuentes [6].

Se pueden diferenciar algunos tipos de fatiga térmica como aquellos que contienen restricciones internas, externas o ambas. La restricción interna puede darse por gradientes de temperatura o por anisotropía en la estructura con distintas fases. La restricción externa ocurre cuando hay restricciones para que el elemento pueda expandirse térmicamente, ya sea por espacio o carga mecánica [7].

Existen algunos factores a considerar cuando un material sufre fatiga térmica

1. Parámetros de proceso: frecuencia de los ciclos, temperatura máxima y amplitud de los ciclos.
2. Propiedades del material: difusividad térmica, conductividad térmica y dilatación. Teniendo en cuenta oxidación, envejecimiento, transformaciones de fase y precipitación de carburos que posiblemente haya sufrido el material.
3. En caso de una estructura multilateral, las propiedades químicas y mecánicas de los diferentes materiales.

Analizar la microestructura de los materiales expuestos a fatiga térmica antes y después de cada prueba de fatiga térmica es muy importante, ya que se pueden generar vacancias ocasionadas por el movimiento de dislocaciones durante el ciclo térmico, que puede resultar en microgrietas en las fronteras de grano. Además, las inclusiones suelen convertirse en concentradores de esfuerzos cuando su coeficiente de expansión térmica y módulo de elasticidad es diferente al de la matriz [6].

2.2. Prueba metalográfica

Para realizar pruebas metalográficas las probetas se acondicionan siguiendo la norma ASTM E3. De acuerdo con el procedimiento sugerido por la norma, primero se debe pulir la superficie que va a estar expuesta al microscopio, pasando la muestra desde abrasivos ásperos a más finos, puliendo de manera perpendicular con cada abrasivo hasta conseguir una superficie semejante a la de un espejo. Posteriormente, se ataca químicamente con Agua regia la cara pulida de la muestra, para así proceder a examinarla microscópicamente.

2.3. Prueba de dureza

La dureza es la resistencia del material a ser rayado o a la indentación. La prueba de dureza arroja la resistencia a la penetración superficial de un material. Se conocen varias pruebas de dureza, pero generalmente se utilizan la prueba de dureza Rockwell y la prueba de dureza Brinell. En la dureza Rockwell se conocen algunas variaciones, donde su utilización depende del material de prueba [8].

Para materiales normalmente muy duros se utiliza la prueba de dureza Rockwell A (HRA) que utiliza un cono de diamante para penetrar la muestra, ejerciendo una fuerza de 60 kgf. Las pruebas Rockwell proporciona un número adimensional de dureza que es utilizada como base cualitativa para ser comparada con otros materiales, correlacionarla con otras propiedades, control de calidad, especificaciones para fabricarlos y tratamiento térmico [8].

En aceros inoxidables dúplex se demostró que la dureza y la resistencia a la tracción aumentaron cuando se les hizo envejecimiento térmico contrario a la ductilidad y tenacidad. La vida útil por fatiga térmica se puede predecir con la variación de su dureza [9].

3. Metodología

3.1. Construcción de banco de prueba

Se utilizaron los siguientes componentes: 1 módulo de calentamiento por inducción de 1800 W de 48 V y 40 A, cuatro fuentes conmutadas de 12 V y 30 A conectadas en serie, un relé de estado sólido de 40 A, un breaker de 40 A, todo esto conectado mediante cable 10 AWG. Para el sistema de control una placa Arduino UNO, un módulo I2C, una pantalla LCD 16x2, un termopar tipo K, un módulo MAX6675, un módulo micro SD, un módulo encoder rotativo KY-040, conectado mediante jumpers. Finalmente para el sistema de refrigeración, una mini bomba de 5V y 0,3 A, tanque de almacenamiento y un radiador, conectado mediante manguera de silicona pasando por la bobina del módulo de calentamiento por inducción. Todo lo anterior montado en una estructura metálica. Se realizó una programación en Arduino que permite un ingreso de variables intuitivo para la realización de pruebas a realizar. Esta programación permite navegar por un menú de opciones que muestra las variables que se desean modificar según sea la prueba de fatiga térmica.

Para la navegación por el menú de opciones mostrado en la pantalla LCD se emplea el encoder rotatorio. Una flecha en la parte izquierda indica la posición actual. Giro hacia la derecha cambia de posición descendentemente, caso contrario, ascendentemente. Al pulsar el encoder en donde se encuentra la flecha elige esa opción y permite modificar la variable. Pulsar nuevamente el encoder permite seguir navegando por las demás variables. Pulsar en “iniciar prueba” da inicio a la prueba a realizar.

3.2. Pruebas metalográficas y de dureza sin fatiga térmica

Tres muestras de acero inoxidable 316L de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y 10 cm de largo fueron necesarias. El corte se realizó de tal manera que no se elevara demasiado la temperatura del acero, evitando así alterar la microestructura del mismo. A estas muestras se les hizo un agujero en un extremo con el fin de ajustar el termopar tipo K con un tornillo.

En primera instancia se hizo un análisis metalográfico, observando la microestructura del acero. Posteriormente se realizaron pruebas de dureza del acero (Fig 1), obteniendo las durezas mostradas en la Tabla I.

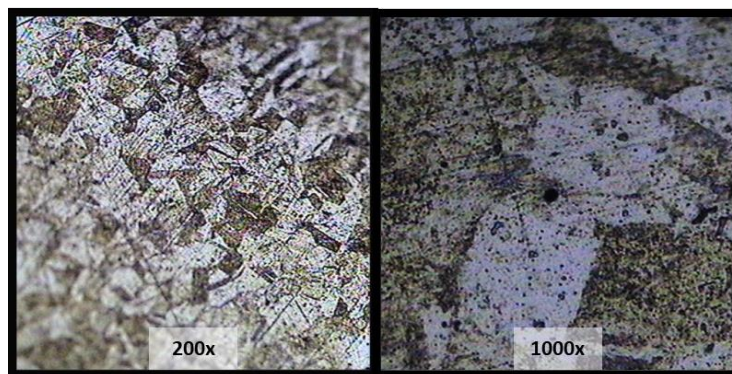


Fig 1. Microestructura sin fatigar del acero inoxidable 316L

Tabla I. Dureza Rockwell A del acero inoxidable 316L sin fatigar

Prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Dureza Rockwell A	44,2	45,2	44,2	43,2	42,1	43,78

3.3. Inducción de la fatiga térmica

Se configuraron los datos de la prueba de fatiga térmica requerida y se realizaron las pruebas. Los datos configurados son $T_{m\acute{a}x} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{m\acute{i}n} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Ciclos = 500. Se dejaron enfriar en las condiciones ambientales de la sala hasta $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la Fig 2 se presenta una muestra de acero inoxidable 316L en el proceso de fatiga térmica. Se graficaron y analizaron los datos obtenidos. En la Fig 3 se observa una gráfica de fatiga térmica desde su inicio hasta un tercer ciclo y en la Tabla II se muestran los datos a evaluar.

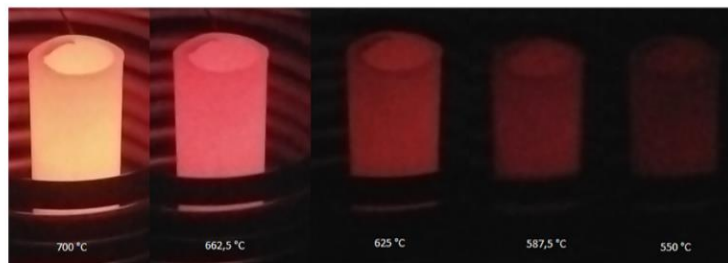


Fig 2. Muestra de acero inoxidable 316L siendo fatigada térmicamente

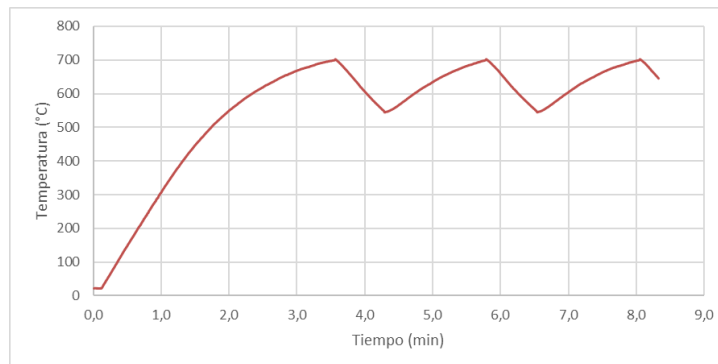


Fig 3. Gráfica de fatiga térmica

Tabla II. Datos de la prueba de fatiga térmica

No. Muestra	Tiempo promedio entre ciclos (min)	Temperatura menor promedio (°C)	Temperatura mayor promedio (°C)	No. Ciclos	Tiempo total (horas)
1	2,74	538,19	701,73	500	22,8
2	2,78	535,83	701,81	500	23,2

3.4. Pruebas metalográficas y de dureza con fatiga térmica

Una vez fatigadas térmicamente las 2 probetas de acero inoxidable 316L, se procedió a preparar las muestras para la prueba metalográfica. Primero se cortaron las probetas fatigadas en el mismo plano donde estaba el

termopar tipo K. Y, se realizaron las pruebas metalográficas de 200X y 1000X a cada una de las dos probetas. Las pruebas metalográficas se presentan en la Fig 5 y en la Fig 4.

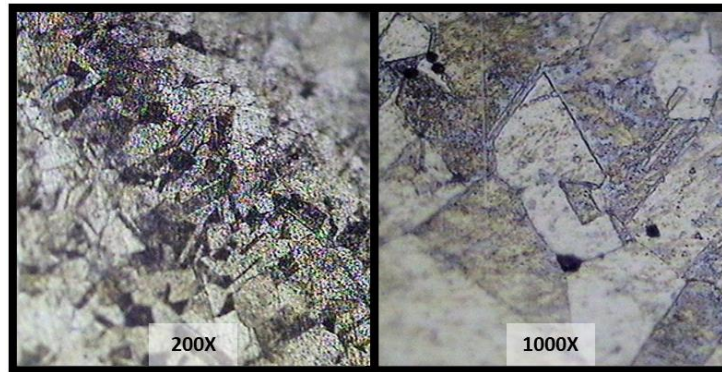


Fig 4. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Probeta 1

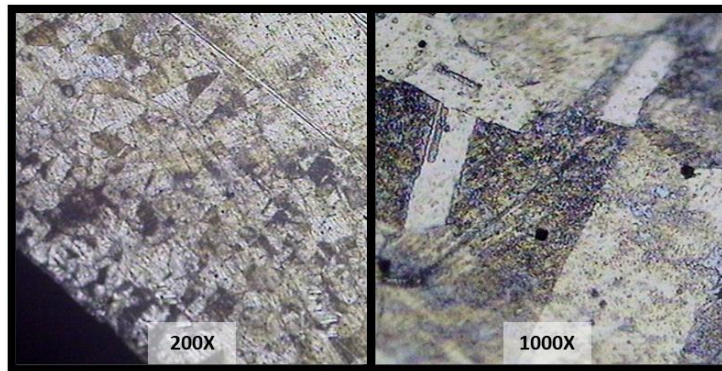


Fig 5. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Probeta 2

En la prueba de dureza los resultados de las dos probetas son mostrados en la Tabla III y Tabla IV.

Tabla III. Dureza Rockwell A - Probeta 1 fatigada térmicamente

Prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Dureza Rockwell A	44,2	44,7	41,5	42,5	40,9	42,76

Tabla IV. Dureza Rockwell A - Probeta 2 fatigada térmicamente

Prueba	1	2	3	4	5	Promedio
Dureza Rockwell A	35,3	37,5	37,7	34,2	38,1	36,56

3.5. Análisis de incertidumbres de las mediciones

Para cada conjunto de datos medidos, se determinó la incertidumbre tipo A, como la desviación estándar de la media, para ello se usó la función DESVEST.M en Excel. Posteriormente, se determinó la incertidumbre expandida conforme la ecuación (2).

$$U = k_p u \quad (1)$$

donde,
U: incertidumbre expandida
kp: factor de cobertura
u: desviación estándar

Considerando una probabilidad de 95 %, el factor de cobertura es $k_p = 1,96$ para infinitos grados de libertad, en el caso de los datos de temperatura y $k_p = 2,57$ para cinco grados de libertad, en el caso de los datos de dureza.

Se calculo la incertidumbre expandida equivalente a la temperatura máxima y mínima promedio, respectivamente, obtenidas en cada una de las muestras fatigadas térmicamente. Utilizando $K_p = 1,96$. Obteniendo un valor de $U = 0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas máximas y $U = 3,27\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas mínimas.

Para la dureza se utilizó $K_p = 2,57$. Obteniendo una incertidumbre expandida para la dureza en cada muestra. En la muestra sin fatiga $U = 2,70$, para la muestra 1 fatigada $U = 4,24$ y para la muestra 2 fatigada $U = 4,39$

4. Resultados y análisis

La fatiga térmica realizada se vio limitada por la potencia del. Además. Aunque el rango de temperaturas y la cantidad de ciclos no fueron los deseados, nos permitió conocer el comportamiento a la fatiga térmica entre 550°C y $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ en una cantidad de 500 ciclos.

Al fatigar el acero inoxidable 316L entre $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observó que su microestructura no se vio afectada por la fatiga térmica, cuando se compara la microestructura de la muestra sin fatigar con las muestras fatigadas térmicamente

Las imágenes metalográficas tampoco evidencian la formación de fracturas en los materiales. Los resultados sugieren que en este rango de temperaturas y para el tamaño y disposición de las muestras en el horno los gradientes de temperatura no afectaron significativamente la estructura de las muestras fatigadas. Los resultados también sugieren que otras muestras deberían ser analizadas aumentando la longitud de material que esta fuera de bobina de calentamiento. Esto con el objetivo de promover mayores gradientes de temperatura en el cuerpo de la muestra.

Al comparar la dureza de las muestras sin fatiga y después de la fatiga térmica se observó que el material presentó una leve disminución en su dureza (9,4%) , sin embargo, el análisis de incertezas de medición sugiere que estadísticamente no hay una diferencia significativa en los resultados de medición de las muestras. Se descarta la posibilidad de alguna modificación de la estructura como reducción del tamaño de grano debido al proceso de enfriamiento al aire ambiente con un delta de temperatura de alrededor de $680\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para la implementación de termosifones bifásicos de sodio, el acero inoxidable 316L debe ser fatigado a temperaturas más elevadas para observar si cumple o no con los requerimientos necesarios. En este análisis no se contó con el suficiente rango de temperaturas para realizar la fatiga adecuada, por tanto, aunque no se

obtuvieron cambios considerables en su dureza y cambios en su microestructura, no da una garantía de la implementación de termosifones bifásicos de sodio en su máxima eficiencia de transferencia de calor.

El banco de pruebas de inducción electromagnética (Fig 6) construido permite realizar pruebas de fatiga térmica en materiales ferrosos y ferromagnéticos. Con él se puede fundir algunos metales por medio de un crisol que sea utilizado y realizar otro tipo de pruebas afines.



Fig 6. Vista isométrica del banco de inducción electromagnética

La construcción del banco de pruebas tuvo varios desafíos. Entre ellos una limitación de potencia de las fuentes disponibles. El costo de una fuente de potencia mayor superaba el presupuesto del presente trabajo. Para alcanzar una corriente suficiente para este experimento con los recursos disponibles se optó por la conexión en serie de 4 fuentes de menor costo y potencia.

El sistema de control al realizar pruebas por grandes periodos de tiempo, también mostro la necesidad de un rediseño en el sistema control de temperatura. La placa Arduino UNO, presento algunas interrupciones por sobrecalentamiento ocasionando la pérdida de los datos. El código de programación se modificó para realizar la adquisición y muestra de datos mediante el Software CoolTerm. Evitando el uso de la pantalla LCD, encoder y módulo SD, se obtuvieron pruebas ininterrumpidas.

