

REINGENIERÍA DEL FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINA DE FATIGA  
MULTIAXIAL Y OBTENCIÓN DE UNA CURVA MULTIAXIAL (S vs N) DE UN  
ALUMINIO DE PUREZA COMERCIAL

MICHAEL OLIVEROS CASTRO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2020

REINGENIERÍA DEL FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINA DE FATIGA  
MULTIAXIAL Y OBTENCIÓN DE UNA CURVA MULTIAXIAL (S vs N) DE UN  
ALUMINIO DE PUREZA COMERCIAL

MICHAEL OLIVEROS CASTRO

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

Doctor en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2020

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
1. OBJETIVOS.....	13
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2. MARCO TEÓRICO .....	14
2.1 PROCESO GENERAL DE FATIGA.....	14
2.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA.....	15
2.3 DIAGRAMA S – N .....	15
2.4 MODELOS DE REPRESENTACIÓN DE CURVAS S - N.....	17
2.5 FATIGA MULTIAXIAL.....	18
2.6 MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL .....	18
2.7 REINGENIERÍA EN MÁQUINAS.....	20
2.7.1 Despliegue de la función de calidad. ....	21
3. VALORACIÓN DE MÁQUINA.....	22
3.1 BASTIDOR.....	23
3.2 SISTEMA ROTACIONAL 1 .....	25
3.3 SISTEMA DE SUJECIÓN POSTERIOR .....	26
3.4 SISTEMA DE FLEXIÓN ALTERNATIVA .....	27
3.5 SISTEMA ROTACIONAL 2 .....	28
3.6 SISTEMA ELÉCTRICO.....	29
3.5 RESULTADO DE EVALUCIÓN .....	30
4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	31
4.1 SISTEMA DE TRANSPORTE .....	32
4.2 ACOPLA/JUNTA.....	33
4.3 MOTOR 2.....	34

4.3 VARIADORES .....	35
5. DISEÑO MECANICO .....	36
5.1 DISEÑO BRAZO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	36
5.2 DISEÑO SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE VELOCIDAD .....	43
5.2.1 Procedimiento cambio de junta de transmisión de velocidad.....	45
5.3 DISEÑO SISTEMA DE SUJECIÓN .....	47
6. MONTAJE MOTOR Y VARIADORES.....	50
6.1 INSTALACIÓN MOTOR 2.....	50
6.2 INSTALACIÓN VARIADORES.....	51
7. ADQUISICIÓN DE DATOS .....	52
7.1 FUERZA.....	52
7.1.1 Sensor de carga.....	52
7.1.2 Tarjeta myDAQ. ....	53
7.1.3 Software LabVIEW.....	53
7.2 CICLOS.....	54
7.3 DEFORMACIÓN .....	56
7.4 FUEZA Y DEFORMACIÓN .....	57
8. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	59
8.1 PROBETA.....	59
8.2 VELOCIDAD .....	60
8.3 CARGA .....	60
8.4 RELACIÓN FUERZA - ESFUERZO.....	60
9. RESULTADOS.....	62
9.1 ENSAYO DE FLEXIÓN CON MÁQUINA DE FATIGA .....	62
9.1.1 Medición fuerza y deformación. ....	62
9.1 ENSAYO DE TRACCIÓN .....	64
9.3 ENSAYO DE FATIGA .....	65
10. ANALISIS DE RESULTADOS.....	68

11. RECOMENDACIONES.....71

12. COSTOS.....72

13. CONCLUSIONES .....74

BIBLIOGRAFIA.....75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva S-N para un acero de calidad S700MC AM FCE. ....	16
Figura 2. Diagrama de fatiga o curva S-N.....	16
Figura 3. Subconjuntos máquina de fatiga multiaxial.....	20
Figura 4. Brazo de transmisión de potencia.....	38
Figura 5. Parte inferior brazo de transmisión de potencia.....	38
Figura 6. Parte superior brazo de transmisión de potencia.....	40
Figura 7. Partes sistema de transmisión de potencias.....	41
Figura 8. Ensamble sensor y brazo de transmisión de potencia.....	42
Figura 9. Montaje de brazo de transmisión de potencia en la máquina. ....	42
Figura 10. Condición de carga del sistema de transmisión de velocidad.....	43
Figura 11. Sistema de sujeción al piso. ....	47
Figura 12. Construcción sistema de sujeción al piso. ....	49
Figura 13. Ensamble acople motor. ....	50
Figura 14. Sistema eléctrico inicial.....	51
Figura 15. Sistema eléctrico final.....	51
Figura 16. Sistema de adquisición de datos .....	52
Figura 17. Celda de carga INTERFACE WMC-45KN .....	52
Figura 18. Conexión del sensor a tarjeta myDAQ.....	53
Figura 19. Interfaz de usuario .....	53
Figura 20. Programación gráfica.....	54
Figura 21. Esquema de conexión del sistema de conteo de ciclos.....	55
Figura 22. Sistema de conteo de ciclos. ....	55
Figura 23. Características medio puente Wheaststone .....	56
Figura 24. Interfaz para medir deformación .....	56
Figura 25. Programación para medir deformación.....	57
Figura 26. Interfaz para medir voltajes de fuerza y deformación .....	58
Figura 27. Programación para medir voltajes de fuerza y deformación.....	58
Figura 28. Características estándar de las probetas.....	59

Figura 29. Probetas de aluminio. ....	59
Figura 30. Condición de carga el eje que sostiene la probeta .....	61
Figura 31. Montaje de medición de deformación. ....	62
Figura 32. Medición Fuerza y Deformación. ....	63
Figura 33. Grafica de datos simultáneos. ....	63
Figura 34. Probeta ensayo tracción. ....	64
Figura 35. Grafica de tracción.....	64
Figura 36. Probetas ensayo fatiga. ....	66
Figura 37. Medición de fuerza.....	66
Figura 38. Gráfica de fatiga S – N multiaxial.....	67
Figura 39. Gráfica de fatiga S – N alternativo. ....	67
Figura 40. Máquina de Fatiga Multiaxial. ....	68
Figura 41. Grafica de fatiga aluminio. ....	69

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Modelo de evaluación de cada subconjunto. ....	23
Tabla 2. Modelo de evaluación del parámetro más bajo del subconjunto.....	23
Tabla 3. Evaluación bastidor.....	24
Tabla 4. Evaluación de estabilidad en bastidor.....	24
Tabla 5. Evaluación sistema rotacional 1.....	25
Tabla 6. Evaluación del movimiento en el sistema rotacional 1. ....	26
Tabla 7. Evaluación sistema de sujeción posterior. ....	26
Tabla 8. Evaluación del movimiento en el sistema de sujeción posterior. ....	27
Tabla 9. Evaluación sistema de flexión alternativa. ....	28
Tabla 10. Evaluación sistema rotacional 2.....	28
Tabla 11. Evaluación de la trasmisión de potencia en sistema rotacional 2. ....	29
Tabla 12. Evaluación sistema eléctrico.....	29
Tabla 13. Evaluación de velocidad en sistema eléctrico.....	30
Tabla 14. Resumen de evaluación de la máquina. ....	30
Tabla 16. Modelo de selección de alternativas. ....	31
Tabla 17. Alternativa de sistema de transporte del bastidor .....	32
Tabla 18. Alternativa de acople/junta de sistema rotacional 1 y sistema de sujeción posterior.....	33
Tabla 19. Alternativa de motor de sistema rotacional 2. ....	34
Tabla 20. Alternativa de variador de sistema eléctrico.....	35
Tabla 21. Resumen de la prueba fatiga. ....	65
Tabla 22. Análisis de velocidad.....	65
Tabla 23. Análisis giro de motores.....	65
Tabla 24. Estado de la máquina. ....	68
Tabla 30. Costos asociados al proyecto. ....	72

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

Anexo A. Sensor de carga INTERFACE.

Anexo B. Certificado de calibración sensor INTERFACE.

Anexo C. Puente Wheaststone.

Anexo D. Planos sistema de trasmisión de potencia.

Anexo E. Planos sistema de sujeción.

Anexo F. Plano probeta.

Anexo G. Medición de deformación.

Anexo H. Fuerza y deformación.

Anexo I. Prueba de fatiga aluminio.

Anexo J. Estado de máquina de fatiga.

## RESUMEN

**TÍTULO:** REINGENIERÍA DEL FUNCIONAMIENTO DE MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL Y OBTENCIÓN DE UNA CURVA MULTIAXIAL (S VS N) DE UN ALUMINIO DE PUREZA COMERCIAL\*

**AUTOR:** MICHAEL OLIVEROS CASTRO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** FATIGA MULTIAXIAL, CURVA S-N, ALUMINIO, FLEXIÓN ROTATIVA, FLEXIÓN ALTERNATIVA

**DESCRIPCIÓN:**

La fatiga es una de las variables más importantes en el diseño mecánico, porque ayuda a visualizar el comportamiento y resistencia del material bajo una serie de condiciones cíclicas de carga, las pruebas de fatiga se desarrollan comúnmente con una sola forma de aplicación de carga, entonces, la aplicación de cargas simultaneas está en etapa de desarrollo y es un área grande de investigación.

La Escuela de Ingeniería Mecánica UIS cuenta con una máquina para ensayos de fatiga multiaxial, pero no está en buenas condiciones de uso, se optimiza y pone en marcha, con una evaluación diagnóstica del sistema mecánico se determinan los factores más relevantes que afectan el buen funcionamiento y se realizar los cambios necesarios; adaptar los sistemas que generan la flexión rotativa, la flexión alternativa, acondicionar un sistema de adquisición de datos y sistema eléctrico con variación de velocidad.

La máquina al estar en funcionamiento puede cambiar diferentes variables para dar un análisis más acertado, porque varia la velocidad de los motores de forma independiente, cambia la carga sobre la probeta, aplica cargas de flexión alternativa y rotativa de forma independiente o simultaneas.

Se analiza un aluminio comercial, teniendo en cuenta la fabricación probetas con respecto a las normativas existentes, se caracteriza el material con prueba de tracción, prueba de fatiga multiaxial, fatiga alternativa y así se determina la curva S-N de aluminio teniendo en cuenta la metodología adecuada para el tratamiento de los datos obtenidos.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Director: Alberto David Pertuz Comas, Doctor en Ingeniería Mecánica.

## ABSTRACT

**TITLE:** REENGINEERING OF MULTIAXIAL FATIGUE MACHINE OPERATION AND OBTAINING A MULTIAXIAL CURVE (S VS N) OF AN ALUMINUM OF COMMERCIAL PURITY\*

**AUTHOR:** MICHAEL OLIVEROS CASTRO\*\*

**KEYWORDS:** MULTIAXIAL FATIGUE, CURVE S-N, ALUMINUM, ROTATING FLEXION, ALTERNATIVE FLEXION

**DESCRIPTION:**

Fatigue is one of the most important variables in mechanical design, because it helps to visualize the behavior and resistance of the material under a series of cyclical load conditions. Fatigue tests are commonly developed with only one form of load application, so the application of simultaneous loads is in the development stage and is a large area of research.

The School of Mechanical Engineering UIS has a machine for multiaxial fatigue tests, but it is not in good conditions of use, it is optimized and put into operation, with a diagnostic evaluation of the mechanical system the most relevant factors that affect the proper functioning are determined and the necessary changes are made; adapt the systems that generate the rotary bending, the alternative bending, condition a data acquisition system and electrical system with speed variation.

The machine can change different variables to give a more accurate analysis, because it varies the speed of the motors independently, changes the load on the specimen, applies loads of bending and rotating independently or simultaneously.

A commercial aluminum is analyzed, taking into account the manufacturing of specimens with respect to the existing standards, the material is characterized with traction test, multiaxial fatigue test, alternative fatigue and thus the aluminum S-N curve is determined taking into account the appropriate methodology for the treatment of the data obtained.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
Director: Alberto David Pertuz Comas, Doctor en Ingeniería Mecánica.

## INTRODUCCIÓN

El diseño mecánico consta de múltiples variables y una de la más importante es la fatiga, por lo tanto es un campo amplio de estudio e investigación, la Escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con una máquina de fatiga multiaxial, pero no encuentra en las mejores condiciones de operación, se busca optimizar y poner en marcha, realizando una evaluación diagnóstica del sistema mecánico esto con el fin de determinar los factores más relevantes que afectan el buen funcionamiento, realizar los arreglos necesarios como adaptar los sistemas que generan la flexión rotativa, la flexión alternativa y acondicionar un sistema de adquisición de datos.

Con la máquina en óptimas condiciones se realizan pruebas de fatiga multiaxial a un aluminio comercial con el fin de conocer su curva S-N bajo las condiciones de trabajo escogidas, teniendo en cuenta la fabricación probetas con respecto a las normativas existentes y determinación de una metodología adecuada para el tratamiento de los datos obtenidos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Optimizar el funcionamiento y puesta en marcha de la máquina de fatiga multiaxial y comprobar su desempeño con una curva S vs N para un aluminio de pureza comercial.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar y diagnosticar el estado actual de la máquina basándose en los criterios fundamentales de la reingeniería.
- Optimizar el sistema de adquisición de datos y representar los resultados de los ensayos en curvas Esfuerzos versus Número de ciclos (S vs N).
- Adaptar un sistema de transmisión de velocidad constante en la flexión rotativa.
- Adecuar un sistema de transmisión de potencia para el sistema de flexión alternativa.
- Realizar pruebas de fatiga multiaxial (Flexión Rotativa - Flexión Alternativa) para un aluminio de pureza comercial y comparar resultados con pruebas de fatiga tradicionales de la literatura.

## 2. MARCO TEÓRICO

La fatiga es un proceso de degeneración de un material sometido a cargas cíclicas de valores por debajo de aquellos que serían capaces de provocar su rotura.

### 2.1 PROCESO GENERAL DE FATIGA<sup>1</sup>

Un proceso general de fatiga puede diferenciarse tres etapas que se presentan de forma sucesiva hasta la rotura del componente. Estas etapas son:

1. Periodo de nucleación e iniciación de la grieta en zonas en las que las concentraciones de tensión provocan deformaciones plásticas cíclicas,  $N_i$  (medido en número de ciclos). Se trata, por tanto, de una acumulación de daño plástico sobre ciertos accidentes microestructurales, defecto de superficie o de volumen de la masa metálica, que origina la aparición de una grieta o fisura de frente o borde de propagación afilado.
2. Propagación inicial de la grieta a través de la zona plástica en que se originó,  $(N_p)_p$ .
3. Propagación de la grieta en la pieza, fuera de la zona de influencia de la concentración de tensiones originaria, en régimen macroscópicamente elástico,  $(N_p)_e$ , hasta el fallo final.

La vida total de una pieza sometida a fatiga viene dada por la suma de estas tres etapas:

$$N_f = N_i + (N_p)_p + (N_p)_e$$

---

<sup>1</sup> ARANA, José y GONZÁLEZ, Javier. Mecánica de fractura. Zarautz: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. p.183. ISBN: 84-8373-455-9

## **2.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA FATIGA**

- Propiedades internas del material: Métodos de fabricación, imperfecciones, tamaño de grano, tipo de material, etc.
  