5. Conclusiones

- Fue proyectado y construido un banco de prueba para fatiga térmica por calentamiento por inducción electromagnética. El horno funcionó eficientemente para elevar la temperatura rápidamente en materiales ferrosos y ferromagnéticos hasta su temperatura de Curie. El proyecto del sistema de control y desarrollo del equipo permitió realizar pruebas con ciclos de temperatura 550°C y 700°C.
- EL acero inoxidable 316L al ser fatigado térmicamente a temperaturas entre 550°C y 700°C, no presenta cambios en su microestructura que pueda dar indicios de un posible fallo en un futuro cercano. Las

durezas obtenidas además permiten concluir que el acero inoxidable 316L tampoco presentó cambios en sus propiedades mecánicas para las condiciones de prueba realizadas.

- Las imágenes metalográficas no mostraron diferencias cualitativas apreciables en las microestructuras de las muestras originales de material y las muestras fatigadas térmicamente.

- Para la aplicación de termosifones bifásicos de sodio como intercambiador de calor en el receptor central de plantas termosolares, el acero inoxidable 316L, se hace necesario inducir una fatiga térmica a temperaturas más altas elevadas para evaluar su aplicabilidad.

Referencias

1. Bueso Losada, Guillermo. 2011. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR.
2. Daza, Ivan. 2020. Actualización En Ingeniería Mecánica y Electrónica
3. IEA. 2010. "Concentrating Solar Power Roadmap."
4. Sandoval-Amador, A., A. J. Santander-Vega, C. C. Amaya-Cáceres, H. A. Estupiñán-Duran, and D. Y. Peña-Ballesteros. 2019. "316L Stainless Steel Corrosion in Molten Salts NaNO₃ KNO₃ NaNO₂ Simulating Storage Conditions." in Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1159. Institute of Physics Publishing.
5. GH electrotermia. 2011. "Calentamiento Por Inducción." GH Induction.
6. Quiñonez Salinas, Guillermo. 2007. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENSAYOS DE FATIGA TÉRMICA.
7. Spera, D. A. 1976. THERMAL FATIGUE OF MATERIALS AND COMPONENTS.
8. Askeland, Donald. 2016. Ciencia e Ingeniería de Materiales 7a Edición.
9. Guo, Hang, Qing Guo, Xiao Ke Yan, Fang Ye, and Chong Fang Ma. 2018. "Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of High-Temperature Thermosyphon Charged with Sodium-Potassium Alloy." Applied Thermal Engineering 139:402–8. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.139.

1. INTRODUCCIÓN

Las energías alternativas como la energía solar, denominadas limpias o renovables, son el futuro de las plantas de generación de potencia eléctrica. Como es bien conocido, las centrales termoeléctricas convencionales funcionan con combustibles fósiles que generan residuos y emisiones que contaminan el medio ambiente, además de su evidente influencia en el calentamiento global (Bueso, 2011). El planeta cada vez requiere más energía debido a su crecimiento poblacional y las energías fósiles se encuentran limitadas debido a su agotamiento y costo natural que su uso requiere (Daza, 2020).

En 1891, Clarence Kemp diseñó el primer calentador de agua que aprovechaba la energía solar, dando inicio a investigaciones posteriores acerca de esta tecnología, hasta hoy en día, donde surge como una fuerte alternativa para abastecer la energía mundial. En la energía solar térmica la posición geográfica juega un papel importante, debido a que entre más radiación se obtenga del sol durante el día, mayor eficiencia tendrá una planta de este tipo (Bueso, 2011). La energía solar concentrada *Concentrated Solar Power* (CSP), ofrece una gran ventaja a causa de su capacidad de almacenamiento térmico, por lo tanto, puede producir energía eléctrica en periodos de ausencia de radiación solar. La tecnología CSP también brinda la posibilidad de ser utilizada en procesos industriales. La desventaja que presenta una aplicación CSP es el transporte ineficiente de su energía, ya que sus centrales se encuentran muy alejadas de las grandes ciudades (IEA 2010).

Entre los diversos tipos de centrales de energía solar térmica se encuentra la central de torre solar, donde espejos llamados heliostatos, siguen la trayectoria del sol y reflejan la radiación hacia un receptor que se encuentra en una torre. El calor recolectado en el receptor es transportado por medio de intercambiadores de calor para los almacenadores y otros componentes del proceso de generación eléctrica. Los termosifones bifásicos están siendo estudiados para auxiliar la transferencia de calor desde el colector hasta los generadores impulsados por motores Stirling o turbinas de vapor. Los termosifones son intercambiadores de calor que basan su funcionamiento en el cambio de fase de un fluido de trabajo. En este tipo de aplicaciones, el sodio es empleado como fluido de trabajo para operar en temperaturas que superan los 1000 °C. Los materiales empleados en los modelos experimentales incluyen la aleación Inconel y aceros inoxidable. En la operación, el material del conjunto receptor puede sufrir ciclos térmicos que van desde 700 °C a 1000 °C. Esta operación cíclica puede reducir la vida de los termosifones debido a la fatiga térmica del material. El acero inoxidable 316L es un material que se presenta como una alternativa para ser implementado en esta aplicación debido a su bajo costo en comparación con otros materiales de propiedades similares, su alta resistencia a la corrosión y sus buenas propiedades mecánicas (Sandoval-Amador et al., 2019).

En este sentido, considerando que el material de construcción de los termosifones puede tener fallas por fatiga térmica, en esta investigación se estudió el comportamiento del acero inoxidable 316L sometido a fatiga térmica con temperaturas que oscilan entre 550 °C y 700 °C, con el fin de analizar su posible implementación en termosifones de acero en plantas termosolares tipo torre. Para ello, se analizaron los cambios en la dureza y la microestructura del material, reproduciendo las condiciones físicas a la que se encuentra sujeto el acero en el funcionamiento del termosifón. La producción experimental de los ciclos térmicos se realizó mediante un banco de pruebas de inducción electromagnética que fue construido durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, luego de realizar pruebas de dureza y metalografía, se pudo observar que el acero inoxidable 316L resiste la fatiga térmica inducida. A causa de la potencia del horno, solo fue posible calentar las muestras e inducir la fatiga térmica hasta 700 °C, por tanto, no es posible definir su implementación en termosifones bifásicos de sodio en su máxima eficiencia que ronda los 875° C.

2. JUSTIFICACION

Las centrales de energía solar térmica actualmente son una de las fuentes de energía renovable en desarrollo que más promete en la industria. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es tal vez, uno de los parámetros más importantes al momento de estudiar la viabilidad de un proyecto de este tipo (Bueso, 2011).

La implementación de un termosifón como receptor solar es una tecnología que se está empezando a evaluar como alternativa en el uso de energía solar térmica, usándolo como intercambiador de calor de las sales fundidas. El termosifón contendría en su interior sodio que sería llevado a temperaturas altas, evaporándolo para transferir calor a las sales y condensándose una vez haya perdido el suficiente calor. Las temperaturas oscilarían cíclicamente entre 550 °C y 700 °C, fatigando térmicamente el material que lo contiene, después de varios ciclos de operación.

Esta nueva aplicación para un intercambiador de calor tipo termosifón apenas se empieza a investigar. En este sentido, en esta investigación se hizo un análisis al comportamiento del acero 316L fatigado térmicamente a altas temperaturas con el fin de acelerar el desarrollo de la posible implementación de esta tecnología a futuro, beneficiando a las entidades que evalúan el uso de un termosifón como intercambiador de calor para su uso como receptor solar. Además, el desarrollo de esta investigación conllevó a la construcción de un equipo para calentamiento por inducción electromagnética, brindándole a la Universidad de Pamplona un nuevo equipo para realizar futuras investigaciones donde se requiera calentar rápidamente muestras de material ferroso y ferromagnético para realizar tratamientos térmicos, fatigar térmicamente o realizar algún otro tipo de prueba.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la fatiga térmica en acero inoxidable 316L para aplicación en energía solar concentrada a alta temperatura.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un banco de prueba para fatiga térmica basado en el principio de calentamiento por inducción electromagnética.
- Evaluar la dureza del acero inoxidable 316L antes y después de fatigarlo térmicamente.
- Observar la microestructura del acero inoxidable 316L antes y después de fatigarlo térmicamente.

4. ESTADO ACTUAL

4.1 ANTECEDENTES DE ESTUDIO

Con el paso de los años, el consumo energético global va en aumento, así como también las alternativas energéticas, donde la sustitución de energías fósiles que contaminan el medio ambiente es el objetivo principal de estas nuevas alternativas consideradas energías limpias por su baja o nula contaminación. Entre las fuentes alternativas de energía que más se destacan, se encuentra la energía solar. Las plantas de energía solar térmica son una de estas alternativas prometedoras en la actualidad. Estas plantas requieren ser localizadas en lugares donde haya altos niveles de irradiación solar, lo que supone maximizar la eficiencia de la planta. En la Figura 1 se muestra un mapa global del recurso solar (Bueso, 2011).

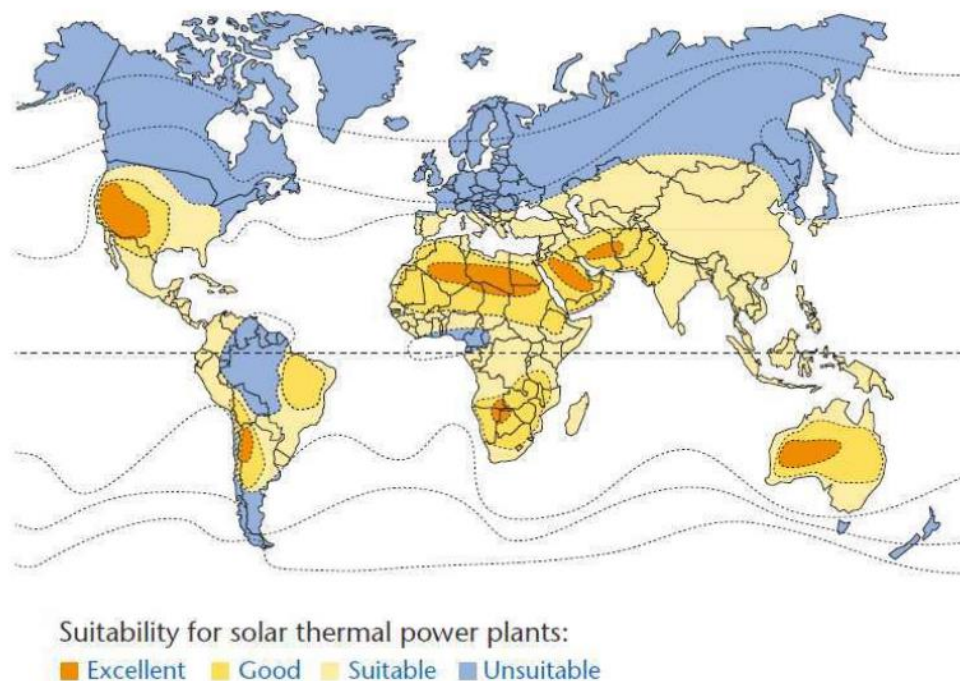


Figura 1. Mapa mundial del recurso energía solar. Fuente: Bueso (2011).

Colombia como se puede visualizar en la Figura 1, se encuentra en una zona aceptable para la implementación de este tipo de plantas. Conjuntamente, se puede observar en la Figura 2 el recurso solar durante el año en todas las regiones de Colombia, en donde, la zona más favorable para la construcción de plantas termosolares se encuentra en la costa caribe, registrando valores máximos de la

orden de 2100 kWh/m² de irradiación global horizontal en el departamento de la Guajira, que es el departamento que más radiación solar recibe durante el año (Figura 3).

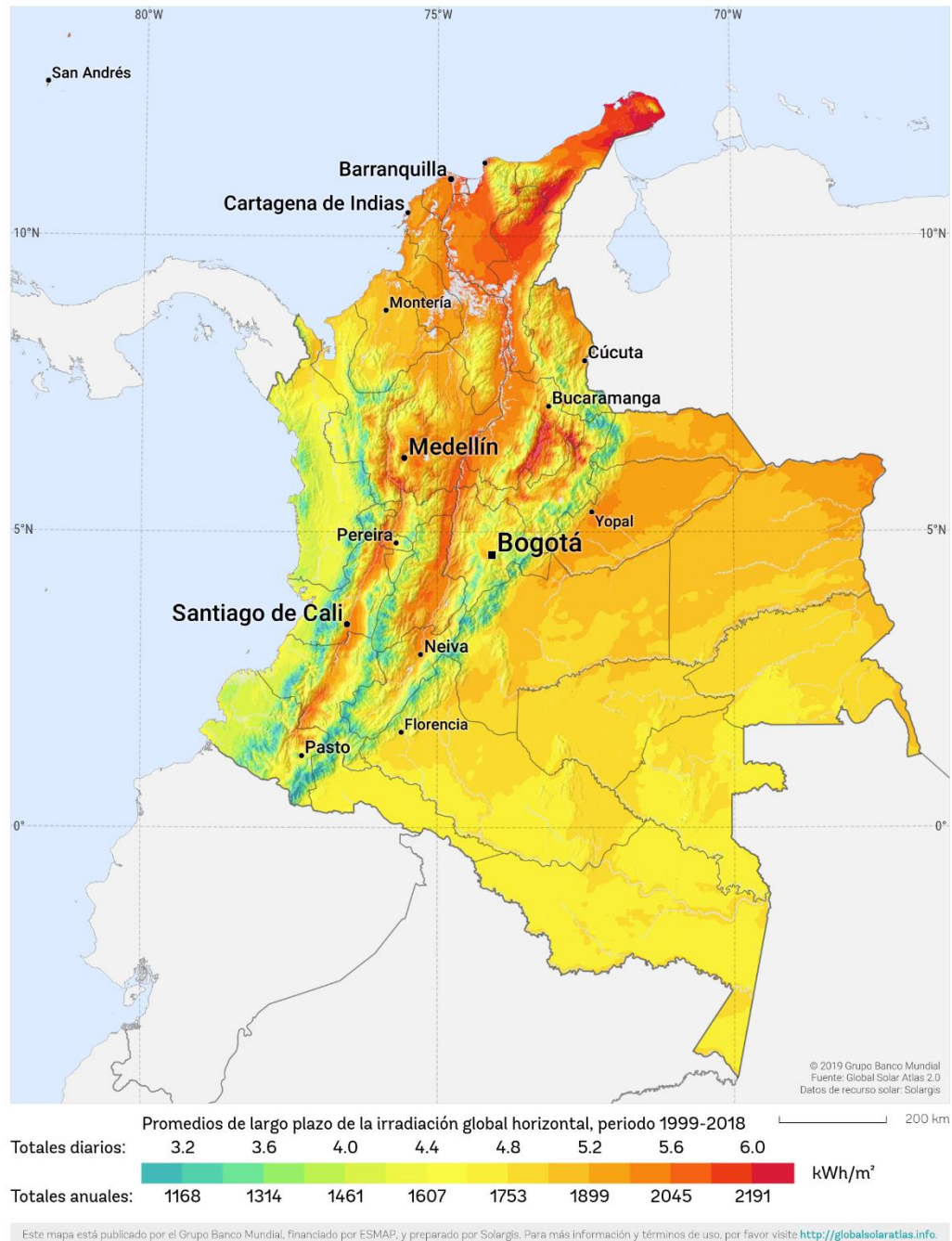


Figura 2. Mapa de recurso solar en Colombia. Fuente: Global Solar Atlas (2022).

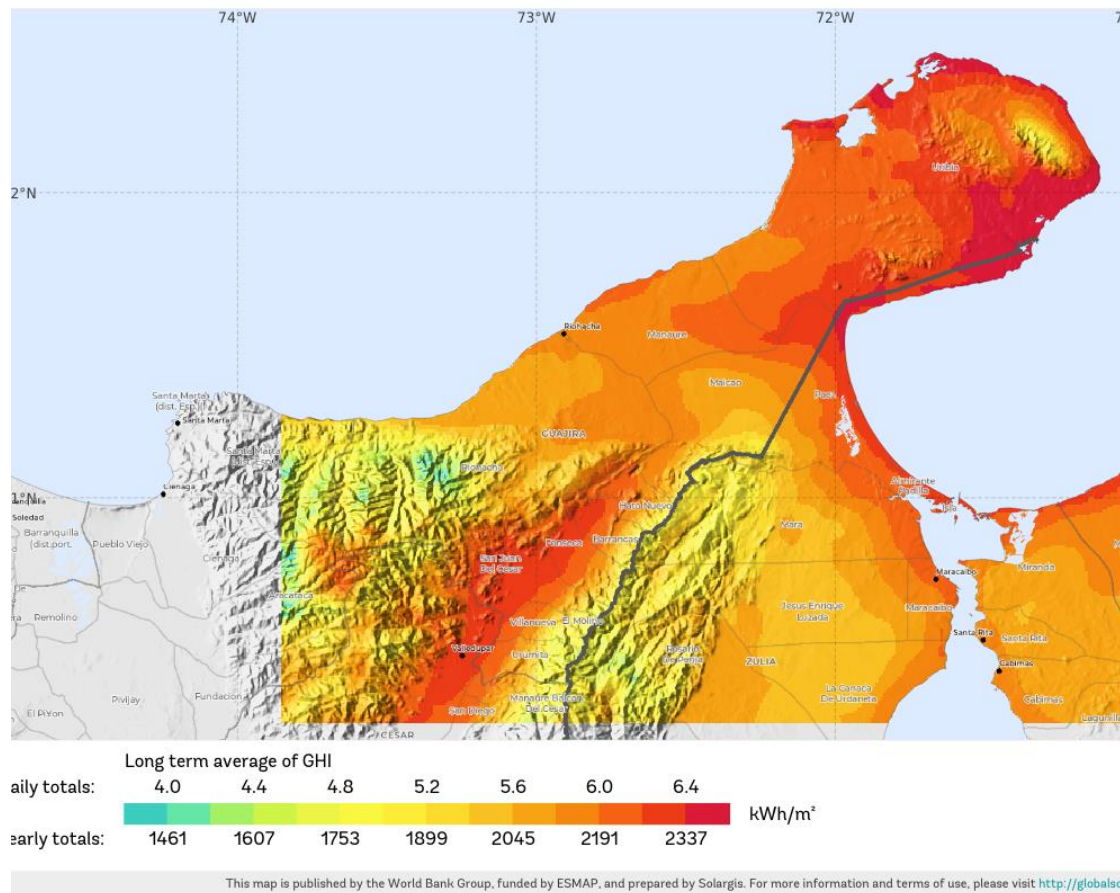


Figura 3. Mapa del recurso solar en la Guajira. Fuente: Global Solar Atlas (2022).

Con relación a la evaluación de la fatiga térmica del acero inoxidable 316L, a continuación, se presentan algunos trabajos encontrados en la literatura técnica.

En probetas cilíndricas de acero inoxidable 316L expuestas a temperaturas externas controladas entre 80 – 650 °C, donde internamente fluye agua a temperaturas entre 25 – 86 °C, se observan cambios en su microestructura, esencialmente, precipitación de carburo M₂₃C₆ cerca de los límites de grano de la superficie exterior (O'Donnell, 1998).

Robertson et al. (2001) investigaron el comportamiento de la fatiga térmica del acero inoxidable 316L entre temperaturas de 350 y 650 K, examinado bajo microscopía electrónica de transmisión (TEM) y simulado mediante dinámica de dislocaciones discretas (DDD) en 3D y elementos finitos, donde no se encontró evidencia del efecto de la temperatura en el deslizamiento de capas transversales que promueva el desgaste de sus propiedades.

La temperatura y las sales fundidas juegan un papel importante al momento de seleccionar materiales adecuados para su correcta implementación en energía solar concentrada. Uno de los materiales más adecuados debido a su alta resistencia a la corrosión es el acero inoxidable 316L, donde comparado con el acero inoxidable 304 mostró tener mejor resistencia a la corrosión ante estas sales fundidas a temperaturas desde 500 °C hasta 600 °C, mediante el estudio electroquímico desarrollado por Li et al. (2022a), presentado en la Figura 4. Además, un estudio a través de pruebas gravimétricas determinó que el acero inoxidable 316L crea una capa protectora compuesta de hematites y óxidos mixtos de hierro, níquel y cromo, y, por tanto, presenta una excelente resistencia a la corrosión (Sandoval-Amador et al., 2019).

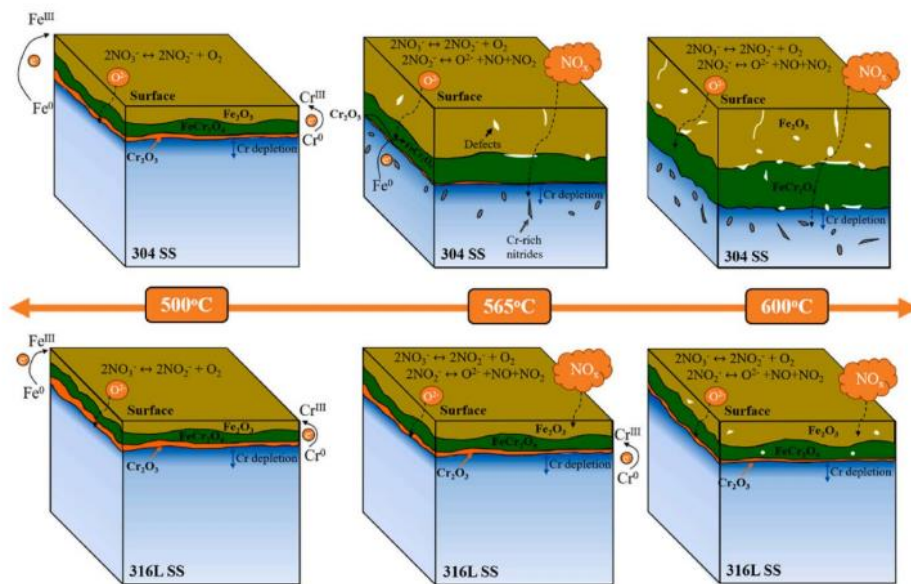


Figura 4. Comparación ante corrosión de Acero inoxidable 316L y 304. Fuente: Li (2022b).

Termosifones con fluido de trabajo de Na-K con una concentración de 55 % de K, fueron expuestos a altas temperaturas. Las temperaturas medidas en sus paredes exteriores por 10 termopares, fueron estudiadas para estimar la eficiencia de la transferencia de calor de estos termosifones, variando la temperatura de entrada por su evaporador entre 650 °C y 875 °C, variando la longitud de su condensador entre 0,19 m y 0,25 m y, además, variando el ángulo de inclinación del termosifón entre 0° y 50°. Los diferentes resultados permitieron observar la influencia de estas variables en la operación del termosifón. La variación de la temperatura de entrada influye en su capacidad de transferencia de calor, en donde, a 875 °C la eficiencia de transferencia de calor está llegando a su límite. La variación de la longitud del condensador influye muy poco a sus temperaturas más óptimas de trabajo siendo insignificante. Finalmente, la variación del ángulo de inclinación tiene gran relevancia en la etapa de arranque del termosifón perdiendo su relevancia por encima de los 825 °C (Guo et al., 2018).

4.2 MARCO TEORICO

4.2.1 Energía solar concentrada, *Concentrated Solar Power* (CSP)

La energía solar concentrada utiliza espejos o lentes que siguen la trayectoria del sol, redireccionando los rayos solares hacia un receptor central que se calienta a altas temperaturas. Posteriormente, se intercambia el calor con sales fundidas que fluyen por la central, donde luego calienta agua, produciendo vapor que hace girar una turbina al expandirse a través de ella, generando energía eléctrica (Daza, 2020). La Figura 5 presenta un ejemplo de una central solar térmica tipo torre.

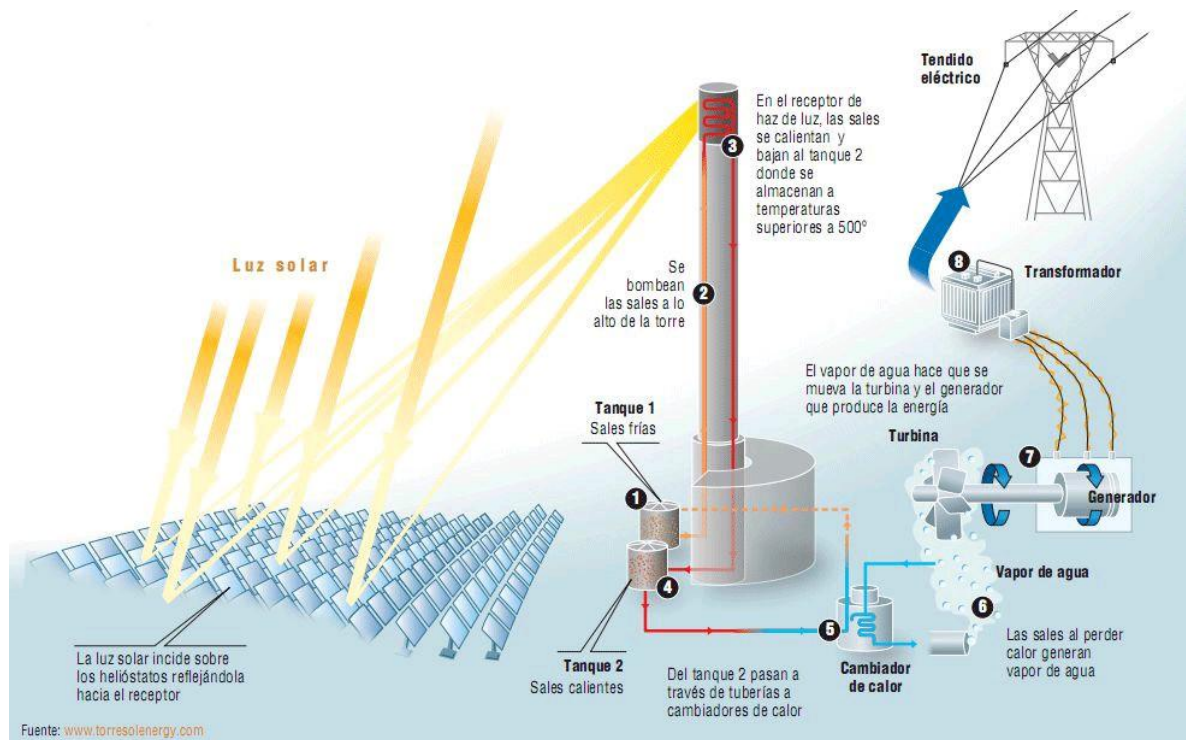


Figura 5. Planta de energía solar térmica tipo torre. Fuente: Rodríguez (2016).

Se estima que la energía solar termoeléctrica en los años 2030 y 2050 llegará a suministrar el 6 % y 12 % de la demanda global de energía eléctrica, respectivamente (Greenpeace International, 2016). Chile es el primer país latinoamericano que cuenta con esta tecnología. La central instalada en Chile es una planta de 110 MW de potencia instalada, consta de 10.600 heliostatos repartidos en 700 hectáreas y una torre receptora de 250 metros de altura. Esta planta evitará la emisión de más de 640.000 toneladas de dióxido de carbono al año. (Forbes Staff, 2021).

4.2.2 Termosifón

Los termosifones son intercambiadores de calor que emplean el cambio de fase de un fluido para el transporte de energía térmica. Están compuesto por un tubo hueco sellado y un fluido de trabajo. Los termosifones están divididos en tres secciones: evaporador, región adiabática y condensador (ver Figura 6). Cuando el calor es inserido en el evaporador, el fluido de trabajo que se encuentra en el interior cambia de fase. El vapor producido fluye hacia el condensador pasando por la sección adiabática. En el condensador el calor es disipado y el fluido nuevamente cambia de fase. El condensado desciende por las paredes internas del tubo iniciando un nuevo ciclo. La selección del fluido de trabajo depende entre otros factores de la temperatura de operación. En aplicaciones de generación termosolar de alta temperatura, el sodio es empleado como fluido de trabajo, alcanzando una temperatura de operación alrededor de 1000 °C (Cisterna et al., 2021).

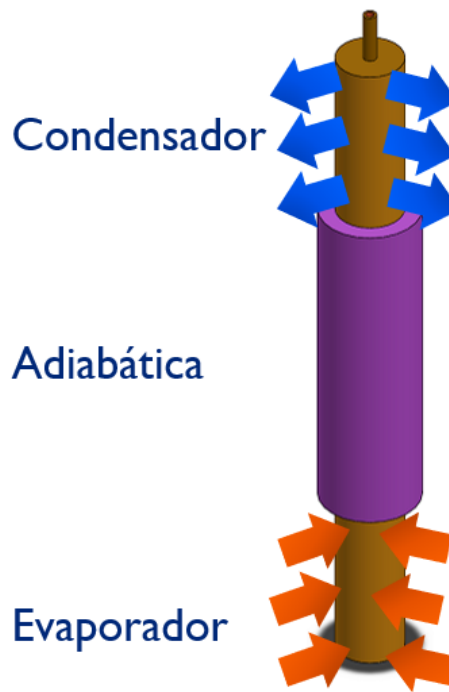


Figura 6. Termosifón bifásico.

4.2.3 Acero inoxidable 316L

El acero inoxidable 316L es un acero inoxidable austenítico cromo-níquel cuyas propiedades lo hacen ideal para trabajar en ambientes donde pueda estar expuesto a ácido sulfúrico, clorhídrico, acético, fórmico y tartárico, además de sulfatos ácidos y cloruros alcalinos. A diferencia del acero inoxidable 316, el 316L por su asignación "L" hace referencia a una cantidad de carbono más baja. Estos comparten básicamente las mismas propiedades físicas mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Propiedades físicas del acero inoxidable 316L. Fuente: Jnblog (2019)

PROPIEDAD	CANTIDAD	UNIDAD
Densidad	0,799	g/cm ²
Resistencia eléctrica	74	μΩ·cm
Calor específico	0,5	kJ/kg·K
Conductividad térmica	16,2	W/m·K
Módulo de elasticidad	193000	MPa
Rango de fusión	2500 - 2550	°F
	1371 - 1399	°C

La composición química del acero inoxidable 316L se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades químicas del acero inoxidable 316L. Fuente: Jnblog (2019)

Elemento	Tipo 316L (%)
Carbón	0,03 máx.
Manganeso	2,00 máx.
Fósforo	0,045 máx.
Azufre	0,03 máx.
Silicio	0,75 máx.
Cromo	16,00 – 18,00
Níquel	10,00 – 14,00
Molibdeno	2,00 – 3,00
Nitrógeno	0,10 máx

4.2.4 Calentamiento por inducción

El calentamiento por inducción es utilizado principalmente para realizar tratamientos térmicos en metales. Es un proceso muy veloz, de fácil control y alta eficiencia energética. Su principio de funcionamiento se basa en la Ley de Faraday. Una bobina actúa como inductor, alimentada con corriente alterna genera un campo magnético y una pieza metálica atravesada por este campo magnético experimenta la inducción de corrientes de Foucault. Estas corrientes fluyen en contra de la resistividad eléctrica de la pieza metálica generando así calor, obedeciendo la ley de Joule. Este calentamiento puede llevar a una pieza a temperaturas muy elevadas o fundirlas, en pocos segundos, teniendo una eficiencia energética de 90 %, además de poder tener un control preciso sobre su calentamiento (GH electrotermia, 2011).