- Preparación de las probetas: Tamaño, tipo de superficie, calidad de acabados, tratamientos térmicos, etc.
  
- Externos: Estado de la máquina, tipo de máquina, ambiente de trabajo, fricción, transmisión de movimiento, fuerzas ejercidas, tipo de sollicitación, etc.

Estos factores intervienen drásticamente dentro del sistema, por lo tanto, al momento de realizar los ensayos de fatiga se presentan dispersiones en los datos.

## **2.3 DIAGRAMA S – N<sup>2</sup>**

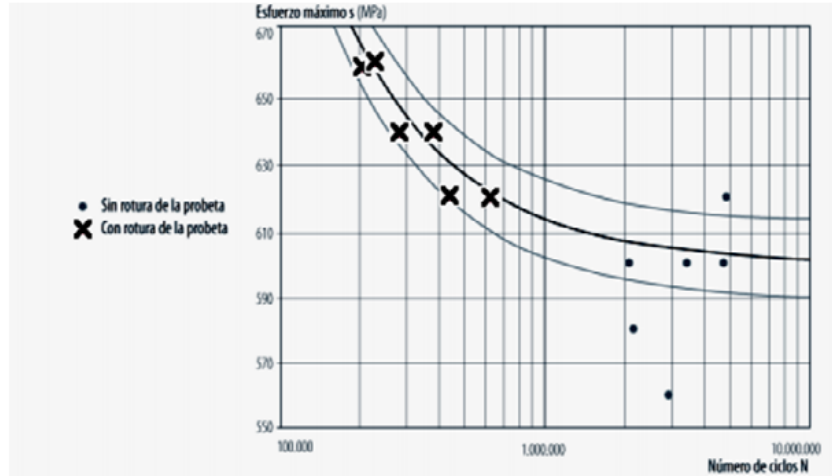
Forma de representar gráficamente el comportamiento de un material sometido a cargas cíclicas, definiendo cuánto ciclos soporta un material a un determinado esfuerzo fluctuante. Los esfuerzos se caracterizan por ser alternantes, por lo tanto, presentan máximos, mínimos y una relación de esfuerzos.

Las probetas para los ensayos tienen una geometría normalizada, se realiza este ensayo múltiples veces (mínimo 8 ensayos) modificando el esfuerzo de flexión, se obtiene el número de ciclos que dura la probeta.

---

<sup>2</sup> MARCO, Eva. Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario. Tesis pregrado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

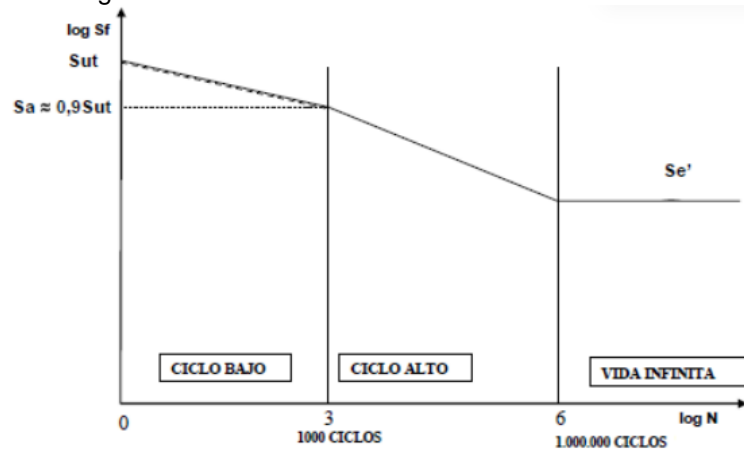
Figura 1. Curva S-N para un acero de calidad S700MC AM FCE.



Fuente: MARCO, Eva. Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario. Tesis pregrado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2010.p22.

Zonas en el diagrama de fatiga. El diagrama de fatiga en los materiales féreos suele tener tres zonas claramente diferenciadas, así:

Figura 2. Diagrama de fatiga o curva S-N



Fuente: MARCO, Eva. Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario. Tesis pregrado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2010.p23.

- Zona de ciclo bajo: Se sitúa normalmente por debajo de los 103 o 104 ciclos, dependiendo de los autores. En esta zona el material se comporta de manera muy

similar a como lo hace frente a cargas estáticas, pero con una leve reducción de la resistencia.

- Zona de ciclo alto: Hasta 10<sup>6</sup> o 10<sup>7</sup> ciclos para los aceros, según autores. Esta zona muestra una reducción mucho más brusca con la duración, al mismo tiempo se comprueba que el material se comporta de manera diferente a como lo hace frente a cargas estáticas.

- Zona de vida infinita: Existe un valor de la tensión por debajo del cual la duración de la probeta es infinita, es decir, no rompe. La tensión a la que se produce este efecto se conoce como límite de fatiga de la viga rotatoria o límite de fatiga sin corregir (Se').

## 2.4 MODELOS DE REPRESENTACIÓN DE CURVAS S - N

- Wöler:  $\ln(N) = a - b * S$

N: Número de ciclos a la fractura.

S: Amplitud del esfuerzo aplicado.

a y b: Constantes del material.

- Basquin:  $\ln(N) = a - b * \text{Log}(S)$ ;  $A = e^a$ ;  $c = \frac{1}{b}$ ;  $S = \left(\frac{A}{N}\right)^c$ ;

- Stromeier:  $\text{Log}(N) = a - b * \text{Log}(S - E)$ ;  $S = E + \left(\frac{A}{N}\right)^c$

Están a, b y E, donde E representa el límite de resistencia a la fatiga.

- Palmgren:  $\text{Log}(N) = a - b * \text{Log}(S - E)$ ;  $S = E + \left(\frac{A}{N+B}\right)^c$

- Corson: 
$$N = \frac{A}{(S-E)^*d^{(S-E)}}$$

- Weibull: 
$$\text{Log}(N + B) = a - b * \text{Log}\left(\frac{S-E}{R-E}\right)$$

Donde a, b, B y E son parámetros constantes, además, R es la resistencia a la tracción del material

## 2.5 FATIGA MULTIAXIAL<sup>3</sup>

Es la presencia de esfuerzos simples cíclicos presentes simultáneamente sobre un elemento es tomado como fatiga multiaxial y es generalmente aceptado en la literatura, pero puede que no sea la adecuada, ya que incluye un estado de estrés triaxial que rara vez se encuentra en la literatura. Por otra parte, en la superficie del material, donde se produce una gran mayoría de la iniciación de grietas por fatiga, el estado de estrés es biaxial.

En la literatura se puede encontrar una gran variedad de muestras que se pueden usar en investigaciones experimentales sobre la fatiga multiaxial:

- Especímenes cilíndricos sólidos, con muescas y sin muescas.
- Muestras tubulares, también con muescas y sin muescas.
- Especímenes cruciformes.

También pueden ser especímenes de chapa con grietas rectas o inclinadas.

## 2.6 MÁQUINA DE FATIGA MULTIAXIAL<sup>4</sup>

Esta máquina busca realizar pruebas de fatiga, aplicando tensiones a una muestra de ensayo en diferentes direcciones, frecuencias y fases.

---

<sup>3</sup> FREITAS, M. Multiaxial fatigue: From materials testing to life prediction. Lisboa, Portugal: ELSEVIER. 2017. Theoretical and Applied Fracture Mechanics vol 92, 360-372 p.

<sup>4</sup> UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (2018). MULTIAXIAL FATIGUE MACHINE. WO2018/116092A1

La máquina se compone de varios subconjuntos los cuales cumplen una función determinante para en el buen funcionamiento del sistema, los subconjuntos son:

1. Bastidor: Estructura que contiene y sostiene los otros subconjuntos, es necesario que sea lo más estático y resistente posible, debido a las vibraciones que se presenta en el sistema.

2. Sistema rotacional 1: Este subconjunto sostiene un extremo de la probeta y además cuenta con el mecanismo de acción rotacional, tiene un acople que permite la transmisión de potencia, pero no es la más adecuada para el buen funcionamiento de la máquina.

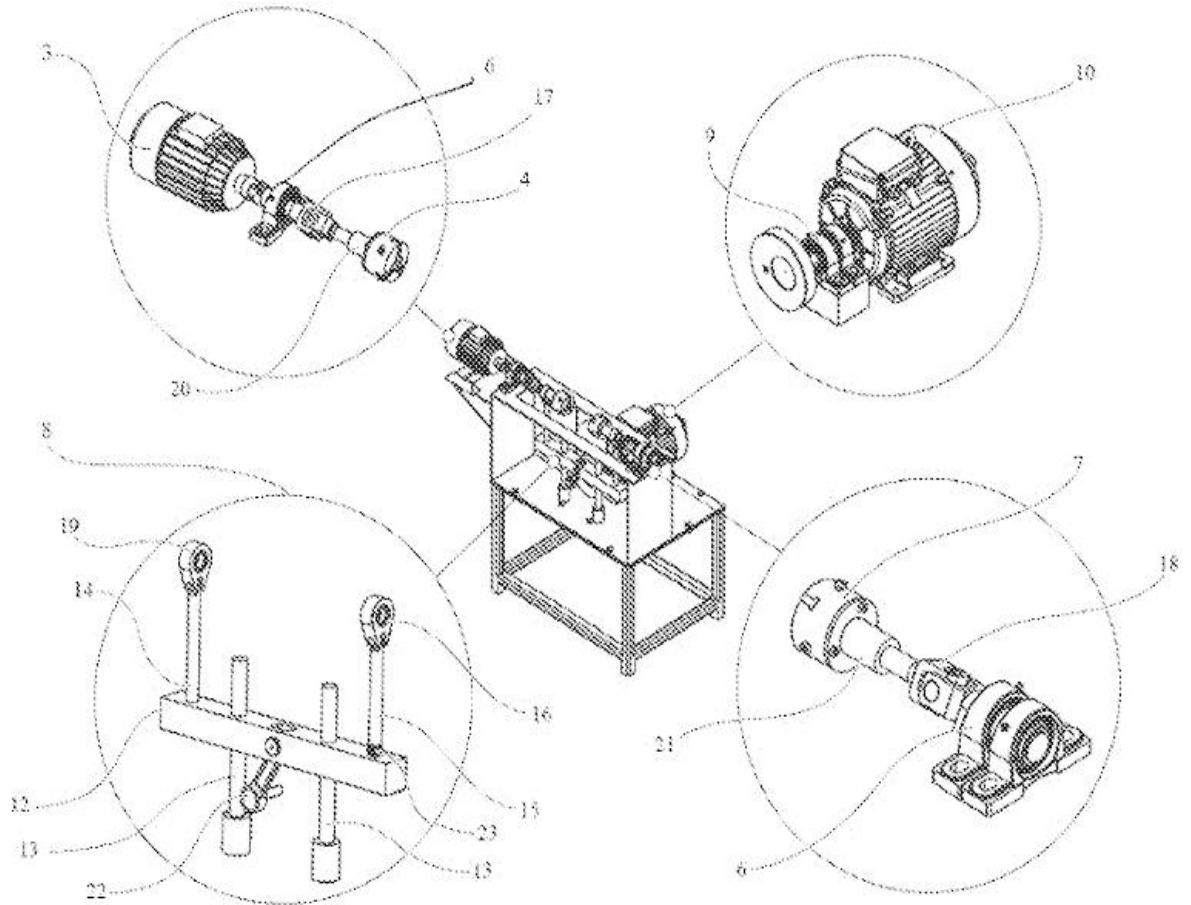
3. Sistema de sujeción posterior: Se refiere al sostenimiento de la probeta en el otro extremo la cual también cuenta con el acople y un ajuste al bastidor.

4. Sistema de flexión alternativa: Este sistema busca someter la probeta a una flexión alternativa, sosteniendo los ejes que soportan a las probetas y está acoplado al sistema de rotacional.

5. Sistema rotacional 2: Cuenta con un sistema de potencia y un elemento muy importante para aplicar diferentes tipos de cargas sobre las probetas el cual debe ser muy bien lubricado.

Los sistemas de transmisión pueden variar sus frecuencias (velocidades) y esto ayuda a que se pueden realizar muchísimos tipos de montajes y pruebas, por lo tanto, la máquina cuenta con una versatilidad muy grande en el estudio de la fatiga.

Figura 3. Subconjuntos máquina de fatiga multiaxial



Fuente: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (2018). MULTIAXIAL FATIGUE MACHINE. WO2018/116092A1

## 2.7 REINGENIERÍA EN MÁQUINAS<sup>5</sup>

Es la revisión fundamental y el rediseño radical de procesos para alcanzar mejoras espectaculares en medidas críticas y contemporáneas de rendimiento, tales como calidad, servicio y rapidez.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás, Reingeniería en el diseño de productos. Revista de Ingeniería Innovativa 2017

<sup>6</sup> CHAMPY, M. H. (2005). REINGENIERÍA, Olvide lo que usted sabe sobre cómo debe funcionar una empresa. ¡Casi todo está errado! (M. D. G., Ed., & J. C. NANNETTI, Trad.) BOGOTÁ, COLOMBIA: NORMA. Recuperado el 28 de julio de 2017

Para realizar la reingeniería en sistemas mecánicos hay que tener en cuenta varias herramientas que ayudan a dar a conocer que proceso hacer.

**2.7.1 Despliegue de la función de calidad.** El QFD (por sus siglas en inglés) es un sistema estructurado que facilita la identificación de las necesidades y expectativas de los clientes (Calidad o voz del cliente {Q}) y su traducción al lenguaje de la organización. Esto es, permite trasladar lo que necesita y busca el cliente a requerimientos de calidad internos de la organización. El concepto que denota esta particularidad se denomina despliegue {D} y se logra mediante la planificación de las acciones necesarias para lograr esa satisfacción, con la participación de todas las personas y departamentos de la organización (aquí denominadas funciones {F}) que intervienen en el diseño y desarrollo del producto o servicio.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> LORENZO, S., MIRA, J., OLARTE, M., GUERRERO, J., & MOYANO, S. (15 de mayo de 2004). Análisis matricial de la voz del cliente: QFD aplicado a la gestión sanitaria. *Gac. Sanitaria* {online}, 18(12), 464-471. Recuperado el 28 de 07 de 2017

### 3. VALORACIÓN DE MÁQUINA

Para la evaluación de máquina se tienen en cuenta el despliegue en función de la calidad (QFD) anteriormente mencionado, por lo tanto, la evaluación se realiza primero con base a los subconjuntos de máquina y parámetros integrales así:

1. Parámetros a evaluar: Son las características básicas para conocer el estado de un sistema mecánico, según sus características.

2. Indicativos de prioridad: Cada parámetro a evaluar tendrá un valor teniendo en cuenta de manera subjetiva su importancia en el sistema, estos indicativos están del 1 a 5, donde 1 es el de menor prioridad comparado con 5 que sería el más importante en sistema.