4.2.4.1 Ley de Faraday

La ley de Faraday establece que la FEM (Fuerza electromotriz) inducida en un solenoide o bobina es proporcional a la variación respecto al tiempo del flujo magnético que atraviesa el solenoide. La ecuación (1) presenta la ley de Faraday.

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

donde ε es la FEM inducida, N es el número de vueltas de la bobina y $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ es la variación del flujo magnético respecto al tiempo.

4.2.5 Fatiga térmica.

La fatiga térmica ocurre cuando hay cambios cíclicos de temperatura lo que genera tensiones por la expansión y contracción debido al calentamiento y enfriamiento del material, respectivamente. La fatiga térmica es un proceso que se da gradualmente en un material donde se puede dar distorsión, agrietamiento superficial y ruptura. Esta puede ser contribuyente a la falla de un equipo o simplemente ser la causa principal, teniendo varias consideraciones. En primera instancia cuando ocurre un ciclo mecánico en una gran área y esfuerzos térmicos moderados. Luego en un choque térmico con bastante diferencia de temperatura que sea lo suficientemente grande, ocasionando fallas en muy pocos ciclos o en su defecto en un solo ciclo. Finalmente, una región de falla por termofluencia (*creep*) a causa de ciclos térmicos y cargas mecánicas frecuentes (Quiñónez, 2007).

Se pueden diferenciar algunos tipos de fatiga térmica como aquellos que contienen restricciones internas, externas o ambas. La restricción interna puede darse por gradientes de temperatura o por anisotropía en la estructura con distintas fases. La restricción externa ocurre cuando hay restricciones para que el elemento pueda expandirse térmicamente, ya sea por espacio o carga mecánica (Spera, 1976).

Existen algunos factores a considerar cuando un material sufre fatiga térmica.

1. Parámetros de proceso: frecuencia de los ciclos, temperatura máxima y amplitud de los ciclos.
2. Propiedades del material: difusividad térmica, conductividad térmica y dilatación. Teniendo en cuenta oxidación, envejecimiento, transformaciones de fase y precipitación de carburos que posiblemente haya sufrido el material.
3. En caso de una estructura multilateral, las propiedades químicas y mecánicas de los diferentes materiales.

Analizar la microestructura de los materiales expuestos a fatiga térmica antes y después de cada prueba de fatiga térmica es muy importante, ya que se pueden generar vacancias ocasionadas por el movimiento de dislocaciones durante el ciclo

térmico, que puede resultar en microgrietas en las fronteras de grano. Además, las inclusiones suelen convertirse en concentradores de esfuerzos cuando su coeficiente de expansión térmica y módulo de elasticidad es diferente al de la matriz (Quiñónez, 2007).

4.2.6 Prueba metalográfica

La prueba metalográfica es el estudio de la microestructura donde se relacionan las propiedades mecánicas y composición química de un metal-aleación. Existen dos tipos de pruebas metalográficas, una macrografía que va hasta 10 aumentos y una micrografía que va hasta 1000 aumentos.

Las probetas se acondicionan siguiendo la norma ASTM E3. La Figura 7 muestra una metalografía de 100x para un acero inoxidable 316L. De acuerdo con el procedimiento sugerido por la norma, primero se debe pulir la superficie que va a estar expuesta al microscopio, pasando la muestra desde abrasivos ásperos a más finos, puliendo de manera perpendicular con cada abrasivo hasta conseguir una superficie semejante a la de un espejo. Posteriormente, se ataca químicamente con Agua regia la cara pulida de la muestra, para así proceder a examinarla microscópicamente.

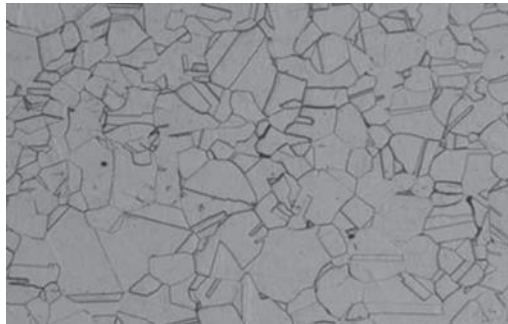


Figura 7. Microestructura del acero inoxidable 316L a 100X. Fuente: Vega (2012).

4.2.7 Prueba de dureza

La dureza es la resistencia del material a ser rayado o a la indentación. La prueba de dureza arroja la resistencia a la penetración superficial de un material. Se conocen varias pruebas de dureza, pero generalmente se utilizan la prueba de dureza Rockwell y la prueba de dureza Brinell. En la dureza Rockwell se conocen algunas variaciones, donde su utilización depende del material de prueba (Askeland, 2016).

Para materiales normalmente muy duros se utiliza la prueba de dureza Rockwell A (HRA) que utiliza un cono de diamante para penetrar la muestra, ejerciendo una fuerza de 60 kgf. Las pruebas Rockwell proporciona un número adimensional de dureza que es utilizada como base cualitativa para ser comparada con otros

materiales, correlacionarla con otras propiedades, control de calidad, especificaciones para fabricarlos y tratamiento térmico (Askeland, 2016).

En aceros inoxidables dúplex se demostró que la dureza y la resistencia a la tracción aumentaron cuando se les hizo envejecimiento térmico contrario a la ductilidad y tenacidad. La vida útil por fatiga térmica se puede predecir con la variación de su dureza (Guo et al., 2018).

5. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

La metodología abordada en el desarrollo del presente proyecto está compuesta por las siguientes etapas.

5.1 CONSTRUCCION DEL BANCO DE EXPERIMENTOS

El banco de experimentos consistió en un banco de inducción electromagnética (horno de inducción), adecuado para fatigar térmicamente las muestras de acero inoxidable 316L.

Para la construcción del banco de experimentos primero se realizó un diseño conceptual del equipo. Seguidamente se realizó la búsqueda de los materiales necesarios para su construcción, el diseño CAD del banco, la programación del código requerido para su funcionamiento y finalmente, se procedió a su ensamblaje.

5.1.1 Selección de componentes

Inicialmente, se optó por elegir los componentes mostrados de la Figura 8 a la Figura 25.

Se realizó la compra de un módulo de calentamiento por inducción de 1800 W (Figura 8) que idealmente trabaja con máximo 48 V y 40 A. Por cuestiones económicas se eligieron 4 fuentes conmutadas de 12 V y 30 A (Figura 9), que van conectadas en serie para así sumar sus voltajes, obteniendo un total de 48 V.

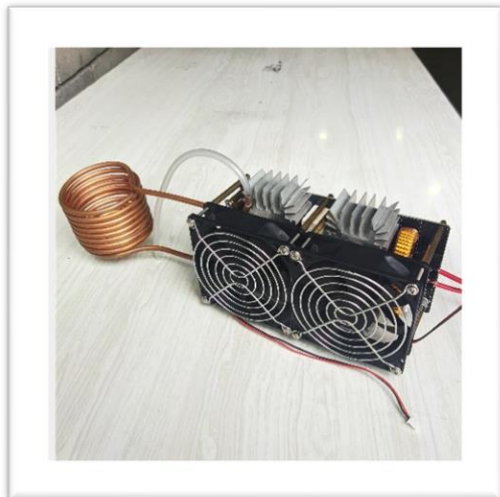


Figura 8. Módulo de calentamiento por inducción.

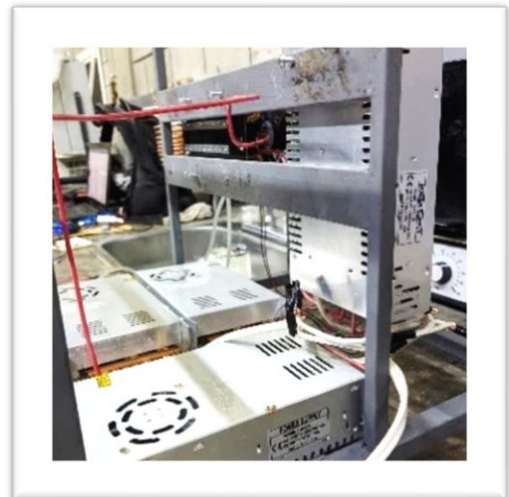


Figura 9. Fuentes de alimentación

Para el encendido y apagado del módulo (Figura 8) se seleccionó un relé de estado sólido de 40 A (Figura 10), controlado por una señal de entrada de 3-32 V DC mediante la placa Arduino (Figura 13) y una corriente a controlar entre 5-60 V DC. Para un encendido y apagado manual, cuando no se requiera seguir utilizando el horno en medio de una prueba o para un caso de emergencia, se utiliza un breaker de 40 A (Figura 11). Este requiere estar en ON cada vez que se desee utilizar el horno ya que se encuentra en la fase del circuito.



Figura 10. Relé de estado sólido.



Figura 11. Breaker.

Para las conexiones entre la fuente de alimentación (Figura 9) y el módulo (Figura 8), el cable AWG 10 (Figura 12) es suficiente, ya que soporta 30 A. La placa Arduino UNO (Figura 13) es un microcontrolador de código abierto ideal para este tipo de proyectos educativos.



Figura 12. Cable AWG 10

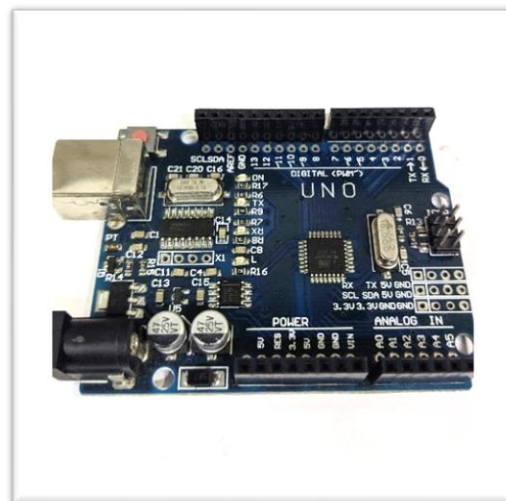


Figura 13. Placa Arduino UNO

Por facilidad y para ahorrar pines en la placa (Figura 13), se utiliza un módulo I2C (Figura 14), soldado en la parte posterior de la pantalla LCD 16x2 (Figura 15). La pantalla LCD muestran los datos en tiempo real del termopar tipo K (Figura 17). Este termopar tiene una capacidad de 0 a 1300 °C y va conectado al módulo MAX6675 (Figura 16) que trabaja en un rango de temperaturas de 0 a 1023 °C.

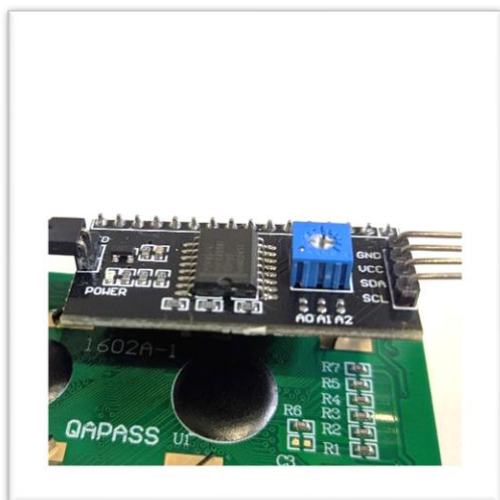


Figura 14. Modulo I2C



Figura 15. Pantalla LCD 16x2



Figura 16. Módulo MAX6675.



Figura 17. Termopar tipo K.

Para la adquisición de datos se seleccionó un módulo micro SD (Figura 18), en donde la micro SD debe estar en un formato FAT para memorias viejas y FAT32 para memorias modernas, esencialmente. El módulo encoder rotativo KY-040 (Figura 19) facilita la navegación por un menú de opciones a través de la pantalla LCD.



Figura 18. Módulo micro SD.

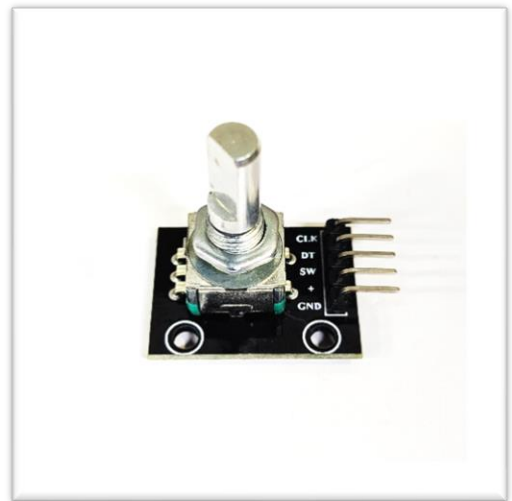


Figura 19. Módulo KY-040.

Las conexiones de todos estos componentes mencionados anteriormente se realizaron mediante Jumpers (Figura 20) macho-macho y macho-hembra según haya sido necesario.

Una mini bomba de 5V y 0,3 A (Figura 21) fue instalada para ayudar a la refrigeración de la bobina de cobre ubicada en el módulo de calentamiento por inducción (Figura 8), bombeando agua desde el tanque de almacenamiento (Figura 22).

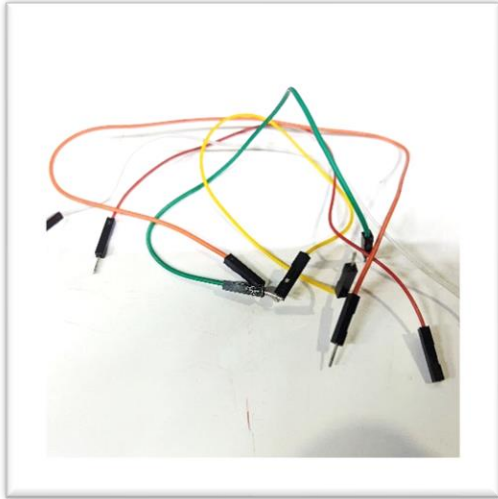


Figura 20. Jumpers.



Figura 21. Mini bomba.

El agua posteriormente pasa por el Radiador (Figura 24), hecho artesanalmente con tubo de cobre de 1/4" y latas de bebidas gaseosas. La estructura (Figura 25) donde se ensamblaron todos los componentes fue fabricada con tubo de acero estructural.



Figura 22. Tanque de almacenamiento de 4 litros.



Figura 23. Manguera de silicona 4 mm.



Figura 24. Radiador.



Figura 25. Estructura.

5.1.2 Diseño CAD

El diseño del banco de pruebas de inducción electromagnética se realizó en el *Software CAE SolidWorks*, considerando las dimensiones del módulo de calentamiento por inducción, sus cuatro fuentes de poder y demás componentes mencionados en el ítem anterior. La Figura 26 muestra el diseño del banco de pruebas.

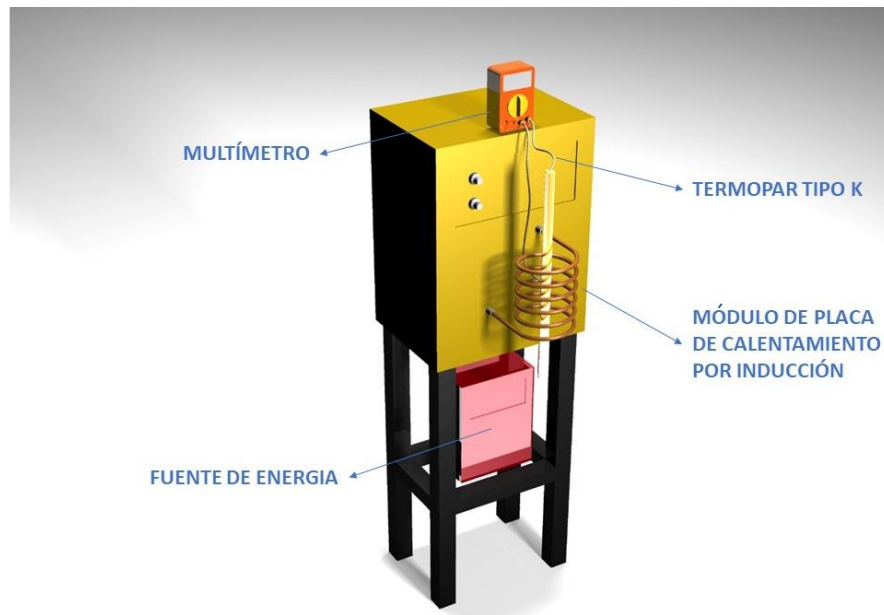


Figura 26. Banco de pruebas de inducción electromagnética.