3. Escala de evaluación: Según el estado del parámetro a evaluar se obtiene un estimado, teniendo en cuenta que es de 1 a 5, la escala es así:

1: Malo, 2: Regular, 3: Aceptable, 4: Bueno, 5: Excelente

4. Para cada parámetro se va a obtener un valor TOTAL el cual se obtiene multiplicando su respectivo indicativo de prioridad con el valor de la escala de evaluación que obtuvo.

5. Al sumar todos los valores que se obtiene el valor que obtuvo ese sistema con y con base al máximo que obtendrá se promedia y determina en qué estado se encuentra.

Tabla 1. Modelo de evaluación de cada subconjunto.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
----	[A]	[B]	$[C] = [A] * [B]$	$[D] = [A] * [5]$	$[E] = [C] * 100 / [D]$
----					
Total					

Donde [A] y [B] son valores del 1 al 5.

De cada subconjunto se van a evaluar los parámetros que tienen más bajos porcentajes con respecto a las partes que lo componen, teniendo en cuenta que dicha evaluación determina qué partes son las que más afectan al subconjunto, donde la puntuación es de 1 a 5, entonces, 5 indica que esa pieza no afecta en el parámetro y 1 es para cuando afecta dicho parámetro, por lo tanto las piezas que tengan menos porcentaje indican que son las que requieren mejoras.

Tabla 2. Modelo de evaluación del parámetro más bajo del subconjunto.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
----	[A]	[B]	$[C] = [A] * [B]$	$[D] = [A] * [5]$	$[E] = 100 * [C / D]$
----					

### 3.1 BASTIDOR

Estructura que contiene y sostiene los otros subconjuntos, es necesario que sea lo más estático y resistente posible, debido a las vibraciones que se presenta en el sistema.

- Estabilidad: El sistema mecánico cuenta con buena sujeción para mantenerse inalterable.
- Diseño adecuado: La estructura soporta la carga a la que está sometida.
- Dimensiones y materiales: Estas características corresponden a las del diseño.
- Estética: Presenta una buena apariencia.

Tabla 3. Evaluación bastidor.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Estabilidad	5	2	10	25	40
Diseño adecuado	5	4	20	25	80
Dimensiones y materiales	4	4	16	20	80
Estética	3	3	9	15	60
TOTAL	-	-	55	85	64.7

Bastidor: 64.7%

El parámetro más bajo fue la estabilidad, con base a esto se va a determinar que partes de este subconjunto afectan en mayor medida a este parámetro.

- Estructura base: Tiene como objetivo mantener todos los elementos de la máquina.
- Soportes de motores: Soportan la carga de los motores y las vibraciones que se generan sobre estos.
- Sistema de transporte: Ayudan a mejorar el transporte y reubicación de la máquina.
- Cubierta de seguridad: Protege al operario de algún accidente que se genere al realizar las pruebas.

Tabla 4. Evaluación de estabilidad en bastidor.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Estructura base	5	4	20	25	80
Soportes de motores	4	5	20	20	100
Sistema de transporte	4	1	4	20	20
Cubierta de seguridad	5	4	25	25	80

El elemento que afecta la estabilidad del sistema es el sistema de transporte.

### 3.2 SISTEMA ROTACIONAL 1

Este subconjunto sostiene un extremo de la probeta y además cuenta con el mecanismo de acción rotacional, tiene un acople que permite la transmisión de potencia, pero esta no es la más adecuada para el buen funcionamiento de la máquina.

- Movimiento: La transmisión del movimiento rotacional es invariable.
- Transmisión de potencia: La transmisión de potencias es constante.
- Especificaciones técnicas: El motor cumple con las características que proporciona la ficha técnica.
- Aspecto: Los elementos presentes no presentan imperfecciones.

Tabla 5. Evaluación sistema rotacional 1.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Movimiento	5	2	10	25	40
Transmisión de potencia	5	3	15	25	60
Especificaciones técnicas	4	4	16	20	80
Aspecto	3	2	6	15	40
TOTAL	-	-	47	85	55.3

Sistema rotacional 1: 55.3%

El parámetro más bajo fue el movimiento, debido a que este tiene un indicador de prioridad mayor al aspecto.

- Motor: Transmite el torque y rotación al eje.
- Eje: soporta cargas y vibraciones altas.
- Chumacera: Sostiene el eje y está anclado a la estructura
- Acople/Junta: Transmite el movimiento rotacional proveniente del motor cuando los ejes no están alineados.
- Porta Probeta: Sostiene las probetas al momento de realizar las pruebas.

Tabla 6. Evaluación del movimiento en el sistema rotacional 1.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Motor 1	4	5	20	20	100
Eje	5	4	20	25	80
Chumacera	4	5	20	20	100
Acople/Junta	5	1	10	25	20
Porta Probeta	4	4	16	20	80

El elemento que afecta el movimiento del sistema es el acople/junta.

### 3.3 SISTEMA DE SUJECIÓN POSTERIOR

Se refiere al sostenimiento de la probeta en el otro extremo la cual también cuenta con el acople y un ajuste al bastidor.

- Soporte de probeta: Se pueden manejar diferentes niveles de tamaño de probeta de forma segura.
- Lubricación: Las chumaceras cuentan con la lubricación adecuada.
- Movimiento: La transmisión del movimiento rotacional es invariable.
- Aspecto: Los elementos presentes no presentan imperfecciones.

Tabla 7. Evaluación sistema de sujeción posterior.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Soporte de probeta	4	4	16	20	80
Lubricación	5	5	25	25	100
Movimiento	5	2	10	25	40
Aspecto	3	2	6	15	40
TOTAL	-	-	57	85	67.1

Sistema de sujeción posterior: 67.1%

El parámetro más bajo fue el movimiento, debido a que este tiene un indicador de prioridad mayor que el aspecto.

- Eje: Soporta cargas y vibraciones altas.
- Chumaceras: Sostienen el eje y está anclado a la estructura
- Acople/Junta: Transmite el movimiento rotacional proveniente del motor cuando los ejes no están alineados.
- Porta Probeta: Sostiene las probetas al momento de realizar las pruebas.

Tabla 8. Evaluación del movimiento en el sistema de sujeción posterior.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Eje	5	4	20	25	80
Chumacera	4	5	20	20	100
Acople/Junta	5	1	5	25	20
Porta Probeta	4	4	16	20	80

El elemento que afecta el movimiento del sistema es el acople/junta.

### 3.4 SISTEMA DE FLEXIÓN ALTERNATIVA

Este sistema busca someter la probeta a una flexión alternativa, sosteniendo los ejes que soportan a las probetas y está acoplado al sistema de rotacional.

- Carga variable: Capacidad de variación de carga sobre las probetas.
- Lubricación: Cuenta con una lubricación adecuada del sistema de transmisión de potencia.
- Transmisión de potencia: Pérdidas mecánicas bajas.
- Aspecto: Elementos presentes no presentan imperfecciones.

Tabla 9. Evaluación sistema de flexión alternativa.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Carga variable	5	4	20	25	80
Lubricación	5	4	20	25	80
Transmisión de potencia	5	4	20	25	80
Aspecto	3	3	9	15	60
TOTAL	-	-	69	90	76.7

Sistema de flexión alternativa: 76.7%

El parámetro más bajo en este subconjunto es el aspecto, pero no es tan relevante por lo tanto no es necesario evaluar las partes de sistema.

### 3.5 SISTEMA ROTACIONAL 2

Cuenta con un sistema de potencia y un elemento muy importante para aplicar diferentes tipos de cargas sobre las probetas el cual debe ser muy bien lubricado.

- Movimiento: La transmisión del movimiento rotacional es invariable.
- Transmisión de potencia: La transmisión de potencias es constante.
- Especificaciones técnicas: El motor cumple con las características que proporciona la ficha técnica.
- Aspecto: Los elementos presentes no presentan imperfecciones.

Tabla 10. Evaluación sistema rotacional 2.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Movimiento	5	4	20	25	80
Transmisión de potencia	5	1	5	25	20
Especificaciones técnicas	4	4	16	20	80
Aspecto	3	3	9	15	60
TOTAL	-	-	50	85	58.8

Sistema rotacional 2: 58.8%

El parámetro más bajo en este subconjunto es la transmisión de potencia, analizando los componentes.

-Eje: Soporta cargas y vibraciones altas.

-Acople/Junta: Transmite el movimiento rotacional proveniente del motor.

-Chumacera: Sostienen el eje y está anclado a la estructura.

-Motor: Transmite torque y rotación al eje

Tabla 11. Evaluación de la transmisión de potencia en sistema rotacional 2.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Eje	5	4	20	25	80
Acople/Junta	5	3	15	25	60
Chumacera	4	5	20	20	100
Motor 2	5	1	5	25	20

El elemento que afecta la transmisión de potencia del sistema es el motor 2.

### 3.6 SISTEMA ELÉCTRICO

Cuenta con un sistema conexiones interruptores y variadores que alimentan y manipulan los sistemas rotacionales.

-Suministro eléctrico: Capacidad para alimentar los motores.

-Velocidad: Variación de velocidad de los motores.

-Conexiones: Correcta de elementos del sistema.

Tabla 12. Evaluación sistema eléctrico.

PARÁMETROS	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Suministro eléctrico	5	4	20	25	100
Velocidad	5	1	5	25	20
Conexiones	4	4	16	20	100
TOTAL	-	-	41	70	58.6

Sistema rotacional 2: 58.6%

El parámetro más bajo en este subconjunto es la velocidad.

-Eje: Soporta cargas y vibraciones altas.

-Acople/Junta: Transmite el movimiento rotacional proveniente del motor.

-Chumacera: Sostienen el eje y está anclado a la estructura.

-Motor: Trasmite torque y rotación al eje.

Tabla 13. Evaluación de velocidad en sistema eléctrico.

COMPONENTE	INDICATIVO DE PRIORIDAD	EVALUACIÓN	TOTAL	TOTAL MAX	%
Variador	5	1	5	25	20
Cables	4	5	20	20	100
Interruptores	4	5	20	20	100

Los elementos que afecta la velocidad del sistema son el variador 1 y el variador 2.

### 3.5 RESULTADO DE EVALUCIÓN

Tabla 14. Resumen de evaluación de la máquina.

SUBCONJUNTO	ESTADO	PARÁMETRO MÁS BAJO	PARTES QUE INTERVIENEN
Bastidor	64.7%	Estabilidad	Sistema de transporte
Sistema rotacional 1	55.3%	Movimiento	Acople/Junta
Sistema de sujeción posterior	67.1%	Movimiento	Acople/Junta
Sistema de flexión alternativa	76.7%	-	-
Sistema rotacional 2:	58.8%	Transmisión de Potencia	Motor 2
Sistema Eléctrico	58.6%	Velocidad	Variador de frecuencia

#### 4. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

La selección de alternativas de mejora consiste en base a la evaluación previa se busca una solución viable y adecuada para mejorar el sistema.

Para determinar las alternativas se tienen en cuenta los parámetros que necesita el sistema, los cuales tienen un indicativo de prioridad del 1 al 5, donde 5 es el valor máximo de importancia y 1 es el de menos relevancia para la selección, entonces al evaluar cada parámetro de cada alternativa se realiza una multiplicación con el respectivo indicativo y se suman todos dando como resultado un valor para cada alternativa, así pues la alternativa que obtenga un resultado mayor es la que se implementa.

Tabla 16. Modelo de selección de alternativas.

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
PARÁMETRO 1 [IP1]	[A]	[B]	[C]
PARÁMETRO 2 [IP2]	[D]	[E]	[F]
Total	$[A]*[IP1]+[D]*[IP2]$	$[B]*[IP1]+[E]*[IP2]$	$[C]*[IP1]+[F]*[IP2]$

Donde los valores [IP1] e [IP2] son los indicativos de prioridad y los [A] [B] [C] [D] [E] y [F] son los valores del parámetro en cada alternativa.

Los subconjuntos que hay que intervenir y mejorar son: el sistema de transporte del bastidor, el acople/Junta de sistema rotacional 1 y del sistema de sujeción posterior.

#### 4.1 SISTEMA DE TRANSPORTE

La máquina no cuenta con un sistema de sujeción fija, esto hace que el sistema presente muchas vibraciones e induzca cargas las probetas.

Las alternativas son:

- ALTERNATIVA 1: Retirar el sistema de transporte
- ALTERNATIVA 2: Retirar el sistema de transporte y acondicionar una sujeción fija al piso.
- ALTERNATIVA 3: Montar un sistema de sujeción al piso que se pueda retirar y permita conservar el sistema de transporte.

Los parámetros son:

- Estabilidad: Cuenta con buena sujeción para mantenerse inalterable.
- Transporte: Se puede transportar con facilidad la máquina.
- Implementación: Es fácil de aplicar la alternativa.

Tabla 17. Alternativa de sistema de transporte del bastidor

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
ESTABILIDAD [5]	3	5	4
TRANSPORTE [4]	1	1	5
IMPLEMENTACIÓN [4]	5	5	34
Total	39	49	56

## 4.2 ACOPLE/JUNTA

La máquina tiende a tener fluctuaciones al momento de ejecutar las flexiones simultáneamente debido a que la junta de cardán transmite el movimiento homocinéticamente.

Las alternativas son:

- ALTERNATIVA 1: Instalar una junta de cardán doble.
- ALTERNATIVA 2: Instalar una junta homocinética de bolas.
- ALTERNATIVA 3: Instalar una junta homocinética tipo tracta.

Los parámetros son:

- Movimiento: La transmisión del movimiento rotacional es invariable.
- Tamaño: Las dimensiones son pequeñas.
- Implementación: Es fácil de aplicar la alternativa.

Tabla 18. Alternativa de acople/junta de sistema rotacional 1 y sistema de sujeción posterior.

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
MOVIMIENTO [5]	4	5	4
TAMAÑO [5]	4	5	5
IMPLEMENTACIÓN [4]	4	3	4
Total	56	62	61

### 4.3 MOTOR 2

Es un elemento indispensable para la realización de ensayos de la máquina, no se tiene este motor por lo tanto se necesita comprar e instalar uno nuevo

Las alternativas son:

- ALTERNATIVA 1: Motor WEG 3Hp 3600rpm Trifásico.
- ALTERNATIVA 2: Motor SIEMENS 3Hp 3600rpm Trifásico.
- ALTERNATIVA 3: Motor WEG 3Hp 3600rpm Monofásico.
- ALTERNATIVA 4: Motor SIEMENS 3Hp 3600rpm Monofásico.

Los parámetros son:

- Especificaciones: Cumple con las condiciones técnicas que necesita la máquina.
- Compatibilidad: Es compaginado con los otros elementos eléctricos.
- Instalación: Es fácil de aplicar la alternativa.
- Costo: Precio asequible.

Tabla 19. Alternativa de motor de sistema rotacional 2.