5.1.3 Programación en Arduino

Para facilitar la realización de la programación en la plataforma de Arduino, inicialmente se hizo un diagrama de flujo (Figura 27) que a grandes rasgos brinda el camino a seguir o ayuda a visualizar de una mejor manera el futuro código de programación.

El código de programación desarrollado se presenta en el Anexo 1.

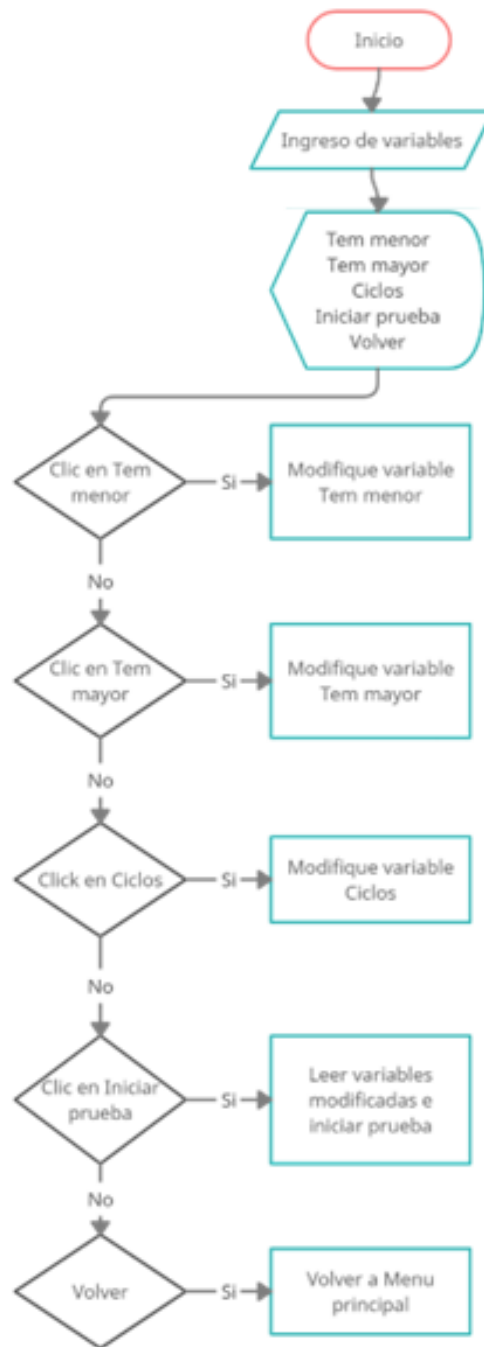


Figura 27. Diagrama de flujo de la programación.

5.1.4 Ensamblaje

Para poder realizar el respectivo ensamblaje se perforaron agujeros en la estructura de acero, donde posteriormente se atornillaron el módulo de inducción y las 4 fuentes de poder (Figura 28) y se realizaron las respectivas conexiones con el cable AWG 10, mostradas en la Figura 29.

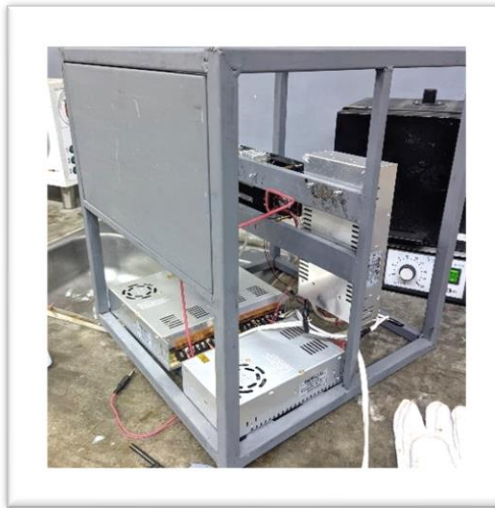


Figura 28. Ensamblaje del banco de pruebas.

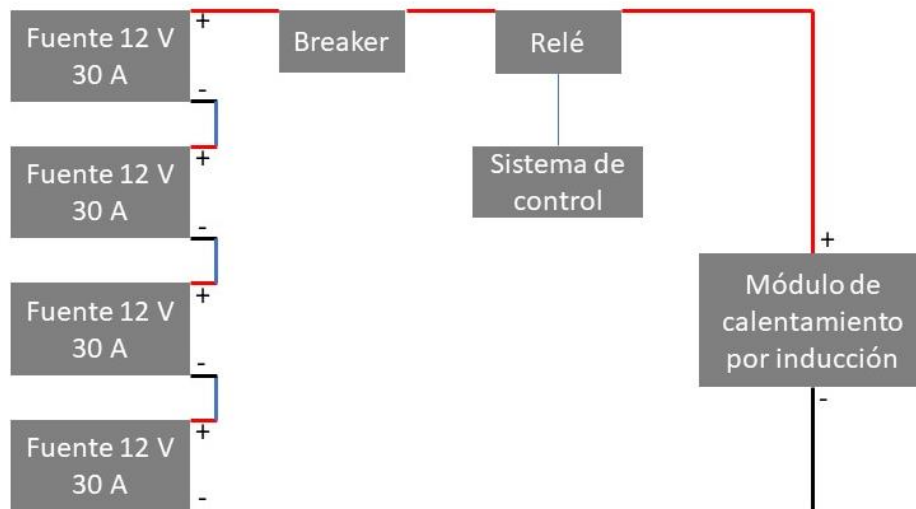


Figura 29. Esquema de conexiones del ensamblaje del banco de pruebas.

Posteriormente se perforaron los agujeros donde se instaló el sistema de control y finalmente se pintó la estructura para darle un acabado más estético (Figura 31). El sistema de control se instaló en una base de plástico adicional (Figura 30).

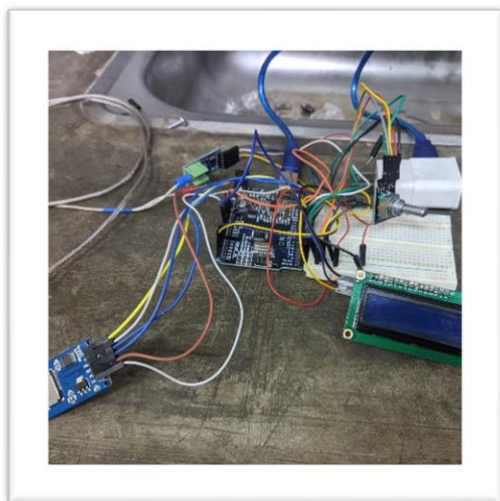


Figura 30. Ensamblaje sistema de control.



Figura 31. Estructura pintada.

Para el sistema de control se realizó la conexión de la pantalla LCD conectada directamente al módulo I2C pin a pin y el termopar tipo K conectado al módulo MAX6675. Posteriormente, estos y los demás componentes se conectaron directamente a los pines de la placa Arduino, respectivos al código de programación. Dicha conexión es mostrada en la Figura 32.

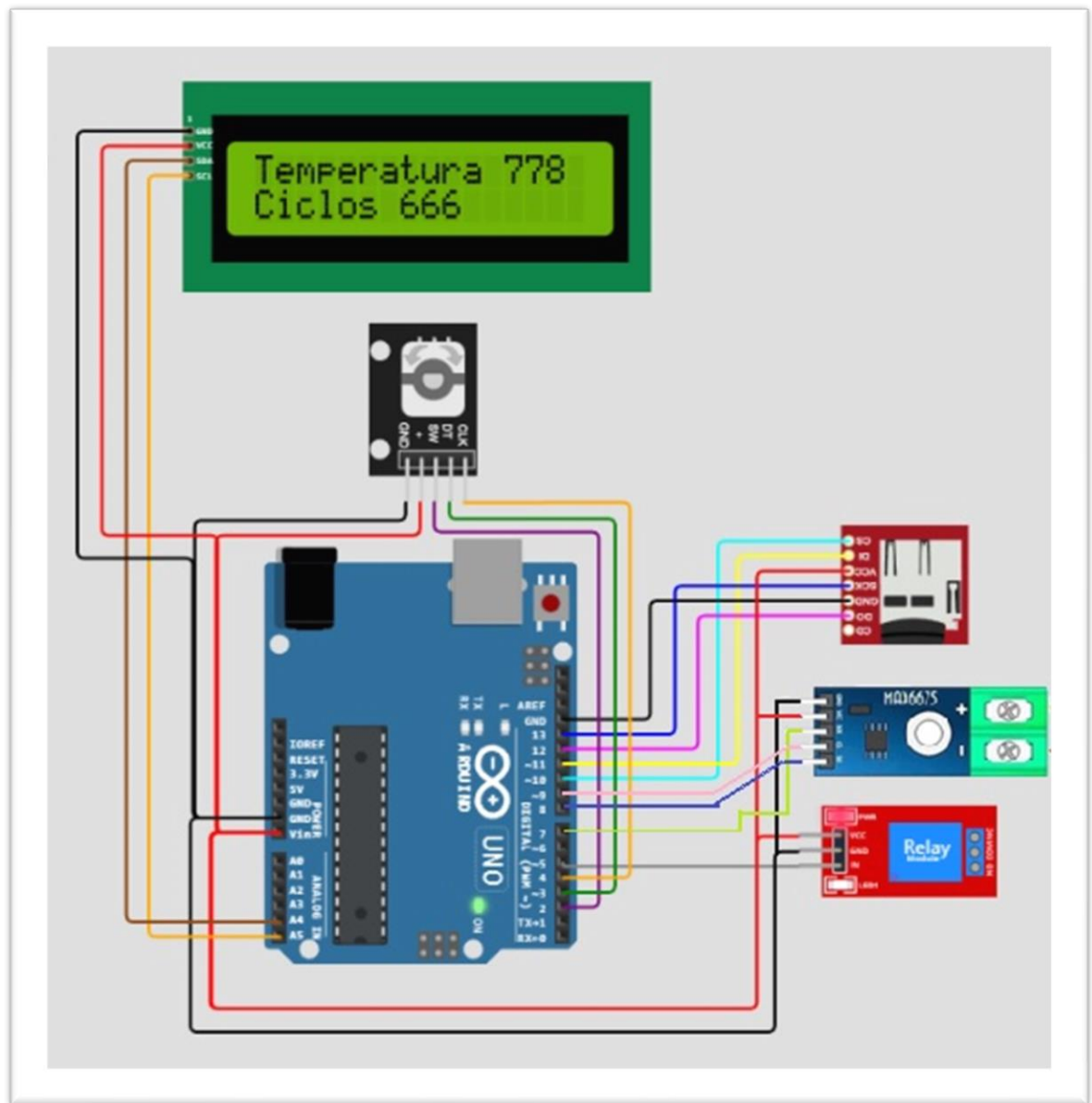


Figura 32. Conexiones del sistema de control.

Los pines de la placa Arduino conectados al módulo I2C de la pantalla LCD 16x2 por defecto deben ser A4 y A5 de la placa Arduino con SDA y SCL del módulo, respectivamente. De igual forma, la conexión del módulo micro SD cuenta con pines de salida MISO, MOSI y SCK que deben ir estrictamente conectados a los pines 12, 11 y 13 de la placa Arduino, respectivamente.

Después se procedió a fabricar un sistema de refrigeración (Figura 33) en donde la mini bomba y los ventiladores dispuestos en el módulo de calentamiento por inducción están conectados fuera del sistema de control ya que se requiere que estén en funcionamiento continuamente, disipando el calor de la bobina de cobre y

los transistores con ayuda del radiador. Este radiador está conectado mediante manguera de silicona a la bobina de cobre y a un tanque de almacenamiento.

Una vez en funcionamiento el horno de inducción y hasta su posterior apagado, la mini bomba bombea agua desde el tanque de almacenamiento hacia la bobina, donde el agua gana energía en forma de calor, disipándolo posteriormente por el radiador y los ventiladores. Finalmente, el agua retorna nuevamente al tanque de almacenamiento.

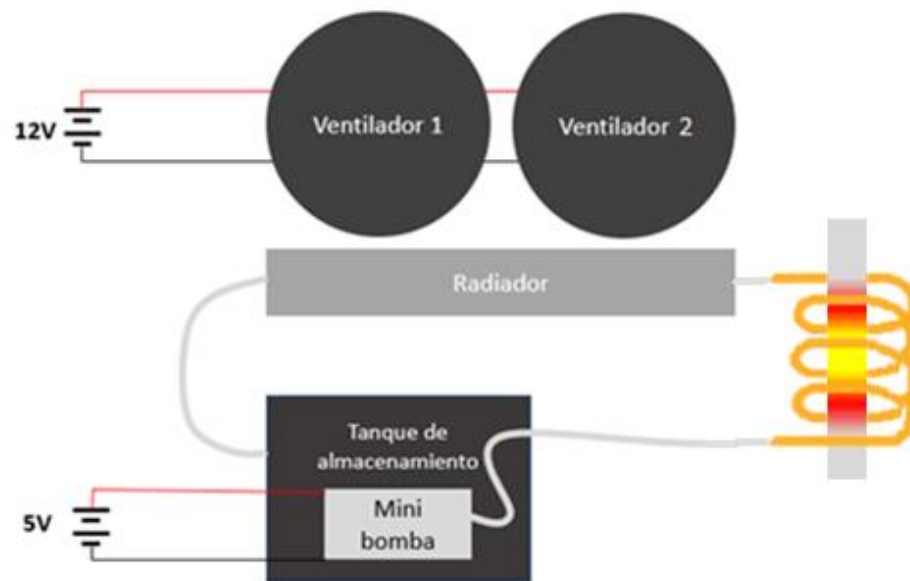


Figura 33. Esquema de conexiones del sistema de refrigeración.

5.2 FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE INDUCCION ELECTROMAGNÉTICA

El banco de inducción electromagnética construido genera calor a partir de una bobina de cobre por donde se hace circular una corriente eléctrica que genera una frecuencia capaz de calentar metales ferrosos y ferromagnéticos que se encuentren cerca de este campo. Este horno tiene la capacidad de calentar muy rápidamente el material expuesto.

5.2.1 Menú de opciones

Para la navegación por el menú de opciones mostrado en la pantalla LCD se emplea el encoder rotatorio. Una flecha en la parte izquierda indica la posición actual. Giro hacia la derecha cambia de posición descendentemente, caso contrario, ascendentemente. Al pulsar el encoder en donde se encuentra la flecha elige esa opción y envía hacia otro menú.

Inicialmente se muestran cinco opciones, “T menor”, “T mayor”, “Ciclos”, “Iniciar prueba” y “Volver”. Se llenan los datos de acuerdo a la prueba a realizar. Para llenar los datos se debe pulsar el encoder en la variable a modificar, luego rotar para variar el valor hasta llegar al valor deseado y pulsar nuevamente para volver a modificar las demás variables, si es el caso. Con las variables ajustadas según se requiera, se procede a dar inicio a la prueba presionando en “Iniciar prueba”. En el caso de querer volver al menú principal se pulsa en “Volver” (ver Figura 34).



Figura 34. Navegación por menús.