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 3
ESPECIFICACIONES [5]	5	5	5	5
COMPATIBILIDAD [5]	5	5	3	3
INSTALACIÓN [4]	4	5	4	5
COSTO [5]	4	4	5	5
Total	86	90	81	85

### 4.3 VARIADORES

La máquina no cuenta con variador de frecuencia para hacer pruebas que involucren esta variable, necesario agregar este elemento al sistema.

Las alternativas son:

- ALTERNATIVA 1: Variador SIEMENS SINAMICS 5Hp Trifásico.
- ALTERNATIVA 2: Variador SIEMENS SINAMICS 3Hp Monofásico y Variador SIEMENS SINAMICS 2Hp Monofásico.
- ALTERNATIVA 3: Variador SIEMENS SINAMICS 3Hp Trifásico y Variador SIEMENS SINAMICS 2Hp Trifásico.

Los parámetros son:

- Movimiento: Los motores cuentan con velocidad independiente.
- Compatibilidad: Es compaginado con los otros elementos eléctricos.
- Implementación: Es fácil de aplicar la alternativa.

Tabla 20. Alternativa de variador de sistema eléctrico.

	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
MOVIMIENTO [5]	2	5	5
COMPATIBILIDAD [5]	5	3	5
IMPLEMENTACIÓN [4]	4	4	4
Total	51	56	66

## 5. DISEÑO MECANICO

Para optimizar el sistema mecánico se diseñan los elementos necesarios, en este caso se van a diseñar las alternativas de mejora anteriormente mencionadas.

### 5.1 DISEÑO BRAZO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Para diseñar el sistema de transmisión de potencia es necesario determinar cuáles son las condiciones críticas de funcionamiento, y estas se dan cuando el sistema rotacional 2 presenta una velocidad de 250 [rpm] y una potencia de 3 [hp].

Cuando el sistema se estabilice la carga inercial va a ser despreciable y la velocidad va a ser constante, se tiene:

$$Pot = T \cdot \omega$$

$$T = \frac{Pot \cdot 745,7}{N \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{60}}$$

$$T = 85,45 \text{ [N*m]}$$

Para determinar la fuerza que soporta la biela, la distancia mínima con respecto al eje del motor es de 1cm, entonces:

$$T = F \cdot d$$

$$F = \frac{85,45}{0,01}$$

$$F = 8545 \text{ [N]}$$

La fuerza que soporta el brazo (fuerza de diseño) es la mitad de la fuerza que se actúa sobre la biela, ya que la máquina tiene dos brazos que sostienen la probeta.

$$F_d = \frac{F}{2}$$

$$F_d = \frac{8545}{2}$$

$$F_d = 4273 \text{ [N]}$$

El material del brazo Acero AISI 4140 con:  $S_y=434,4$  [MPa],  $S_{ut}=620,5$ [MPa] y un factor de seguridad (N) de 2.

Diseño a Tensión:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{S_y}{N}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$d = 5,005 \text{ [mm]}$$

Diseño a compresión: Teniendo en cuenta un módulo de elasticidad (E) de 203 [GPa] y longitud de columna equivalente (Le) igual a la longitud de la columna.

$$Le = 0,1115$$

$$\frac{F \cdot N}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\left[ \frac{Le}{\rho} \right]^2}$$

$$A = \rho \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$\rho = \frac{d}{4}$$

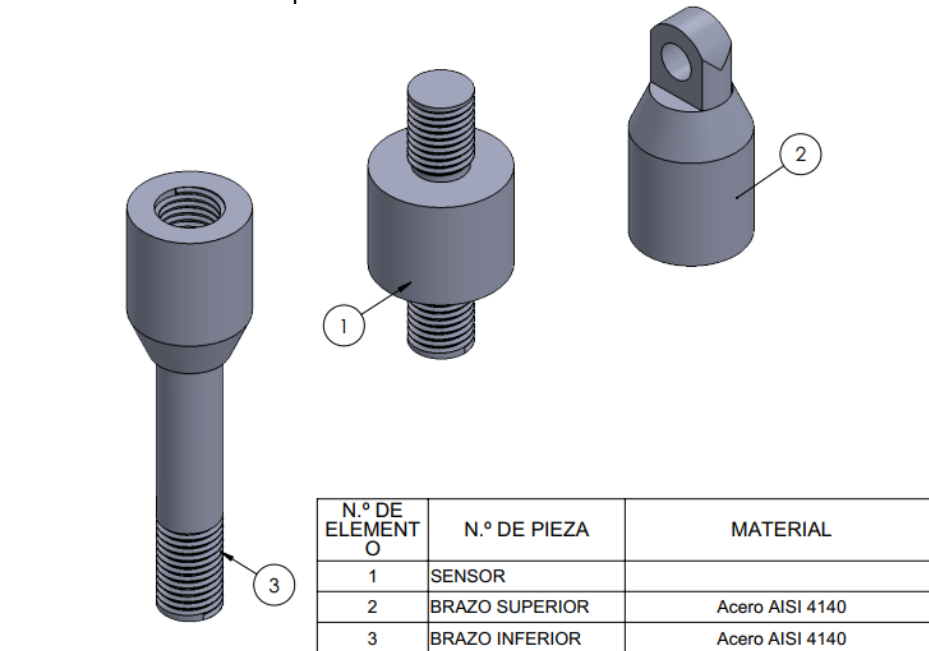
$$d = 0,00572 \text{ [m]}$$

$$d = 5,72 \text{ [mm]}$$

Diseño a Fatiga: Usando la metodología del libro de Fundamentos de elementos de máquinas de Bernard Hamrock.

El brazo se divide en dos partes y en medio de estas se encuentra el sensor, más información en el Anexo D.

Figura 4. Brazo de transmisión de potencia



Para la parte inferior del brazo de transmisión de potencia, tomando y diseñando sobre el diámetro (d) más pequeño de la pieza, ya que es el más crítico;  $d=16$  [mm]:

Figura 5. Parte inferior brazo de transmisión de potencia.



$$d = 16 \text{ [mm]}$$

$$F_t = 4273 \text{ [N]}$$

$$F_c = -4273 \text{ [N]}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_t}{A}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{F_c}{A}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$A = 201,1 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_a = 21,25 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\sigma_m = 0 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Aplicando las condiciones de la línea de Soderberg:

$$K_f \cdot \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N}$$

$$S_e = k_f \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_t \cdot k_m \cdot S_{e1}$$

$$S_{e1} = 0,45 \cdot S_{ut}$$

$$S_{e1} = 279,2 \text{ [MPa]}$$

Cada una de las variables de las que depende  $S_e$  corresponden a:

$K_f$ : Efectos de la concentración de esfuerzos

$k_f$ : Factor de acabado superficial

$k_s$ : Factor de tamaño

$k_r$ : Factor de confiabilidad

$k_t$ : Factor de temperatura

$k_m$ : Factor diverso

$$K_f = 1,43$$

$$k_f = 0,82$$

$$k_s = 1$$

$$k_r = 0,75$$

$$k_t = 1$$

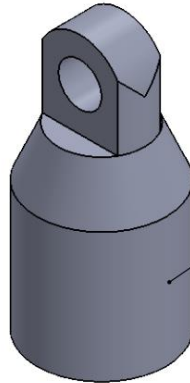
$$k_m = 1$$

$$S_e = 171,7$$

$$N = 5,651$$

Para la parte superior del brazo de transmisión de potencia, se diseña la sección de sujeción por pasador, condiciones de trabajo: ancho 1 [cm], largo 2 [cm] y diámetro del pasador 1 [cm].

Figura 6. Parte superior brazo de transmisión de potencia.



$$x = 10 \text{ [mm]}$$

$$y = 20 \text{ [mm]}$$

$$d = 10 \text{ [mm]}$$

$$A_t = x \cdot y - d \cdot x$$

$$A_c = x \cdot y$$

$$S_{ut} = 620,5 \text{ [MPa]}$$

$$F_t = 4273 \text{ [N]}$$

$$F_c = -4273 \text{ [N]}$$

$$S_y = 434,4 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{F_t}{A_t}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{F_c}{A_c}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\begin{aligned}
 A_c &= 200 \text{ [mm}^2\text{]} \\
 A_t &= 100 \text{ [mm}^2\text{]} \\
 \sigma_{\max} &= 42,73 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\
 \sigma_{\min} &= - 21,37 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\
 \sigma_m &= 10,68 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\
 \sigma_a &= 32,05 \text{ [N/mm}^2\text{]}
 \end{aligned}$$

Aplicando las condiciones de la línea de Soderberg:

$$K_f \cdot \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N}$$

$$S_e = k_f \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_t \cdot k_m \cdot S_{e1}$$

$$S_{e1} = 0,45 \cdot S_{ut}$$

$$K_f = 2,287$$

$$k_f = 0,82$$

$$k_s = 1$$

$$k_r = 0,75$$

$$k_t = 1$$

$$k_m = 1$$

$$S_{e1} = 279,2 \text{ [MPa]}$$

$$S_e = 171,7$$

$$N = 2,252$$

Figura 7. Partes sistema de transmisión de potencias.



Figura 8. Ensamble sensor y brazo de transmisión de potencia.



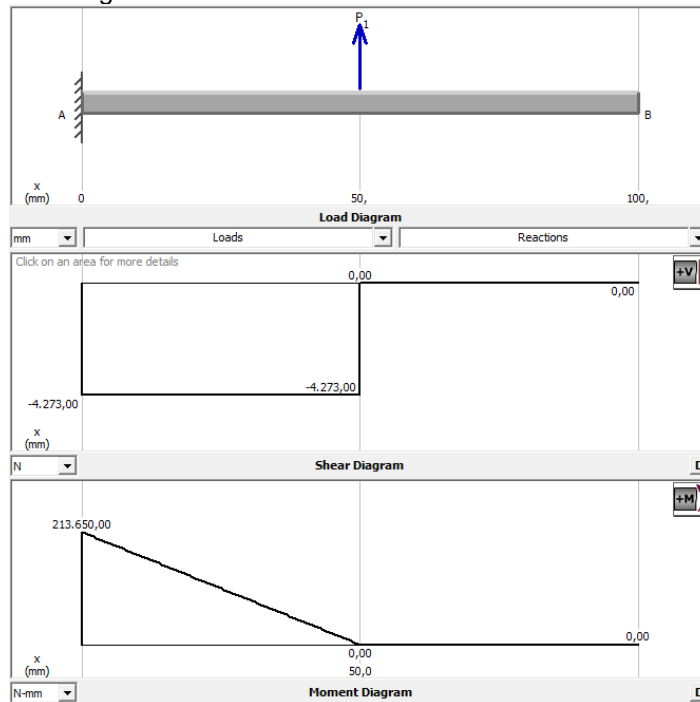
Figura 9. Montaje de brazo de transmisión de potencia en la máquina.



## 5.2 DISEÑO SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE VELOCIDAD

Como a este sistema se adapta una nueva junta homocinética, se determinan las condiciones más críticas para así conocer cómo hacer el cambio.

Figura 10. Condición de carga del sistema de transmisión de velocidad.



Diseño al corte: Teniendo en cuenta que este eje es de Acero AISI 1045, con esfuerzos de  $S_y=413$  [MPa] y  $S_{ut2}=655$  [MPa]

$$\tau = \frac{S_y}{N}$$

$$\tau = \frac{4 \cdot F}{3 \cdot A}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d}{4}$$

$$N = 2$$

$$F = 4273 \text{ [N]}$$

$$\sigma = 206,5 \text{ [N]}$$

$$A = 17,4 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$d = 22,15 \text{ [mm]}$$

Diseño a fatiga:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$M_{\min} = -213650 \text{ [N*m]}$$

$$M_{\max} = 213650 \text{ [N*mm]}$$

$$I = \frac{\pi \cdot \left[ \frac{d}{2} \right]^4}{4}$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$S_y = 434,4 \text{ [MPa]}$$

$$S_{ut} = 620,5 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} \cdot c}{I}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{M_{\min} \cdot c}{I}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

Aplicando las condiciones de la línea de Soderberg:

$$K_f \cdot \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{N}$$

$$S_e = k_f \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_t \cdot k_m \cdot S_{e1}$$

$$S_{e1} = 0,45 \cdot S_{ut}$$

$$k_m = 1$$

$$K_f = 1,43$$

$$k_f = 0,82$$

$$k_s = 1,189 \cdot d^{-0,112}$$

$$k_r = 0,75$$

$$k_t = 1$$

Iterando se encuentra el diámetro adecuado para estas condiciones de carga:

$$\begin{aligned}A &= 452,4 \text{ [mm}^2\text{]} \\c &= 12 \text{ [mm]} \\d &= 24 \text{ [mm]} \\I &= 16286 \text{ [mm}^4\text{]} \\\sigma_a &= 157,4 \text{ [MPa]} \\\sigma_m &= 0 \text{ [MPa]} \\\sigma_{\max} &= 157,4 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\\sigma_{\min} &= -157,4 \text{ [N/mm}^2\text{]} \\S_e &= 323,9 \text{ [MPa]} \\S_{e1} &= 310,3 \text{ [MPa]} \\N &= 2,057\end{aligned}$$

### 5.2.1 Procedimiento cambio de junta de transmisión de velocidad

Para el cambio de transmisión de velocidad se realizan los siguientes pasos

- Soltar de la estructura los sistemas de sujeción.



- Quitar las chumaceras y cortar los ejes centímetros antes de donde se sostienen los brazos de transmisión de potencia.



- Cortar las juntas homocinéticas, reconstrucción de junta con soldadura 7018 y maquinado a 25 mm con ranuras para chaveta y ensamble junta con eje un desbaste a 45°.



- Montar chumaceras y pintar.



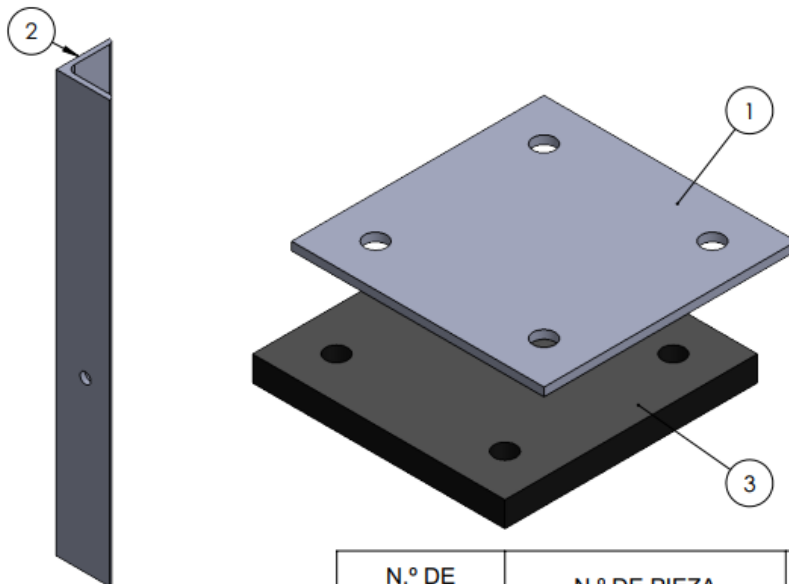
- Instalar sistemas de sujeción en la máquina.



### 5.3 DISEÑO SISTEMA DE SUJECIÓN

El sistema de sujeción cuenta con cuatro piezas las cuales van ancladas al piso, para efectos de diseño se diseña solo una ya que todas son iguales, más detalles en el Anexo E, y usando los valores estándar del libro Fundamentos de diseño para Ingeniería Mecánica de Robert Juvinall.

Figura 11. Sistema de sujeción al piso.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL
1	PLACA BASE	Acero ASTM A36
2	ÁNGULO 1	Acero ASTM A36
3	CAUCHO ANTIVIBRACIÓN	Goma

Diseño a cortante: Cuando la carga es horizontal.

$$F = 4273 \text{ [N]}$$

$$S_y = 520 \text{ [MPa]}$$

$$N = 2,5$$

$$\tau = 0,4 \cdot S_y$$

$$\frac{\tau}{N} = \frac{F}{A}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$\tau = 208 \text{ [MPa]}$$

$$A = 51,36 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$d = 8,086 \text{ [mm]}$$

Diseño a tracción: Cuando la carga es vertical.

$$F = 4273 \text{ [N]}$$

$$S_p = 380 \text{ [MPa]}$$

$$N = 2,5$$

$$\frac{S_p}{N} = \frac{F}{A}$$

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

$$A = 28,11$$

$$d = 5,983$$

Diseño de soldadura: Usando la teoría de la energía de distorsión;  $S_{sy}=0.58 \cdot S_y$

$$N = 3$$

$$S_y = 450 \text{ [MPa]}$$

$$A = 0,707 \cdot 3 \cdot 60 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_{sy} = 0,58 \cdot S_y$$

$$F = S_{sy} \cdot \frac{A}{N}$$

$$A = 127,3 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$S_{sy} = 261 \text{ [MPa]}$$

$$F = 11072 \text{ [N]}$$

Esa es la fuerza que soporta este tipo de soldadura.

Figura 12. Construcción sistema de sujeción al piso.



## 6. MONTAJE MOTOR Y VARIADORES

Como la máquina no cuenta con estos elementos se realizan cotizaciones y compra tanto del motor como de los variadores; cumpliendo con las alternativas seleccionadas en el capítulo 4.

### 6.1 INSTALACIÓN MOTOR 2

Posterior a la compra del motor, en necesario comprar un acople tipo araña referencia L100 para unir el motor al sistema de flexión alternativa.

El acople es mecanizado a las dimensiones del eje y cuña del motor de tal forma que se ensamble para transmitir movimiento y torque, luego se instala el acople y se acopla el motor a la estructura o bastidor.

Figura 13. Ensamble acople motor.



## 6.2 INSTALACIÓN VARIADORES

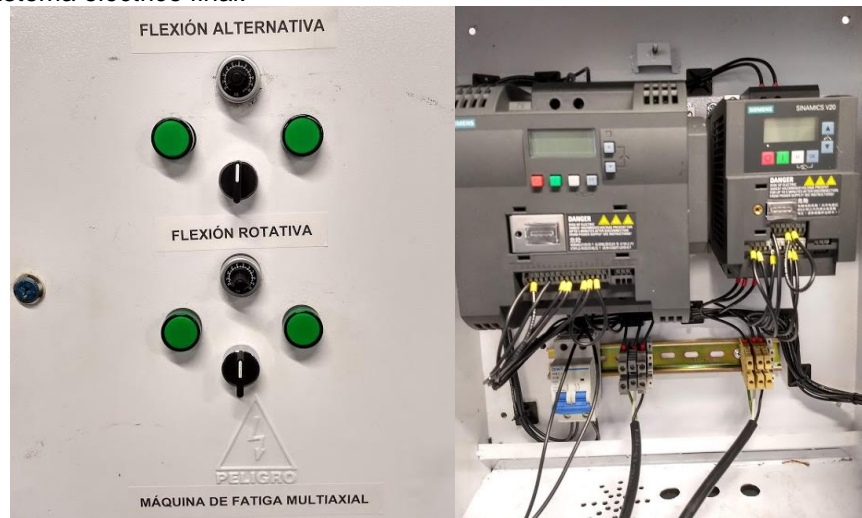
El sistema se encontraba con se muestra en la siguiente imagen:

Figura 14. Sistema eléctrico inicial.



Como se muestra solo se pueden hacer pruebas por separado de flexión alternativa y rotativa, se busca que hacer pruebas con los dos motores activos al tiempo y con velocidad independiente, por lo tanto, se instalan dos variadores conectados a su respectivo motor, cada uno cuenta con un potenciómetro que es el que varía la frecuencia y en consecuencia la velocidad del motor, también se puede invertir la dirección de giro de los dos motores, para eso se instalan dos muletillas de tres posiciones, están conectadas cada una al variador y cuentan con indicadores led.

Figura 15. Sistema eléctrico final.

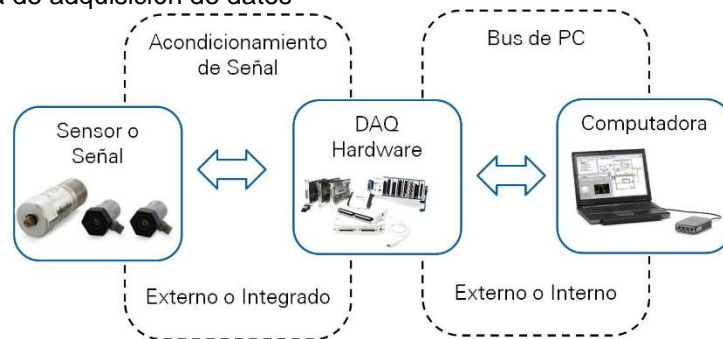


## 7. ADQUISICIÓN DE DATOS

### 7.1 FUERZA

La fuerza es medida por medio de un sistema que monitorea en tiempo real el comportamiento del sistema, el cual cuenta con un sensor de carga, un captador de señal USB y un software de manejo de información.

Figura 16. Sistema de adquisición de datos



Fuente: NATIONAL INSTRUMENTS. ¿Cómo hacer Adquisición de Datos para proyectos académicos? [en línea]. Consultado el 27 de agosto de 2019. Disponible en: <https://forums.ni.com/t5/Academia-en-Latinoamérica/Cómo-hacer-Adquisición-de-Datos-para-proyectos-académicos/ta-p/3498110?profile.language=es>

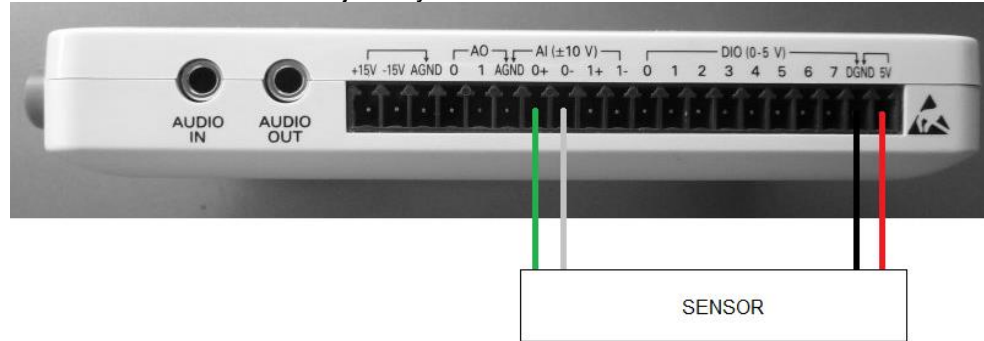
**7.1.1 Sensor de carga.** Es una celda de carga modelo INTERFACE WMC-45KN, con capacidad de medida de 4.5 a 45KN, a tensión – compresión y de un tamaño reducido, más información de este se encuentra en el Anexo A.

Figura 17. Celda de carga INTERFACE WMC-45KN



**7.1.2 Tarjeta myDAQ.** Es una herramienta de adquisición de datos la cual cuenta con múltiples aplicaciones, se encarga alimentar al sensor con un voltaje de 5VDC y de tomar el voltaje que envía el sensor al aplicarse una fuerza.

Figura 18. Conexión del sensor a tarjeta myDAQ



**7.1.3 Software LabVIEW.** Este elemento es el encargado de procesar, guardar y mostrar en una interfaz de usuario la señal captada por la tarjeta myDAQ, debido a una programación grafica. Al momento de la programación se tomaron en cuenta los datos de la calibración ofrecidos por el fabricante los cuales se encuentran el Anexo B.

Figura 19. Interfaz de usuario

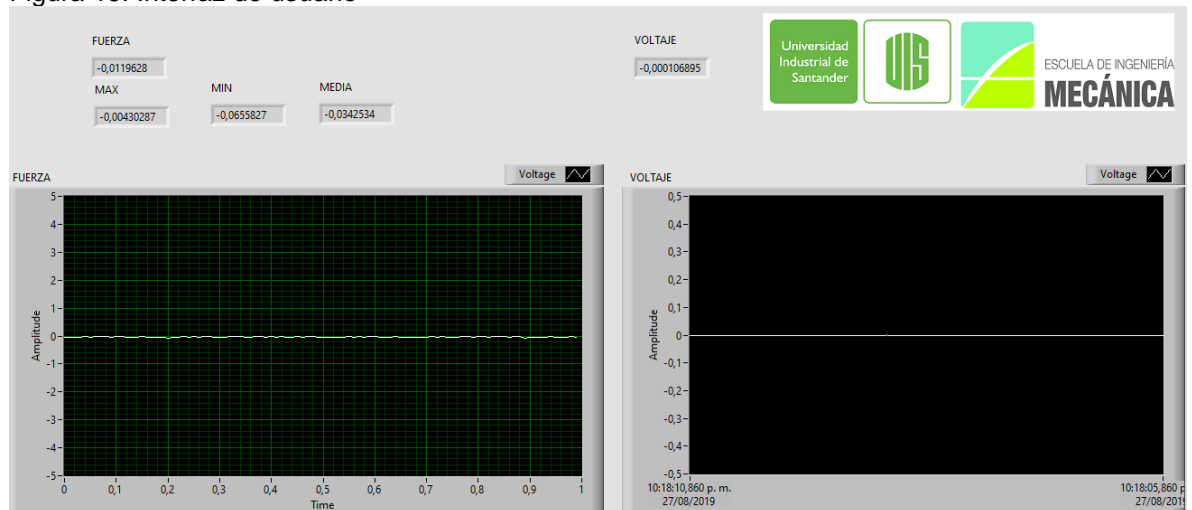
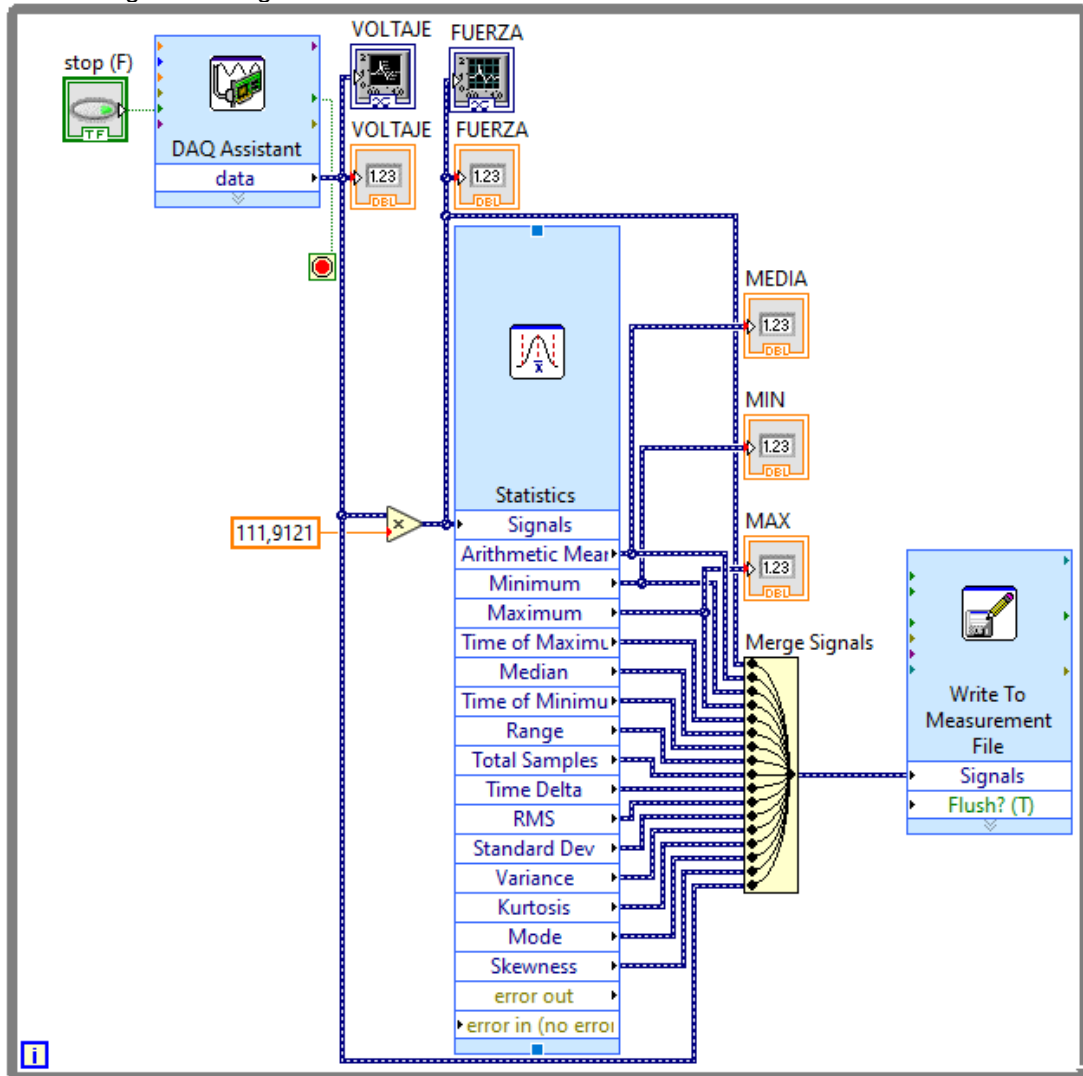


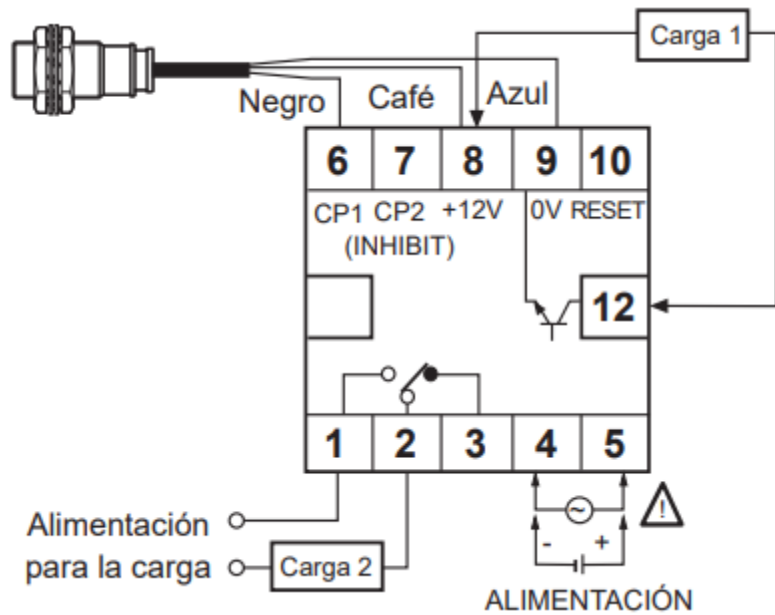
Figura 20. Programación gráfica



## 7.2 CICLOS

El sistema que se encarga de contar el número de vueltas que se dan durante la prueba, para realizar dicho conteo el sistema se compone de un sensor inductivo y un panel contador/temporizador programable.