5.2.2 Acondicionamiento del banco e inicio de pruebas

El banco de inducción electromagnética construido se acondiciona de la siguiente manera para iniciar su operación:

1. Atornillar el termopar a la muestra y colocarla encima de un material refractario. Asegurarse que la posición donde está atornillado el termopar coincida con el centro de la bobina.
 2. Insertar la tarjeta SD (Formato FAT o FAT32).
 3. Conectar a un toma corriente que suministre 110V. La instalación eléctrica debe tener la capacidad de soportar 30 o más amperes.
 4. Poner en estado ON el *Breaker* o interruptor, este además sirve como apagado de emergencia o interrupción de prueba, si es el caso.
 5. Rectificar que el sistema de refrigeración esté en funcionamiento.
 6. La Pantalla LCD deberá estar encendida. Modificar variables según el caso e iniciar la prueba.
- Una vez finalizada la prueba se retira la micro SD en donde se encuentra un archivo llamado "Prueba" en formato .txt.

5.3 PRUEBA METALGRÁFICA Y DE DUREZA SIN FATIGA TÉRMICA

5.3.1 Preparación de las muestras

El Acero inoxidable 316L utilizado en esta investigación no se pudo conseguir en Colombia y por tanto, se requirió la importación del mismo. El material adquirido cumple con las normas ASTM A270-S2 y 3A.

Se necesitaban 2 probetas en acero inoxidable 316L de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y 10 cm de largo (Figura 36). Comercialmente se encontró disponible un tubo de 12" de largo (304,8 mm), el cual se cortó en tres partes. Si en el plano de corte de la muestra, donde se realizan las pruebas de metalografía y dureza, la temperatura se eleva demasiado durante el proceso de corte, se puede modificar la microestructura del acero, afectando así la correcta caracterización de la muestra.



Figura 35. Tubos de 12" de acero inoxidable 316L.

El corte se realizó de tal manera que no se elevara demasiado la temperatura del acero, evitando así alterar la microestructura del mismo. Realizando el corte con una pulidora se obtuvo un buen resultado.

A estas muestras se les hizo un agujero en un extremo con el fin de ajustar el termopar tipo K con un tornillo, siendo este punto, la parte de la muestra que durante la prueba está justo en el centro de la bobina, donde la temperatura llegará a su punto máximo.



Figura 36. Probetas de 10 cm de acero inoxidable 316L.

5.3.2 Caracterización de las muestras

La caracterización de las muestras sin fatiga térmica se realizó inicialmente como base de comparación con las muestras sometidas a los ciclos térmicos aplicados más adelante.

En primera instancia se hizo un análisis metalográfico, observando la microestructura del acero presentada en la Figura 37 y la Figura 38. Posteriormente se realizaron pruebas de dureza del acero (Figura 39), obteniendo las durezas mostradas en la Tabla 7.



Figura 37. Microestructura sin fatigar del acero inoxidable 316L. Aumento 200X

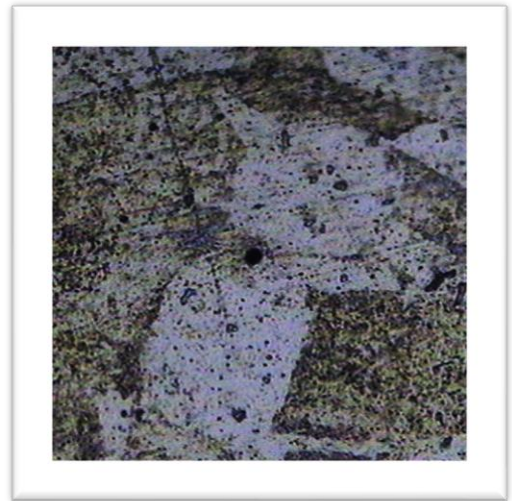


Figura 38. Microestructura sin fatigar del acero inoxidable 316L. Aumento 1000X



Figura 39. Prueba de dureza inicial.

Tabla 7. Dureza Rockwell A del acero inoxidable 316L sin fatigar.

Prueba	Dureza Rockwell A
1	44,2
2	45,2
3	44,2
4	43,2
5	42,1
Promedio	43,78

5.4 INDUCCIÓN DE FATIGA TERMICA

En el banco de prueba construido, ilustrado en la Figura 53, se introdujeron las muestras con el termopar tipo K atornillado, ubicándolo de tal manera que proporcionara los datos en tiempo real de la temperatura justo en el centro de la bobina como se muestra en la Figura 40, donde la temperatura se incrementa rápidamente.



Figura 40. Ubicación de la muestra

Según lo descrito en el ítem 5.2, se encendió el equipo, se configuraron los datos de la prueba de fatiga térmica requerida y se realizaron las pruebas. Los datos configurados son $T_{máx} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{mín} = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Ciclos = 500.

Se indujo calor a las muestras hasta llevarlas a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, posteriormente, se dejaron enfriar en las condiciones ambientales de la sala hasta $550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este procedimiento se llevó a cabo durante 500 ciclos en cada una de las muestras para fatigarlas térmicamente. En la Figura 41 se presenta una muestra de acero inoxidable 316L en el proceso de fatiga térmica.

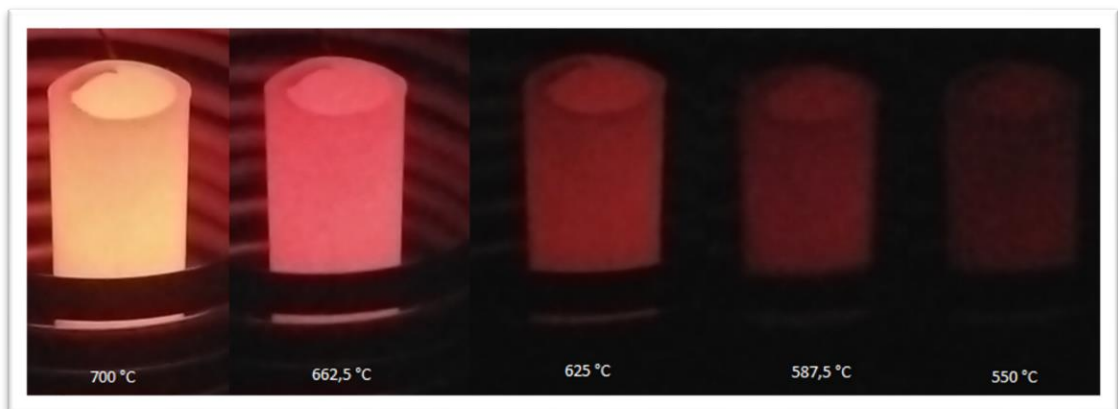


Figura 41. Muestra de acero inoxidable 316L siendo fatigada térmicamente.

Se graficaron y analizaron los datos obtenidos. En la Figura 42 se observa una gráfica de fatiga térmica desde su inicio hasta un tercer ciclo y en la Tabla 8 se muestran los datos a evaluar.

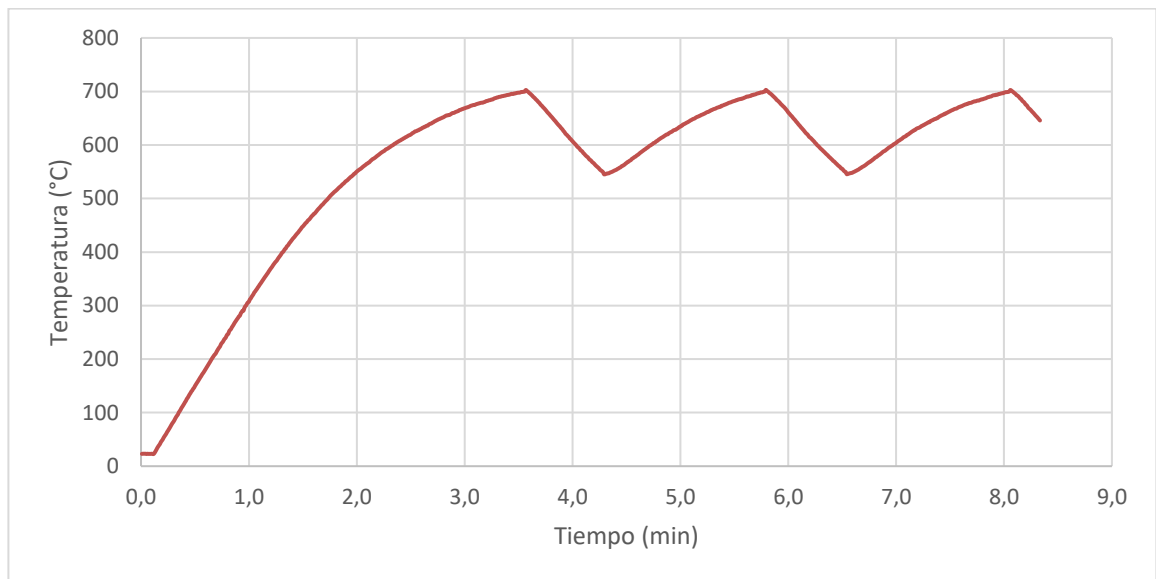


Figura 42. Gráfica de fatiga térmica

Tabla 8. Datos de la prueba de fatiga térmica.

No. Muestra	Tiempo promedio entre ciclos (min)	Temperatura menor promedio (°C)	Temperatura mayor promedio (°C)	No. Ciclos	Tiempo total (horas)
1	2,74	538,19	701,73	500	22,8
2	2,78	535,83	701,81	500	23,2

5.5 PRUEBAS METALGRÁFICAS Y DE DUREZA CON FATIGA TÉRMICA

Una vez fatigadas térmicamente las 2 probetas de acero inoxidable 316L, se procedió a preparar las muestras para la prueba metalográfica.

5.5.1 Preparación de las muestras

Primero se cortaron las probetas en dos partes, justo en donde coincidía el plano central de la bobina con la probeta, ya que en este plano es donde la temperatura fue medida por el termopar tipo K. Luego, con una de las dos partes se procedió a adecuar la superficie con el equipo mostrado en la Figura 49.

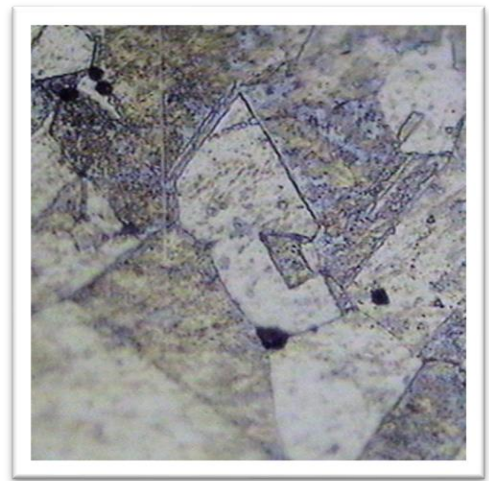
El corte se realizó de tal manera que no se elevara demasiado la temperatura del acero, evitando así alterar la microestructura del mismo. Realizando el corte con una pulidora se obtuvo un buen resultado.

5.5.2 Prueba metalográfica

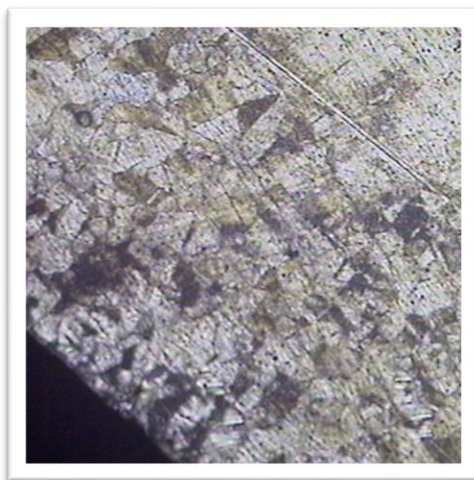
Finalmente, se realizaron las pruebas metalográficas de 200X y 1000X a cada una de las tres probetas con el microscopio metalográfico mostrado en la Figura 50, según lo descrito en el ítem 4.2.6. Las pruebas metalográficas se presentan desde en la Figura 43 a la Figura 46.



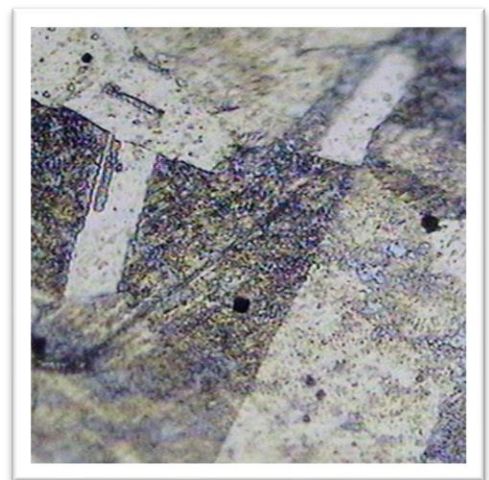
**Figura 43. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 200X
Probeta 1 fatigada térmicamente.**



**Figura 44. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 1000X
Probeta 1 fatigada térmicamente.**



**Figura 45. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L. Aumento de 200X
Probeta 2 fatigada térmicamente.**



**Figura 46. Microestructura de la muestra de acero inoxidable 316L Aumento de 1000X
Probeta 2 fatigada térmicamente.**

5.5.3 Prueba de dureza

En la prueba de dureza primero se adecuó el durómetro presentado en la Figura 51, eligiendo una base adecuada para la muestra y su respectivo indentador, además de elegir la prueba Rockwell A en las configuraciones del equipo. La prueba se realizó 5 veces con cada probeta para así tener un valor promedio de dureza y cada una de ellas se llevó a cabo radialmente cerca del corte. Este ensayo se hizo bajo la norma ASTM E18-20, siendo este el método de prueba estándar. Las pruebas de dureza de las tres probetas son mostradas en la Figura 47 y Figura 48, y los respectivos resultados se presentan en la Tabla 9 y Tabla 10.



Figura 47. Pruebas de dureza - Probeta 1 fatigada térmicamente.

Tabla 9. Dureza Rockwell A - Probeta 1 fatigada térmicamente.

Prueba	Dureza Rockwell A
1	44,2
2	44,7
3	41,5
4	42,5
5	40,9
Promedio	42,76



Figura 48. Prueba de dureza - Probeta 2 fatigada térmicamente.

Tabla 10. Dureza Rockwell A - Probeta 2 fatigada térmicamente.

Prueba	Dureza Rockwell A
1	35,3
2	37,5
3	37,7
4	34,2
5	38,1
Promedio	36,56

5.5.4 Equipos utilizados

Los equipos utilizados para realizar la prueba de metalografía y la prueba de dureza fueron una pulidora, un microscopio metalográfico y un durómetro, mostrados en la Figura 49, Figura 50 y Figura 51.



Figura 49. Pulidora BUEHLER Ecomel.



Figura 50. Microscopio metalográfico Olympus GX41.



Figura 51. Durómetro Wilson Rocwell.

5.6 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES DE LAS MEDICIONES

Todo proceso de medición involucra incertidumbres sobre el valor verdadero. En el presente proyecto fueron medidas dos variables, la temperatura durante el proceso de fatiga térmica y la dureza de las muestras. En este contexto, se determinaron las respectivas incertidumbres expandidas de estas dos variables.

Para cada conjunto de datos medidos, se determinó la incertidumbre tipo A como la desviación estándar de la media, para ello se usó la función DESVEST.M en Excel. Posteriormente, se determinó la incertidumbre expandida conforme la ecuación (2).

$$U = k_p u \quad (2)$$

donde,

U : incertidumbre expandida

k_p : factor de cobertura

u : desviación estándar

Considerando una probabilidad de 95 %, el factor de cobertura es $k_p = 1,96$ para infinitos grados de libertad, en el caso de los datos de temperatura y $k_p = 2,57$ para cinco grados de libertad, en el caso de los datos de dureza.

5.6.1 Incertidumbres en la fatiga térmica

En la Tabla 11 y la Tabla 12 se muestra la desviación estándar equivalente a la temperatura máxima y mínima, respectivamente, obtenidas en cada una de las muestras fatigadas térmicamente.