Figura 21. Esquema de conexión del sistema de conteo de ciclos



Fuente: AUTONICS. Contadores y temporizadores. [pdf]. Consultado el 27 de agosto de 2019.  
Disponible en: <http://www.alefindustrial.com/AUTONICS/contadores%20temporizadores.pdf>

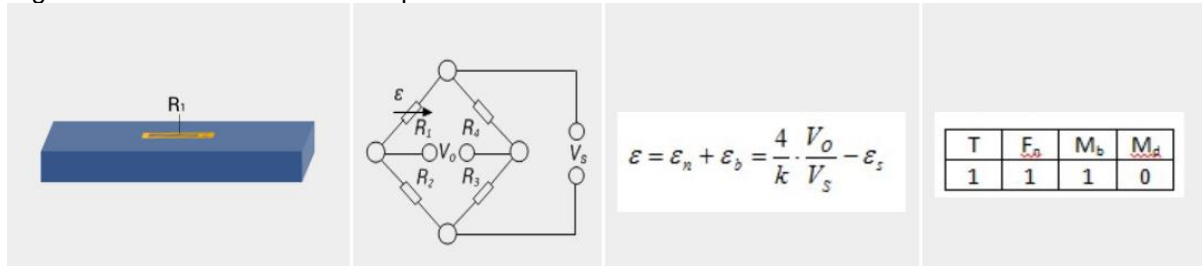
Figura 22. Sistema de conteo de ciclos.



### 7.3 DEFORMACIÓN

Para observar el comportamiento de la probeta se tiene una interfaz en LabVIEW, en la cual se adquiere la señal de deformación con un puente Wheatstone, este montaje se encuentra en el Anexo C.

Figura 23. Características medio puente Wheatstone



Fuente: HBM. El circuito de puente de Wheatstone. [en línea]. Consultado el 18 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>

Esta interfaz ayuda observar el comportamiento del puente Wheatstone y hacer las pruebas necesarias para un buen funcionamiento de este.

Figura 24. Interfaz para medir deformación

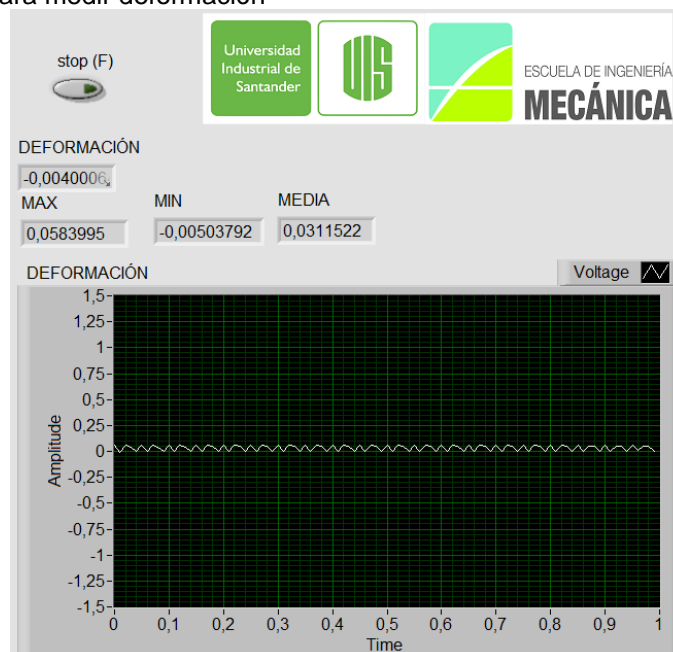
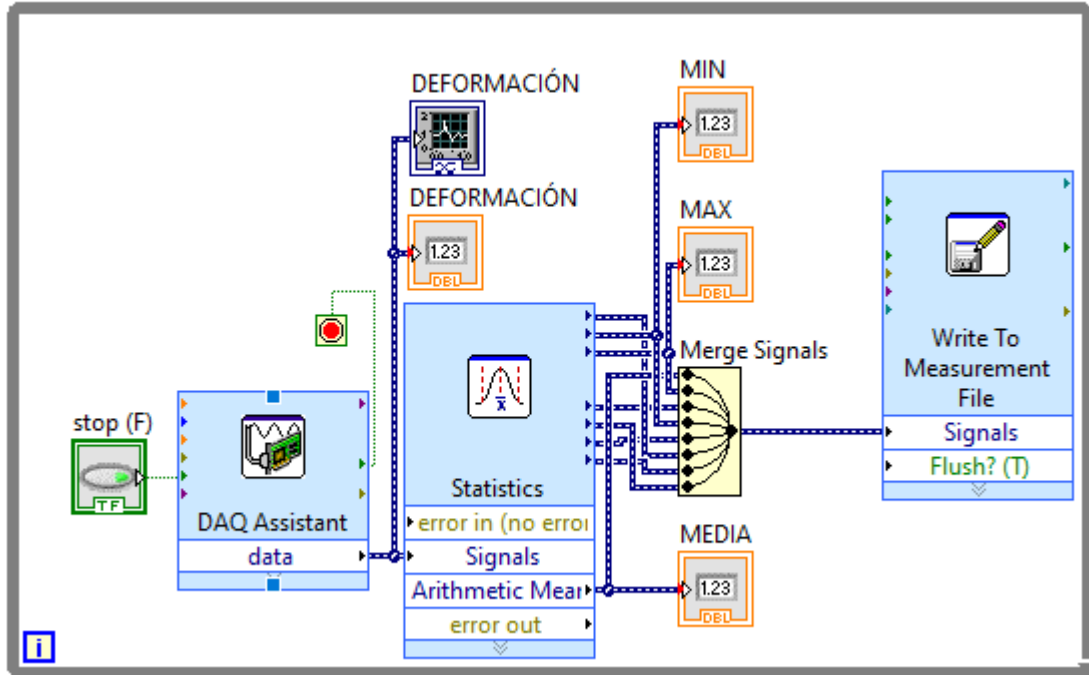


Figura 25. Programación para medir deformación



## 7.4 FUEZA Y DEFORMACIÓN

Adquiriendo las dos señales al tiempo, las cuales son valores de voltaje, se tiene una interfaz nueva y sencilla, donde el puente Wheaststone está conectado a la entrada analógica cero [0] y el sensor de carga se conectada a la entrada analógica uno [1] de la tarjeta myDAQ.

Creando esta interfaz se tiene una relación directa entre la fuerza y la deformación, ya que, si se maneja cada señal por aparte se tienen a generar dispersión en los resultados.

Figura 26. Interfaz para medir voltajes de fuerza y deformación

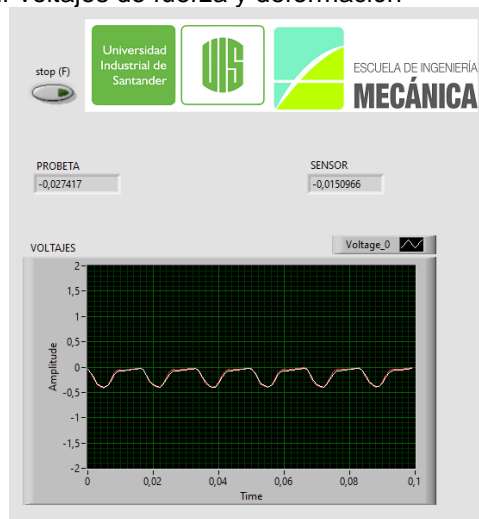
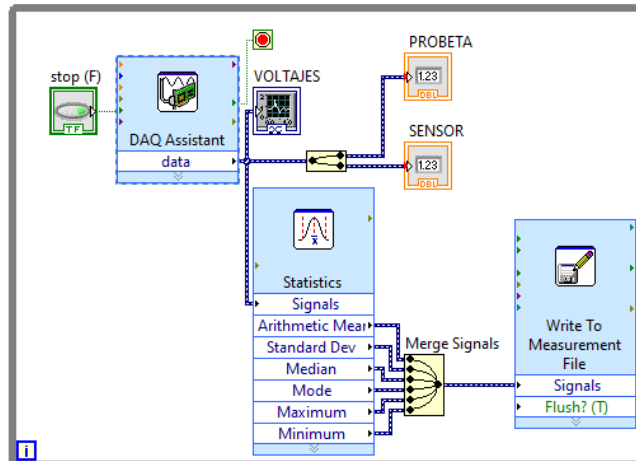


Figura 27. Programación para medir voltajes de fuerza y deformación

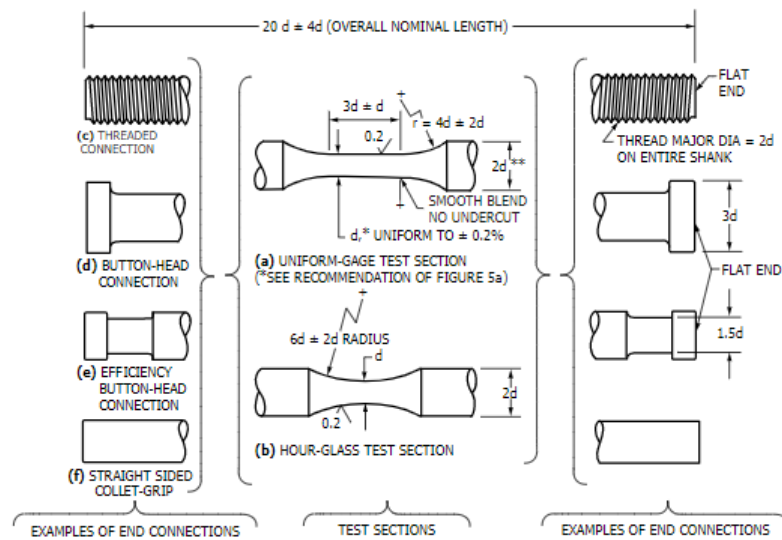


## 8. DISEÑO EXPERIMENTAL

### 8.1 PROBETA

El material de trabajo es aluminio y el diseño está basado bajo el numeral 7 de la norma ASME-E606 tal como se muestra en la figura 10, las probetas necesarias son 12 ya que se evalúan cuatro puntos de la curva SN, y en cada uno se utiliza como mínimo 3 probetas, el plano se encuentra en el Anexo F.

Figura 28. Características estándar de las probetas.



Fuente: ASTM. ASTM E606: standard practice for strain-controlled fatigue testing. Annual Book of ASTM Standards, 1998, vol. 3.

Figura 29. Probetas de aluminio.



## **8.2 VELOCIDAD**

El sistema cuenta con dos motores y dos variadores de frecuencia, así que, hay varias posibilidades de trabajo por lo tanto es necesario tener en cuenta la relación velocidades. Para que el sistema someta a las probetas a una carga uniforme es necesario que los dos motores estén a la misma velocidad y que esta no sea tan elevada.

La velocidad de trabajo está entre 200 rpm y 3500 rpm, teniendo en cuenta estos valores para calcular la curva multiaxial. Se analiza el comportamiento del material al someterlo a una carga fija y variar las condiciones de velocidad de los dos motores.

## **8.3 CARGA**

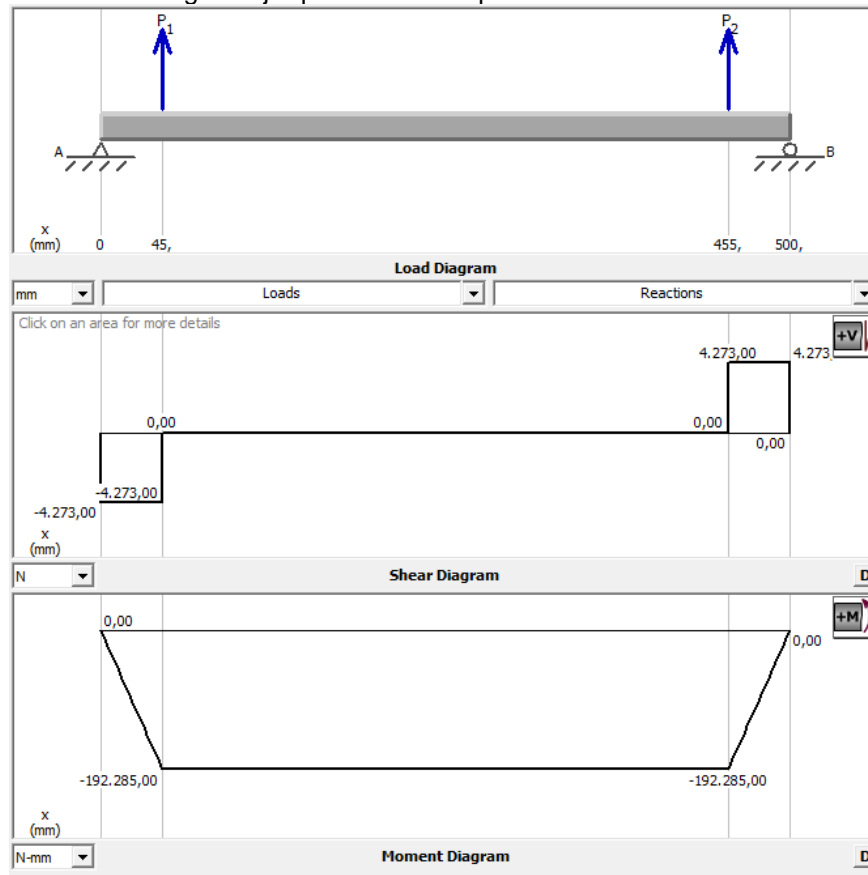
La fuerza que ejerce la máquina para flexionar la probeta está condicionada por la excéntrica, la cual permite generar diferentes deformaciones sobre el material.

Es necesario caracterizar el material, por medio de prueba de tracción se determina el  $S_y$  y con el montaje de recepción de recepción de señales mostrado en el numeral 7.4 mostrar el comportamiento del material en la máquina.

## **8.4 RELACIÓN FUERZA - ESFUERZO**

Como en el sistema se está midiendo la carga y no esfuerzo es necesario determinar cómo es el comportamiento del sistema, el sistema trabaja como si fuese una viga con dos apoyos (juntas homocinéticas) y sometida a dos fuerzas que flexionan el sistema.

Figura 30. Condición de carga el eje que sostiene la probeta



Analizando la probeta se efectúa un Momento  $M = F \cdot 45$  [N\*mm], y como la probeta está sometida a flexión se tiene:

$$M = F \cdot 45 \text{ [N*mm]}$$

$$C = \frac{6,35}{2}$$

$$I = \frac{\pi \cdot C^4}{4}$$

$$S = M \cdot \frac{C}{I}$$

$$S = 1,7902 \cdot F$$

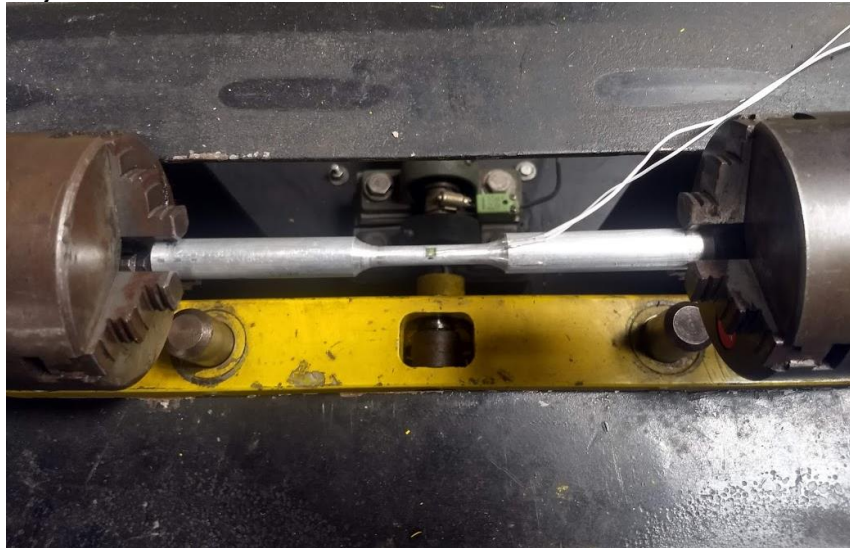
## 9. RESULTADOS

Se realizan varias pruebas las cuales reflejan algunas características y comportamiento del material, en este caso aluminio.

### 9.1 ENSAYO DE FLEXIÓN CON MÁQUINA DE FATIGA

El ensayo consiste en ver el comportamiento de la probeta al someterla a un momento y configuración de la máquina, esto con el fin de tener una relación directa entre deformación-fuerza, para más detalles del montaje consultar Anexo G.

Figura 31. Montaje de medición de deformación.



**9.1.1 Medición fuerza y deformación.** Tomando la interfaz 7.4 para realizar la medición, se hace el montaje de la probeta en la máquina y se realizan pruebas con la respectiva toma de datos.



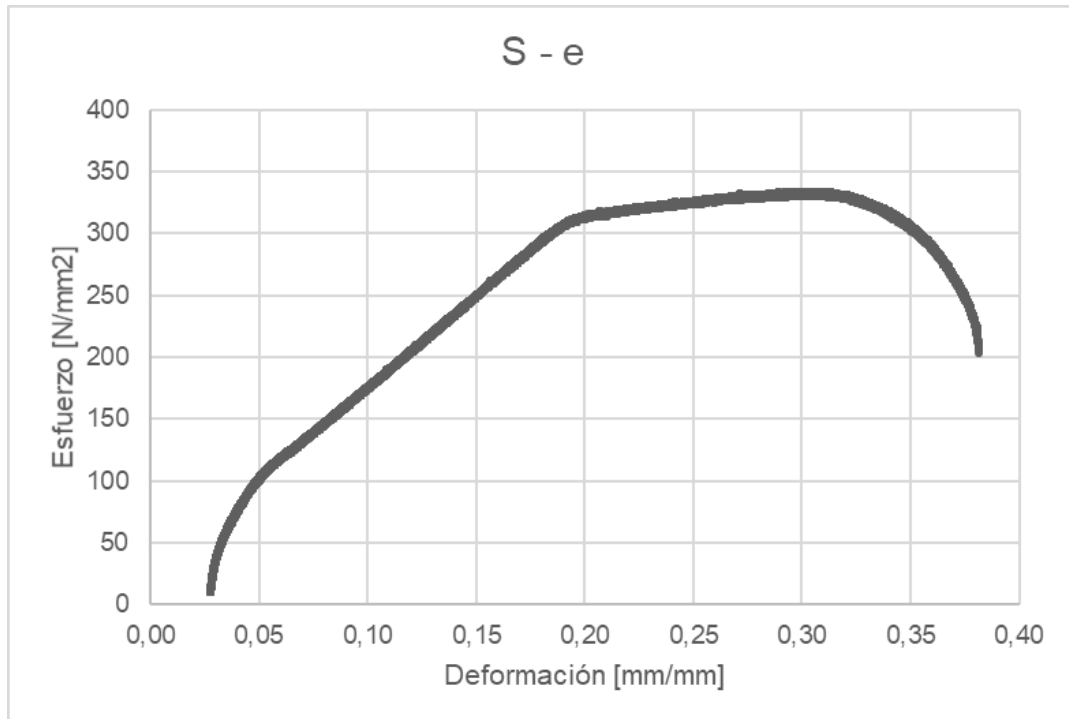
## 9.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

Para la prueba de tracción se sometió una probeta a la máquina de ensayos mecánicos y se obtuvo la siguiente curva de comportamiento:

Figura 34. Probeta ensayo tracción.



Figura 35. Grafica de tracción.



Lo= 6,35 [mm] (Longitud Inicial)

Do= 25.4 [mm] (Diámetro Inicial)

Su= 333 [N/mm<sup>2</sup>] (Esfuerzo Ultimo)

Sf= 203 [N/mm<sup>2</sup>] (Esfuerzo Fractura)

Sy= 314 [N/mm<sup>2</sup>] (Esfuerzo Fluencia)

Spl= 305 [N/mm<sup>2</sup>] (Limite proporcional)

### 9.3 ENSAYO DE FATIGA

Sometiendo a las probetas a diferentes cargas y diferentes configuraciones de ensayo; en el Anexo I se muestra el comportamiento de cada probeta y se tiene:

Tabla 21. Resumen de la prueba fatiga.

PROBETA	ENSAYO	S[N/mm <sup>2</sup> ]	N	OBSERVACIÓN
1	Multiaxial	442,0700915	12917	Doblada.
2	Multiaxial	357,9831982	13345	Partida en el extremo forma horizontal.
3	Alternativo	550,1630684	1469	Partida en el extremo línea central más opaca.
4	Multiaxial	153,9879759	69	Doblada.
5	Multiaxial	461,5730411	9155	Partida en el extremo forma cóncava.
6	Alternativo	548,9553444	2174	Partida en el extremo forma cóncava grieta central.
7	Multiaxial	522,4193199	4326	Partida fragmentada y central más opaca bordes brillantes.
8	Alternativo	554,4494874	1734	Partida en el centro pequeña línea central opaca y áreas laterales brillantes.

Tabla 22. Análisis de velocidad.

PROBETA	ENSAYO	S[N/mm <sup>2</sup> ]	N	Motor 1	Motor 2	OBSERVACIÓN
9	Multiaxial	498,2406015	1158	8,23Hz	4.15Hz	Fractura irregular en el extremo de la probeta.
10	Multiaxial	457,5880746	4328	4,03Hz	8,03Hz	Doblada.

Tabla 23. Análisis giro de motores.

PROBETA	ENSAYO	S[N/mm <sup>2</sup> ]	N	Motor 1	Motor 2	OBSERVACIÓN
11	Multiaxial Derecha	404,8576051	6982	5,08Hz	4,98Hz	Fractura horizontal bordes brillantes.
12	Multiaxial Izquierda	423,1627041	7021	5,08Hz	4,98Hz	Fractura horizontal en el extremo.

Figura 36. Probetas ensayo fatiga.



Figura 37. Medición de fuerza.

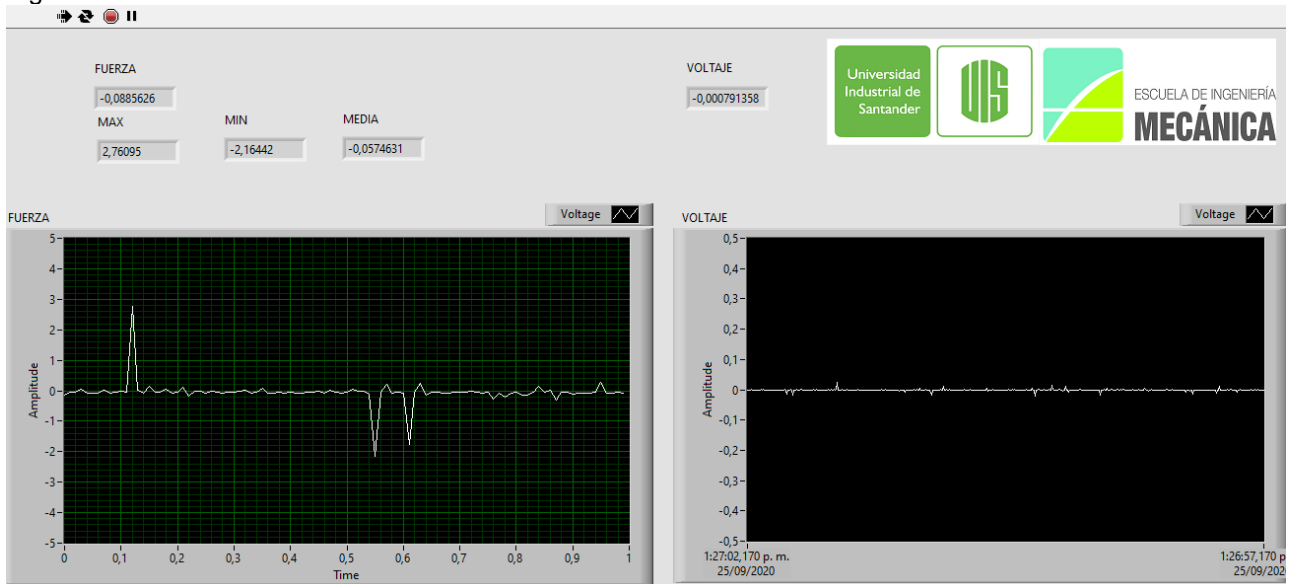


Figura 38. Gráfica de fatiga S – N multiaxial.

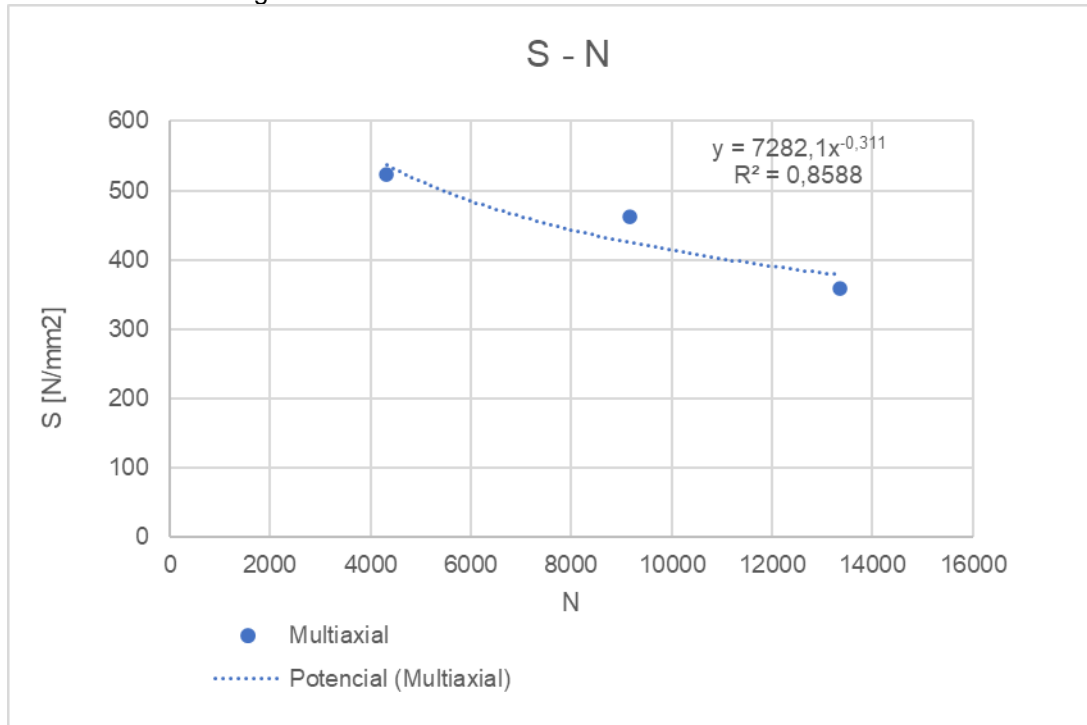
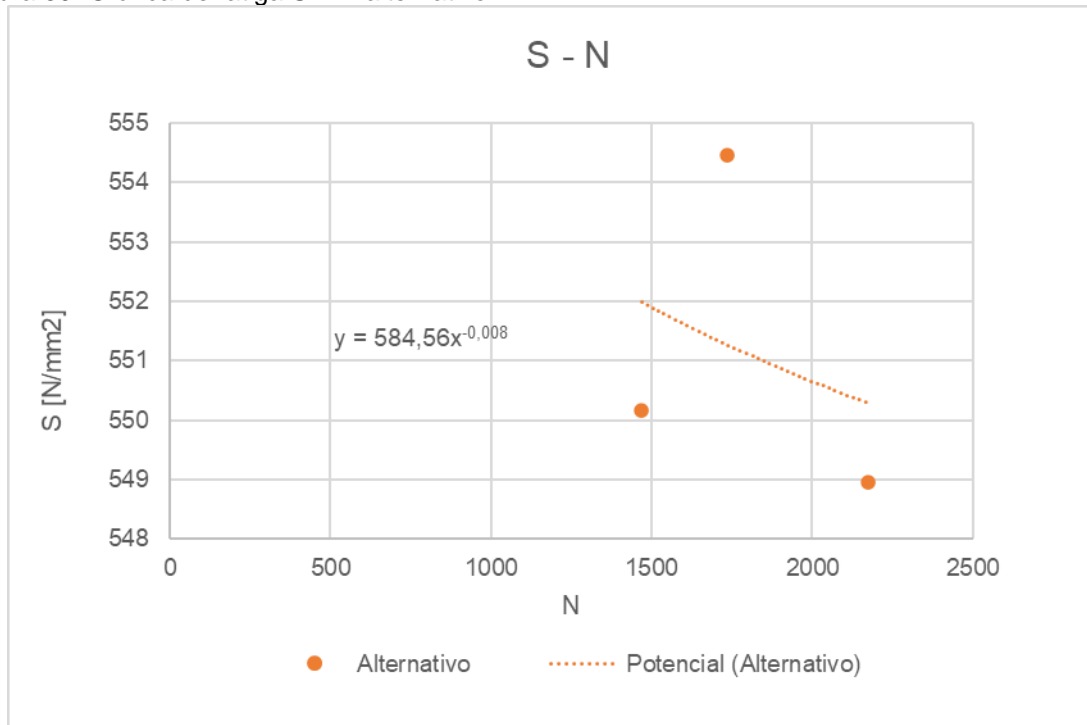


Figura 39. Gráfica de fatiga S – N alternativo.