Tabla 11. Desviación estándar de temperaturas máximas

Muestra No.	Temperatura máxima (°C)	Desviación estándar (u)
1	701,73	0,0566
2	701,81	

Incertidumbre expandida para temperaturas máximas:

$$U = 1,96 * 0,0566 \quad (3)$$

$$U = 0,11 \text{ °C} \quad (4)$$

Tabla 12. Desviación estándar de temperaturas mínimas

Muestra No.	Temperatura mínima (°C)	Desviación estándar (u)
1	538,19	1,67
2	535,83	

Incertidumbre expandida para temperaturas mínimas:

$$U = 1,96 * 1,67 \quad (5)$$

$$U = 3,27 \text{ °C} \quad (6)$$

5.6.2 Incertidumbres en la dureza

En la Tabla 13 se muestra la desviación estándar equivalente a las durezas obtenidas en la probeta sin fatiga térmica.

Tabla 13. Desviación estándar de durezas – Probeta sin fatiga

No. prueba	Durezas	Desviación estándar (<i>u</i>)
1	44,2	1,05
2	45,2	
3	44,2	
4	43,2	
5	42,1	

Incertidumbre expandida para la dureza, probeta sin fatigar:

$$U = 2,57 * 1,05 \quad (7)$$

$$U = 2,70 \quad (8)$$

En la Tabla 14 se muestra la desviación estándar equivalente a las durezas obtenidas en la probeta 1 fatigada térmicamente.

Tabla 14. Desviación estándar de durezas – Probeta 1

No. prueba	Durezas	Desviación estándar (<i>u</i>)
1	44,2	1,65
2	44,7	
3	41,5	
4	42,5	
5	40,9	

Incertidumbre expandida para la dureza, probeta 1:

$$U = 2,57 * 1,65 \quad (9)$$

$$U = 4,24 \quad (10)$$

En la Tabla 15 se muestra la desviación estándar equivalente a las durezas obtenidas en la probeta 2 fatigada térmicamente.

Tabla 15. Desviación estándar de durezas – Probeta 2

No. prueba	Durezas	Desviación estándar (<i>u</i>)
1	35,3	1
2	37,5	
3	37,7	
4	34,2	
5	38,1	

Incertidumbre expandida para la dureza, probeta 2:

$$U = 2,57 * 1,71 \quad (11)$$

$$U = 4,39 \quad (12)$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los principales resultados de la investigación están relacionados con las modificaciones observadas en la microestructura y la dureza del acero inoxidable 316L y la presencia de fisuras en el material. Después de ser fatigado térmicamente. Conjuntamente, se tiene como producto de este proyecto, un equipo para calentamiento por inducción electromagnética con ciclos de calentamiento controlado. Resultados preliminares del proyecto fueron presentados en el Congreso nacional RedColsi.

Cabe mencionar que el efecto de la fatiga térmica sobre las propiedades termofísicas del acero inoxidable 316L no fue estudiado en este proyecto, pues no se cuenta con equipos técnicos específicos para determinar propiedades como la conductividad o la difusividad térmica.

6.1 FATIGA TÉRMICA DE ACERO INOXIDABLE 316L

A continuación se presentan los resultados comparativos de la prueba metalográfica y la prueba de dureza.

El intervalo de temperatura y la cantidad de ciclos aplicados en la fatiga térmica realizada se vieron limitados por la potencia del horno y por el tiempo que demora en realizar cada prueba, ya que no se cuenta con un espacio disponible y cada prueba de acero inoxidable 316L se demoró 1 día, aproximadamente. Además, debido a que la máquina durante su operación requiere cuidados en el sistema de enfriamiento y verificación del correcto funcionamiento del sistema de control, es necesario estar pendiente del horno todo el tiempo de la prueba para así evitar daños, haciendo tedioso la realización de cada prueba. Aunque el rango de temperaturas y la cantidad de ciclos no fueron los deseados, las pruebas desarrolladas permitieron conocer el comportamiento de la fatiga térmica entre 550°C y 700 °C en una cantidad de 500 ciclos.

6.1.1 Prueba metalográfica

Al fatigar el acero inoxidable 316L entre 700 °C y 550 °C se observó que su microestructura no se vio afectada por la fatiga térmica, cuando se compara la microestructura de la muestra sin fatigar (Figura 38) con las muestras fatigadas térmicamente (Figura 44 y Figura 46). Esta comparativa es mostrada a continuación en la Figura 52.

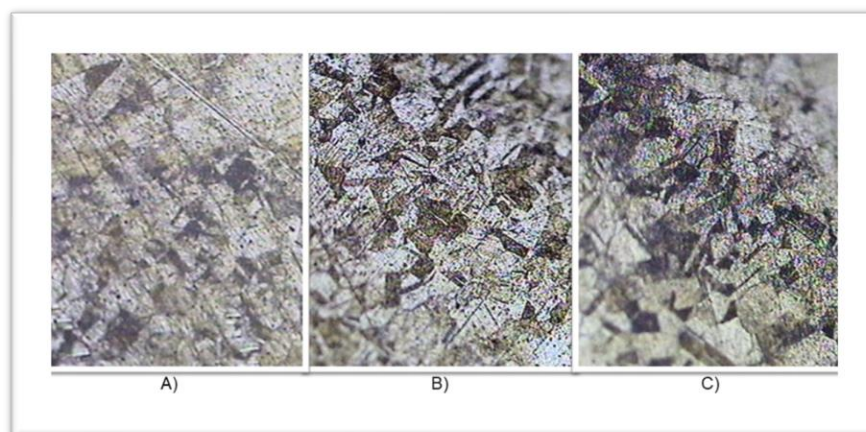


Figura 52. Comparativa de la microestructura de una muestra antes y después de la fatiga térmica. Microestructura A) y C) fatigadas, y B) sin fatigar.

Las imágenes metalográficas tampoco evidencian la formación de fracturas en los materiales. Los resultados sugieren que en este rango de temperaturas y para el tamaño y disposición de las muestras en el horno los gradientes de temperatura no afectaron significativamente la estructura de las muestras fatigadas. Los resultados también sugieren que otras muestras deberían ser analizadas aumentando la longitud de material que esta fuera de bobina de calentamiento. Esto con el objetivo de promover mayores gradientes de temperatura en el cuerpo de la muestra.

6.1.2 Prueba de dureza

Al comparar la dureza de las muestras antes (Tabla 7) y después de la fatiga térmica (Tabla 9 y Tabla 10) se observó que el material presentó una leve disminución en su dureza (Tabla 16).

Tabla 16. Comparativa de durezas antes y después de la fatiga térmica.

Tipo de Muestra	Dureza Rockwell A	Dureza promedio	Diferencia de dureza	Diferencia (%)
Probeta sin fatigar	43,78 ± 2,70	43,78 ± 2,70	4,12	-9,4%
Probeta 1 Fatigada	42,76 ± 4,24	39,66 ± 3,05		
Probeta 2 Fatigada	36,56 ± 4,39			

Cuando comparamos la muestra original sin fatigar y las muestras fatigadas se observó una diferencia de alrededor del 9,4%, sin embargo el análisis de incertezas de medición sugieren que estadísticamente no hay una diferencia significativa en

los resultados de medición de las muestras. Aunque las temperaturas no alcanzaron un nivel en el cual según el diagrama hierro-carbono puedan existir cambios de fase no se descarta la posibilidad de alguna modificación de la estructura como reducción del tamaño de grano debido al proceso de enfriamiento al aire ambiente con un delta de temperatura de alrededor de 680 °C.

6.1.3 Aplicabilidad del acero inoxidable 316L

Para la construcción de termosifones bifásicos de sodio en plantas termosolares tipo torre, el acero inoxidable 316L debe ser fatigado a temperaturas más elevadas para observar si cumple o no con los requerimientos necesarios.

En este análisis no se contó con el suficiente rango de temperaturas para realizar la fatiga adecuada, por tanto, aunque no se obtuvieron cambios considerables en su dureza y cambios en su microestructura, no da una garantía de la implementación de termosifones bifásicos de sodio en su máxima eficiencia de transferencia de calor.

6.2 BANCO DE PRUEBAS DE INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

- El banco de pruebas de inducción electromagnética (Figura 53) construido permite realizar pruebas de fatiga térmica en materiales ferrosos y ferromagnéticos. El banco permite fundir algunos metales por medio de un crisol que sea utilizado y realizar otro tipo de pruebas afines.



Figura 53. Vista isométrica del banco de inducción electromagnética.

La construcción del banco de pruebas tuvo varios desafíos. Entre ellos una limitación de potencia de las fuentes disponibles. El costo de una fuente de potencia mayor superaba el presupuesto del presente trabajo. Para alcanzar una corriente suficiente para este experimento con los recursos disponibles se optó por la conexión en serie de 4 fuentes de menor costo y potencia.

El horno de inducción al demandar una gran cantidad de corriente, requiere una instalación eléctrica que soporte el continuo funcionamiento del horno. La instalación eléctrica del laboratorio donde se instaló el horno de inducción necesita también una adecuación para proveer la corriente necesaria. El funcionamiento del horno activo el sistema de disparo de *breakers*, al trabajar en los límites disponibles.

La bobina debe estar refrigerada para evitar daño en esta. Al tener una deficiencia en el sistema de refrigeración es necesario realizar cambios del fluido de trabajo

(agua) constantemente. Un baño térmico con control de temperatura puede ser adaptado para proteger la bobina de sobrecalentamientos.

El sistema de control al realizar pruebas por grandes periodos de tiempo, también mostro la necesidad de un rediseño en el sistema control de temperatura. La placa Arduino UNO, presento algunas interrupciones por sobrecalentamiento ocasionando la pérdida de los datos. El código de programación se modificó para realizar la adquisición y muestra de datos mediante el Software CoolTerm. Evitando el uso de la pantalla LCD, encoder y módulo SD, se obtuvieron pruebas ininterrumpidas.

7. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió evaluar los cambios en la microestructura y la dureza del acero inoxidable 316L después de ser sometido a fatiga térmica, con objetivo de estudiar la aplicabilidad de este acero en termosifones operando en centrales termosolares tipo torre.

Al finalizar esta investigación se llega a las siguientes conclusiones.

- Fue proyectado y construido un banco de prueba para fatiga térmica por calentamiento por inducción electromagnética. El horno funcionó eficientemente para elevar la temperatura rápidamente en el acero inoxidable 316L. El proyecto del sistema de control y desarrollo del equipo permitió realizar pruebas con ciclos de temperatura entre 550 °C y 700 °C.
- EL acero inoxidable 316L al ser fatigado térmicamente a temperaturas entre 550°C y 700°C, no presenta cambios en su microestructura que pueda dar indicios de un posible fallo en un futuro cercano. Las durezas obtenidas además permiten concluir que el acero inoxidable 316L tampoco presentó cambios en sus propiedades mecánicas para las condiciones de prueba realizadas.
- Las imágenes metalográficas no mostraron diferencias cualitativas apreciables en las microestructuras de las muestras originales de material y las muestras fatigadas térmicamente.
- Para la aplicación de termosifones bifásicos de sodio como intercambiador de calor en el receptor central de plantas termosolares, el acero inoxidable 316L, se hace necesario inducir una fatiga térmica a temperaturas más altas elevadas para evaluar su aplicabilidad.

8. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda realizar fatiga térmica en acero inoxidable 316L a temperaturas más elevadas de acuerdo a la máxima eficiencia de los termosifones bifásicos, y aumentar la cantidad de ciclos.

Aunque su microestructura no presenta cambios evidentes en una microscopia óptica de 200X y 1000X, se recomienda realizar pruebas de microscopia electrónica para este tipo de pruebas, que brinda información mucho más detallada de esa microestructura, para una más amplia visión sobre su comportamiento ante fatiga térmica.

Se recomienda realizar más estudios de esta misma línea de investigación.

El módulo de calentamiento por inducción para su funcionamiento ideal requiere 48 V y 40 A, por tanto, se recomienda cambiar las fuentes de alimentación o en su defecto modificarlas.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Askeland, Donald. 2016. *Ciencia e Ingeniería de Materiales 7ª Edición*.
- Bueso Losada, Guillermo. 2011. *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UNA CENTRAL TERMOSOLAR*.
- Cisterna, Luis H. R., Fernando H. Milanez, and Marcia B. H. Mantelli. 2021. "Prediction of Geyser Boiling Limit for High Temperature Two-Phase Thermosyphons." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 165. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120656.
- Daza, Ivan. 2020. *Actualización En Ingeniería Mecánica y Electrónica*.
- Forbes Staff. 2021. "Chile Inaugura Primera Planta Termosolar de Latinoamérica." *Forbes*.
- GH electrotermia. 2011. "Calentamiento Por Inducción." *GH Induction*.
- Global Solar Atlas. 2022. "Global Horizontal Irradiation."
- Greenpeace International, SolarPACES and ESTELA. 2016. "Energía Solar Termoeléctrica, Perspectiva Mundial 2016." *ENERGIAS RENOVABLES* 4.
- Guo, Hang, Qing Guo, Xiao Ke Yan, Fang Ye, and Chong Fang Ma. 2018. "Experimental Investigation on Heat Transfer Performance of High-Temperature Thermosyphon Charged with Sodium-Potassium Alloy." *Applied Thermal Engineering* 139:402–8. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.04.139.
- IEA. 2010. "Concentrating Solar Power Roadmap."
- Jnblog. 2019. "Aceros Inoxidables." *Jnaceros*.
- Li, Heng, Xiucheng Feng, Xiaowei Wang, Xinyu Yang, Jianqun Tang, and Jianming Gong. 2022a. "Impact of Temperature on Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steels in Solar Salt for CSP Application: An Electrochemical Study." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 239. doi: 10.1016/j.solmat.2022.111661.
- Li, Heng, Xiucheng Feng, Xiaowei Wang, Xinyu Yang, Jianqun Tang, and Jianming Gong. 2022b. "Impact of Temperature on Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steels in Solar Salt for CSP Application: An Electrochemical Study." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 239. doi: 10.1016/j.solmat.2022.111661.
- O'Donnell, M. P., R. C. Hurst, and D. Taylor. 1998. "Observations of the Micromechanisms Affecting the Fracture Path for Thermal Fatigue-Creep Loading of a 316L Stainless Steel." *Materials at High Temperatures* 15(2):95–98. doi: 10.1080/09603409.1998.11689585.
- Quiñonez Salinas, Guillermo. 2007. *DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA ENSAYOS DE FATIGA TÉRMICA*.
- Robertson, C., M. C. Fivel, and A. Fissolo. 2001. *Dislocation Substructure in 316L Stainless Steel under Thermal Fatigue up to 650 K*. Vol. 315.
- Rodríguez Galbarro, Hermenegildo. 2016. "Planta Termosolar Con Tecnología de Torre." *Ingemecanica*.
- Sandoval-Amador, A., A. J. Santander-Vega, C. C. Amaya-Cáceres, H. A. Estupiñán-Duran, and D. Y. Peña-Ballesteros. 2019. "316L Stainless Steel Corrosion in Molten Salts NaNO₃ KNO₃ NaNO₂ Simulating Storage

Conditions." in *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1159. Institute of Physics Publishing.

Spera, D. A. 1976. *THERMAL FATIGUE OF MATERIALS AND COMPONENTS*.

Vega Triana, Juan Pablo. 2012. "Estudio Del Desgaste y Evaluación Electroquímica de Aleaciones FeMnAl y Acero AISI 316 LVM En Fluido Biológico Simulado." *SCIELO*.

10. ANEXOS

10.1 ANEXO 1

Código de programación

```
#include <max6675.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
```

```
#define clk 2
#define dt 4
#define btn 3
#define rele 6
```

```
#define SCK 7
#define CS 9
#define SO 8
```

```
#define CS_PIN 10 //
```

File archivo;

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```
MAX6675 thermocouple(SCK, CS, SO);
```

```
String opciones1[] = {">T/inf(C)      ", ">T/sup(C)      ", ">Ciclos      ", ">Iniciar
prueba ", ">Volver      "};
int max_opciones1 = sizeof(opciones1)/sizeof(opciones1[0]);
```

```
int CLK_anterior;
int contador = 0;
int i=0;
```

```
volatile int estado = LOW;
```

```
int tem_inferior = 550;
int tem_superior = 700;
int can_ciclos = 500;
```

```
void setup() {
```

```

Serial.begin(9600);
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Horno Induccion");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("Unipamplona");
delay(1000);
lcd.clear();
lcd.print(F(" Brayan Daniel "));
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(F(" Arias Sabogal "));
delay(1000);
lcd.clear();
lcd.print(F("Leyendo micro SD"));
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(F("..."));
delay(1000);
if (!SD.begin(CS_PIN)){
  lcd.clear();
  lcd.print("Error de lectura");
  delay(1000);
  return;
}
lcd.print("SD leida");
delay(500);
archivo = SD.open("Datos.txt", FILE_WRITE);

pinMode(rele, OUTPUT);//rele
pinMode(clk, INPUT);
pinMode(dt, INPUT);
pinMode(btn, INPUT_PULLUP);
CLK_anterior = digitalRead(clk);//Rotacion
}

void loop() {

  fatigaTermica();
  encoder();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(btn),BOTON, RISING);
}

void encoder()
{
  int CLK_actual = digitalRead(clk);

```

```

int DT_actual = digitalRead(dt);

if(CLK_anterior == HIGH && CLK_actual == LOW){
  if(DT_actual == LOW){
    contador--;
    if(contador<0){contador=4;}
  }else{
    contador++;
    if(contador>4){contador=0;}
  }
}
CLK_anterior = CLK_actual;
delay(20);
}

void fatigaTermica()
{
  if (contador == 0)
  {
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(opciones1[contador]);
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(tem_inferior);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" T/sup(C)    ");
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print(tem_superior);
    Serial.println(estados);
    while(estados==HIGH)
    {

      lcd.setCursor(0,0);
      lcd.print("X");
      int CLK_actual = digitalRead(clk);
      int DT_actual = digitalRead(dt);
      if(CLK_anterior == HIGH && CLK_actual == LOW){
        if(DT_actual == LOW){
          tem_inferior--;
          if(tem_inferior<100){tem_inferior=800;}
        }else{
          tem_inferior++;
          if(tem_inferior>800){tem_inferior=100;}
        }
      }
      lcd.setCursor(10,0);
      lcd.print(tem_inferior);
    }
  }
}

```

```

    }
    CLK_anterior = CLK_actual;
    delay(10);
    }
    }else if (contador == 1)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(opciones1[contador]);
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(tem_superior);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" Ciclos      ");
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print(can_ciclos);
    while(estado==HIGH)
    {
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("X");
        int CLK_actual = digitalRead(clk);
        int DT_actual = digitalRead(dt);
        if(CLK_anterior == HIGH && CLK_actual == LOW){
            if(DT_actual == LOW){
                tem_superior--;
                if(tem_superior<100){tem_superior=800;}
            }else{
                tem_superior++;
                if(tem_superior>800){tem_superior=100;}
            }
            lcd.setCursor(10,0);
            lcd.print(tem_superior);
        }
        CLK_anterior = CLK_actual;
        delay(10);
    }
}
}else if (contador == 2)
{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(opciones1[contador]);
    lcd.setCursor(10,0);
    lcd.print(can_ciclos);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" Iniciar prueba ");
    while(estado==HIGH)

```

```

{
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("X");
    int CLK_actual = digitalRead(clk);
    int DT_actual = digitalRead(dt);
    if(CLK_anterior == HIGH && CLK_actual == LOW){
        if(DT_actual == LOW){
            can_ciclos--;
            if(can_ciclos<100){can_ciclos=10000;}
        }else{
            can_ciclos++;
            if(can_ciclos>10000){can_ciclos=100;}
        }
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("  ");
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print(can_ciclos);
    }
    CLK_anterior = CLK_actual;
    delay(10);
}
}else if (contador == 3)
{

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(opciones1[contador]);
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(" Volver      ");
    while(estado==HIGH)
    {
        iniciar();
    }

}else if (contador == 4)
{

    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(opciones1[contador]);
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print(" T/inf(C)    ");
    lcd.setCursor(10,1);
    lcd.print(tem_inferior);
} else if (contador >4){contador = 0;}
else if (contador<0){contador =4;}
}

```

```

void BOTON()
{
    estado = !estado;
}

void iniciar()
{
    if(archivo){
        while (i<can_ciclos){

            double t=thermocouple.readCelsius();

            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0,0);
            lcd.print("Temp");
            lcd.setCursor(9,0);
            lcd.print(t);
            lcd.setCursor(0,1);
            lcd.print("Ciclos");
            lcd.setCursor(7,1);
            lcd.print(i);
            lcd.setCursor(11,1);
            lcd.print("/");
            lcd.setCursor(12,1);
            lcd.print(can_ciclos);

            Serial.println(t);
            archivo.print(i);
            archivo.print(",");
            archivo.println(t);

            if(t<tem_inferior)
            {
                digitalWrite(rele,HIGH);
                Serial.println(digitalRead(rele));
            }
            if (t>=tem_superior && digitalRead(rele)==1)
            {
                i++;
                digitalWrite(rele,LOW);
            }
            delay(500);
        }
        archivo.close();
    }
}

```

```
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0,0);  
    lcd.print("Ciclos hechos");  
    lcd.setCursor(10,1);  
    lcd.print(can_ciclos);  
  }  
}
```

10.2 ANEXO 2

Norma ASTM A270-3A

TUBES AND FITTINGS **GEMO**

Sanitary Tubes 3A ASTM A270

Dimensional Tolerances

all dimensions in inches (mm)

Size OD	Tolerances, OD	Wall thickness	Tolerances on wall thickness ¹	Tolerances on Length	Weight Kg/M
1/2" (12.7)	+/-0.005" (0.13)	0.065" (1.65) /0.049" (1.25)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.4571
3/4" (19.1)	+/-0.005" (0.13)	0.065" (1.65) /0.049" (1.25)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.7218
1" (25.4)	+/-0.005" (0.13)	0.065" (1.65) /0.049" (1.25)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.9824
1-1/4" (31.8)	+/-0.008" (0.20)	0.065" (1.65)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	1.2412
1-1/2" (38.1)	+/-0.008" (0.20)	0.065" (1.65) /0.049" (1.25)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	1.5078
2" (50.8)	+/-0.008" (0.20)	0.065" (1.65) /0.049" (1.25)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	2.0331
2-1/2" (63.5)	+/-0.010" (0.25)	0.065" (1.65)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	2.5585
3" (76.2)	+/-0.010" (0.25)	0.065" (1.65)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	3.0797
4" (101.6)	+/-0.015" (0.38)	0.065" (1.65) /0.083" (2.11)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	5.2628
6" (152.4)	+/-0.030" (0.76)	0.083" (2.11)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	7.9116
8" (152.4)	+/-0.030" (0.76)	0.109" (2.77)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	10.3909
8" (203.2)	+0.061" (1.55) - 0.031" (0.79)	0.109" (2.77)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	13.9166

¹Uniform wall thickness for 1/2" through 3" size measure .005(16ga). In 4" size, wall thickness measures .083(14ga). 6" and 8" .109(12ga).

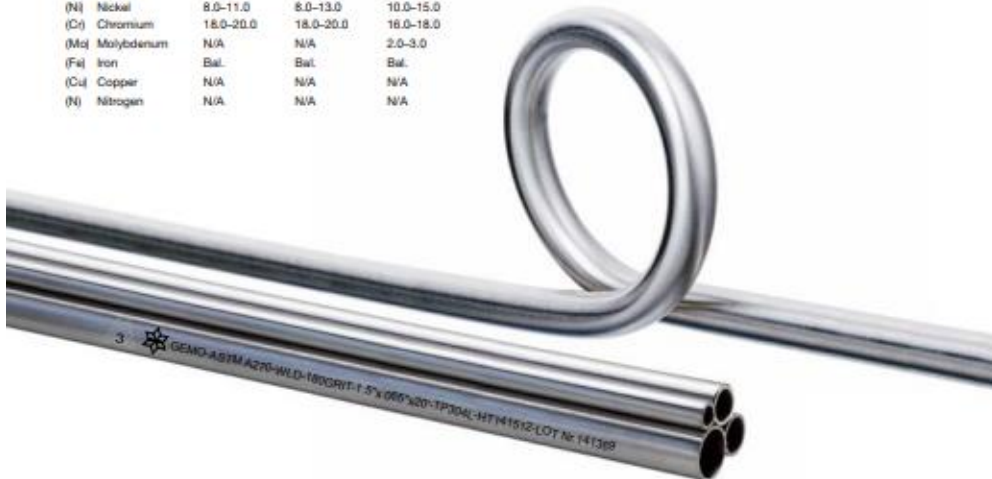
Chemical Composition

Elements	304 (wt%)	304L (wt%)	316L (wt%)
(C) Carbon, Max.	0.080	0.035	0.035
(Mn) Manganese, Max.	2.00	2.00	2.00
(P) Phosphorus, Max.	0.040	0.040	0.040
(S) Sulfur, Max.	0.030	0.030	0.030**
(Si) Silicon, Max.	0.75	0.75	0.75
(Ni) Nickel	8.0-11.0	8.0-13.0	10.0-15.0
(Cr) Chromium	18.0-20.0	18.0-20.0	16.0-18.0
(Mo) Molybdenum	N/A	N/A	2.0-3.0
(Fe) Iron	Bal.	Bal.	Bal.
(Cu) Copper	N/A	N/A	N/A
(N) Nitrogen	N/A	N/A	N/A

Product Marking

In addition to the marking prescribed in Specification

A 1016/A 1016M and specified in the order, the marking shall include whether the tubing is seamless (SML), welded (WLD), or heavily cold worked (HCW), and the surface finish.



www.gemoindustries.com



Sanitary Tubes Inch ASTM A270

Dimensional Tolerances

all dimensions in inches (mm)

Size OD	Tolerances, OD	Wall thickness	Tolerances on wall thickness *	Tolerances on Length	Weight Kg/M
1/2" (12.7)	+/-0.005" (0.13)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.4185
3/4" (19.1)	+/-0.005" (0.13)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.6576
1" (25.4)	+/-0.005" (0.13)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	0.8990
1-1/4" (31.8)	+/-0.008" (0.20)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	1.1322
1-1/2" (38.1)	+/-0.008" (0.20)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	1.3676
2" (50.8)	+/-0.008" (0.20)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	1.8421
2-1/2" (63.5)	+/-0.010" (0.25)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	2.3166
3" (76.2)	+/-0.010" (0.25)	0.059" (1.50)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	2.7912
4" (101.6)	+/-0.015" (0.38)	0.079" (2.00)	+/-10.0%	+1/8" (3.18)	4.9621
6" (152.4)	+/-0.030" (0.76)	0.079" (2.00)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	7.4929
6" (152.4)	+/-0.030" (0.76)	0.12" (3.05)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	11.3469
8" (203.2)	+/-0.040" (1.016)	0.12" (3.05)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	15.2065
10" (254)	+/-0.040" (1.016)	0.12" (3.05)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	19.0661
10" (254)	+/-0.040" (1.016)	0.134" (3.4)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	21.2243
12" (304.8)	+/-0.040" (1.016)	0.12" (3.05)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	22.9256
12" (304.8)	+/-0.040" (1.016)	0.134" (3.4)	+/-10.0%	+1" (25.4) - 0	25.5268

Ordering Information

It is the responsibility of the purchaser to specify all requirements that are necessary for material ordered under this specification. Such requirements may be included, but are not limited to, the following:

- Quantity (feet, meters, or number of lengths).
- Name of material (austenitic steel tube).
- Process seamless (SML), welded (WLD), or heavily cold worked (HCW).
- Size (outside diameter and average wall thickness).
- Length (specific or random).
- Surface finish (see***Section 13).
- Optional requirements (product analysis, hydrostatic or nondestructive electric test.
- Test report required (Certification Section of Specification A 1016/A 1016M).
- Specification designation.
- Special requirements, and any supplementary requirements.



10.3 ANEXO 3

Norma ASTM A270-03 02

Not For Production Use (For Reference Only)

ASTM A270-03 S2 / ASME BPE and UI Welded Austenitic Stainless Steel Pharmaceutical Tubing

Elements	ASTM Chemical Requirements			
	304 S30400	304L S30403	316 S31600	316L S31603
(C) Carbon, max	0.080	0.035	0.080	0.035
(Mn) Manganese, max	2.000	2.000	2.000	2.000
(P) Phosphorus, max	0.045	0.045	0.045	0.045
(S) Sulfur Range	0.030	0.030	0.005 -0.017	0.005 -0.017
(Si) Silicon	1.000	1.000	1.000	1.000
(Ni) Nickel	8.0-11.0	8.0-12.0	10.0-14.0	10.0-14.0
(Cr) Chromium	18.0-20.0	18.0-20.0	16.0-18.0	16.0-18.0
(Mo) Molybdenum	N/A	N/A	2.0-3.0	2.0-3.0
(Ti) Titanium	N/A	N/A	N/A	N/A

Surface Finish in accordance with ASME B46.1

UI ID Specification is 20 Ra for mechanically polished.

UI ID Specification is 10 Ra or 15 Ra for electropolish.

Also - Refer to ASME-BPE Standard

Mechanical Testing Test		
Test	ASTM	United
Flare	Not Required	Required
Flatten	Not Required	Required
Flange	Not Required	Required
Reverse Bend	Not Required	Required
Reverse Flatten	Required	Required
Eddy Current	Required*	Required
Hydrostatic	Required*	Not Required
Hardness, max	N/A	95 Rb
Pressure	Not Required	Required *

Laboratory Testing

Test	ASTM	United
Passivation test per MIL-STD 753B	Not Required	Required
Electro-polish visual	Not Required	Required

Heat Treatment

-Heat treat by heating to 1900 F minimum and then quenching.

Stencil

-Man. Name or brand, spec number, and grade, marked "welded", and the surface finish.

*Air pressure test 30 psi tubes over 20' for HBA / 180 grit / ID Polish tubes

* ASTM required either an Eddy Current or a Hydrostatic test be performed.

Size	Outside Diameter		Squareness		Dimensional Requirements Length**		Straightness		Weld Height		Wall***	
	ASTM S2.3/BPE	United	ASTM	United	ASTM	United	ASTM	United	ASTM	United	ASTM S2.3/BPE	United
1/2"	-.005/+ .005	-.005/+ .005	N/A	.015	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.004	+.004	+/- 10.0%	+/- 10.0%
3/4"	-.005/+ .005	-.005/+ .002	N/A	.015	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.004	+.004	+/- 10.0%	+/- 10.0%
1"	-.005/+ .005	-.005/+ .002	N/A	.017	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.006	+.006	+/- 10.0%	+/- 10.0%
1-1/2"	-.008/+ .008	-.006/+ .002	N/A	.026	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.006	+.006	+/- 10.0%	+/- 10.0%
2"	-.008/+ .008	-.006/+ .002	N/A	.035	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.006	+.006	+/- 10.0%	+/- 10.0%
2-1/2"	-.010/+ .010	-.008/+ .002	N/A	.044	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.010	+.010	+/- 10.0%	+/- 10.0%
3"	-.010/+ .010	-.008/+ .003	N/A	.052	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.010	+.010	+/- 10.0%	+/- 10.0%
4"	-.015/+ .015	-.008/+ .003	N/A	.070	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.010	+.010	+/- 10.0%	+/- 10.0%
6"	-.030/+ .030	-.030/+ .030	N/A	.070	-0 / +2"	-0 / +1/8"	.030/36"	.015/36"	.010	+.010	+/- 10.0%	+/- 10.0%

** Applies only to 0.049" wall and over. For less than 0.049", the O.D. tolerance shall be agreed upon by the manufacturer and purchaser.

10.4 ANEXO 4

Presentación en el Congreso Nacional RedColsi