## 10. ANALISIS DE RESULTADOS

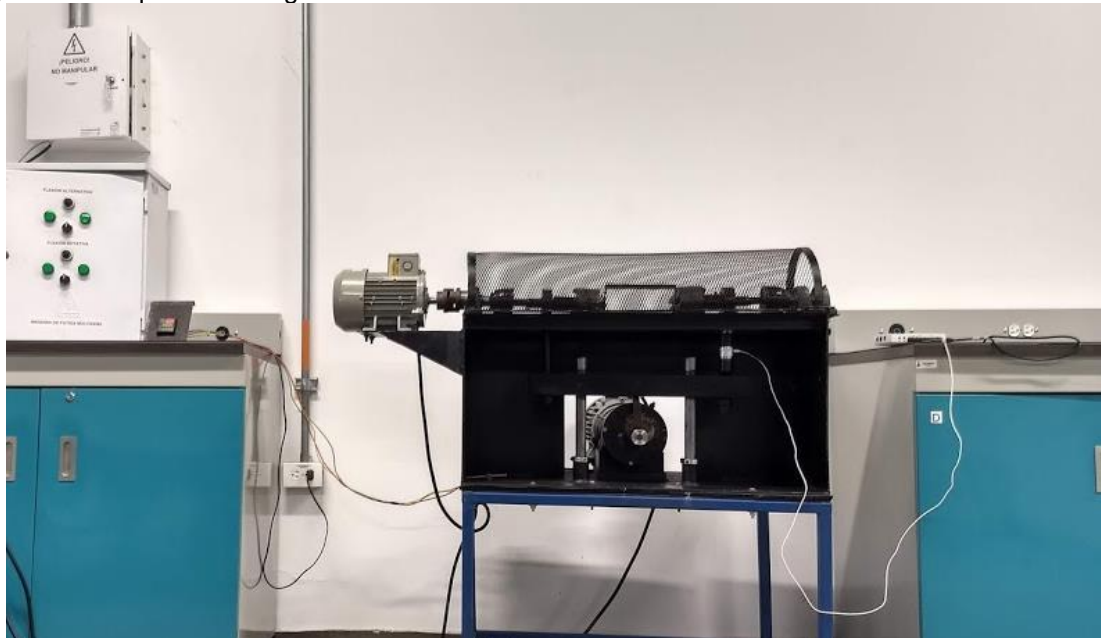
- El estado de la máquina posterior a los cambios realizados es:

Tabla 24. Estado de la máquina.

SUBCONJUNTO	ESTADO INICIAL	ESTADO FINAL
Bastidor	64.7%	85.9%
Sistema rotacional 1	55.3%	85.9%
Sistema de sujeción posterior	67.1%	91.7%
Sistema de flexión alternativa	76.7%	80%
Sistema rotacional 2:	58.8%	85.9%
Sistema Eléctrico	58.6%	94.3%

El estado de cada subconjunto está por encima del 80%, tomando que cada subconjunto tiene igual importancia se tiene que la maquina se encuentra en un 87.3%, para observar a detalle la evolución de cada subconjunto consultar Anexo J.

Figura 40. Máquina de Fatiga Multiaxial.

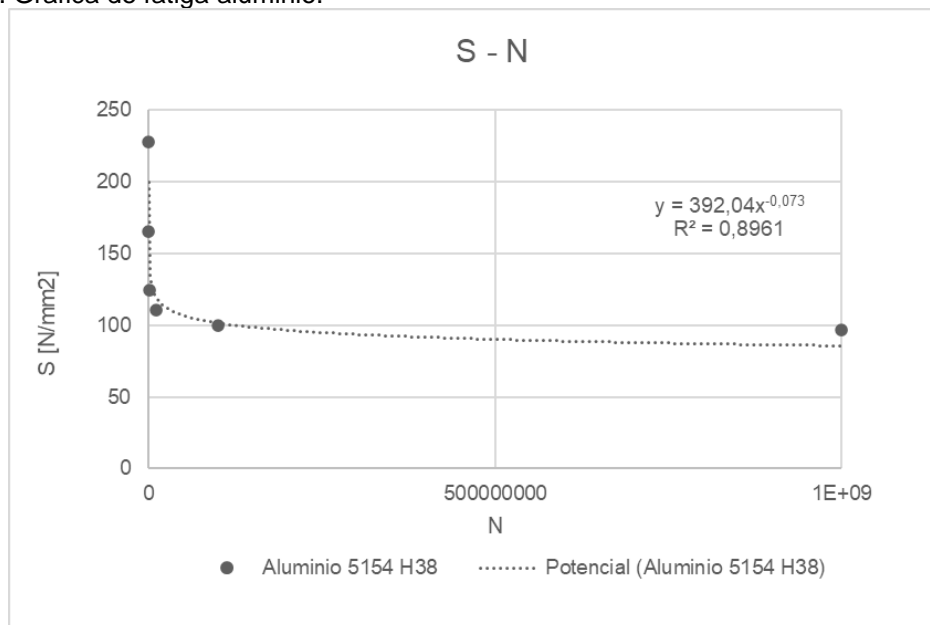


- El comportamiento de la probeta en el maquina está determinado por la curva:  
 $y = -1141x - 44.201$  donde la variable “y” representa el esfuerzo que se ejerce sobre la probeta y la variable “x” indica la deformación, entonces, el esfuerzo tiene relación directa y lineal con la deformación.

- Con la prueba de tracción de observa que el aluminio que más se acerca las propiedades experimentales es 5154-H38 con un esfuerzo ultimo de 330MPa y Sy de 270MPa.

- La curva S-N de aluminio 5154-H38<sup>8</sup>, para un R de -1 y una condición de carga a flexión se tiene:

Figura 41. Grafica de fatiga aluminio.



- Comparando los resultados de la prueba de fatiga a flexión alternativa (Figura 39) y la curva de fatiga del aluminio 5151 H38, se observa que los datos que muestra la máquina es una fatiga plástica y sus datos están por encima de su esfuerzo ultimo.

<sup>8</sup> DRAGOLICH, Kathleen S., et al. Fatigue data book: light structural alloys. Asm International, 1994. 59 p.

- Las mediciones realizadas de forma multiaxial están en un rango de 0 a 15000 ciclos de carga ya que las probetas están bajo unas condiciones de carga elevada.
- Según el análisis de velocidad se contempla que el motor 2 al manejar una velocidad elevada afecta considerablemente la buena realización de la prueba, ya que, las probetas tienden a doblarse por la relación de velocidades de los motores.
- La dirección de giro de motores no afecta en mayor medida los resultados de la prueba, pero es importante es manejar una coherencia en la aplicación de la carga.
- Las probetas al someterse a una fatiga alternativa tiende a fallar primero que, en la fatiga multiaxial porque la carga se aplica en un solo punto de la probeta.

## 11. RECOMENDACIONES

- Debido al realizarse el cambio de acoples/juntas la longitud donde se monta la probeta se dilato, por lo tanto, es necesario que las probetas sean más largas para dar un mejor agarre y se aplique la carga de una manera más uniforme.
- La velocidad de trabajo deben ser bajas para que no haya tanta vibración y no se generen alteraciones en los resultados.
- Al momento de realizar una prueba para cada valor de esfuerzo escogido se aconseja al menos romper 4 probetas, ya que, en este tipo de pruebas se maneja una alta dispersión en los resultados.

## 12. COSTOS

Tabla 30. Costos asociados al proyecto.

CAMBIO DE ACOUPLE/JUNTA					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	JUNTAS HOMOCINETICAS	\$60000 c/u	\$120.000		\$120.000
2	MECANIZADO + SOLDADURA	\$9000/Probeta	\$400.000		\$400.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$520.000</b>	<b>\$0</b>	<b>\$520.000</b>
BRAZO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	MATERIALES	Acero AISI 4140	\$15.000		\$15.000
2	MECANIZADO		\$150.000		\$150.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$165.000</b>	<b>\$0</b>	<b>\$165.000</b>
SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	MOTOR 2			\$850.000	\$850.000
2	ACOUPLE		\$57.000		\$57.000
3	MECANIZADO ACOUPLE		10000		\$10.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$67.000</b>	<b>\$850.000</b>	<b>\$917.000</b>
SISTEMA DE SUJECIÓN A PISO					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	MATERIAL	Placas y ángulos	\$50.400		\$50.400
2	MECANIZADO SOLDADURA			30000	\$30.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$50.400</b>	<b>\$30.000</b>	<b>\$80.400</b>
SISTEMA ELÉCTRICO					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	POTENCIOMETROS	\$80000 c/u	\$160.000		\$160.000
2	INDICADORES LED	\$7000 c/u	\$28.000		\$28.000
3	MULETILLAS	\$10000 c/u	\$20.000		\$20.000
4	INSTALACIÓN		\$300.000		
6	VARIADORES DE FRECUENCIA			\$1.551.641	\$1.551.641
<b>TOTALES</b>			<b>\$508.000</b>	<b>\$1.551.641</b>	<b>\$1.759.641</b>
SISTEMA DE ADQUISIÓN DE DATOS					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	TARJETA myDAQ			\$1.000.000	\$1.000.000
2	MATERIALES ELECTRONICOS		\$20.000		\$20.000
3	SOLDADURA		\$5.000		\$5.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$25.000</b>	<b>\$1.000.000</b>	<b>\$1.025.000</b>

VARIOS					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	PAPELERIA		\$20.000		\$20.000
2	OTROS	HERRAMIENTAS	\$30.000		\$30.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$50.000</b>	<b>\$0</b>	<b>\$50.000</b>

ASESORAMIENTO					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	DIRECTOR			\$9.150.000	\$9.150.000
2	INFRAESTRUCTURA			\$300.000	\$300.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$0</b>	<b>\$12.500.000</b>	<b>\$11.403.000</b>

ACUMULADO					
No.	DESCRIPCIÓN	JUSTIFICACIÓN	RECURSOS		TOTAL
			Efectivo	Especie	
1	CAMBIO DE ACOPLÉ/JUNTA		\$520.000	\$0	\$520.000
2	BRAZO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA		\$165.000	\$0	\$165.000
3	SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA		\$67.000	\$850.000	\$917.000
4	SISTEMA DE SUJECIÓN A PISO		\$50.400	\$30.000	\$80.400
5	SISTEMA ELÉCTRICO		\$508.000	\$1.551.641	\$1.759.641
6	SISTEMA DE ADQUISIÓN DE DATOS		\$25.000	\$1.000.000	\$1.025.000
7	VARIOS		\$50.000	\$0	\$50.000
8	ASESORAMIENTO		\$0	\$12.500.000	\$11.403.000
<b>TOTALES</b>			<b>\$1.385.400</b>	<b>\$15.931.641</b>	<b>\$15.920.041</b>

### 13. CONCLUSIONES

- La metodología utilizada para determinar el estado de la máquina, ayuda a visualizar con mayor claridad que elementos afectan de manera significativa al sistema mecánico y la valoración de las alternativas de mejora es indispensable porque permite comparar y encontrar la mejor solución.
- El sistema de adquisición de datos recolecta información, la procesa y la tabula de tal forma que se obtienen valores máximos, mínimos y promedios de la carga fluctuante los cuales son esenciales para generar la gráfica S vs N.
- La máquina de fatiga multiaxial permite la realización de múltiples análisis de materiales metálicos, ya que puede cambiar algunas de sus variables de operación y así generar diferentes configuraciones de prueba, como: variación de velocidad de los motores de forma independiente, dirección de giro de los motores y aplicación de carga sobre la probeta.
- El aluminio analizado tiene un comportamiento de fatiga con condiciones multiaxiales de  $S = 7282.1N^{-0.311}$  , bajo condiciones de fatiga de flexión alternativa es de  $S = 584.56N^{-0.008}$  , teniendo en cuenta que estos datos están dentro de la fatiga plástica.
- La máquina está en óptimas condiciones para la realización de ensayos de fatiga a flexión alternativa y flexión rotativa de forma individual, también de forma multiaxial con la combinación de los dos ensayos.

## BIBLIOGRAFIA

ARANA, José y GONZÁLEZ, Javier. Mecánica de fractura. Zarautz: Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco, 2002. p.183. ISBN: 84-8373-455-9

ASTM. ASTM E606: standard practice for strain-controlled fatigue testing. Annual Book of ASTM Standards, 1998, vol. 3.

AUTONICS. Contadores y temporizadores. [pdf]. Consultado el 27 de agosto de 2019. Disponible en: <http://www.alefindustrial.com/AUTONICS/contadores%20temporizadores.pdf>

CHAMPY, M. H. (2005). REINGENIERÍA, Olvide lo que usted sabe sobre cómo debe funcionar una empresa. ¡Casi todo esta errado! (M. D. G., Ed., & J. C. NANNETTI, Trad.) BOGOTÁ, COLOMBIA: NORMA. Recuperado el 28 de julio de 2017

CONEJO-MAGAÑA, Gilberto Daniel, GUIZAR-GÓMEZ, Carlos Alberto, LARA-HERNÁNDEZ, Rafael y PONCIANO-GUZMÁN, José Nicolás, Reingeniería en el diseño de productos. Revista de Ingeniería Innovativa 2017

DRAGOLICH, Kathleen S., et al. Fatigue data book: light structural alloys. Asm International, 1994. 59 p.

FREITAS, M. Multiaxial fatigue: From materials testing to life prediction. Lisboa, Portugal: ELSEVIER. 2017. Theoretical and Applied Fracture Mechanics vol 92, 360-372 p.

HAMROCK, Bernard J., et al. Fundamentals of machine elements. Elementos de máquinas. 2000.

HBM. El circuito de puente de Wheatstone. [en línea]. Consultado el 18 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>

LORENZO, S., MIRA, J., OLARTE, M., GUERRERO, J., & MOYANO, S. (15 de mayo de 2004). Analisis matricial de la voz del cliente: QFD aplicado a la gestión sanitaria. Gac. Sanitaria {online}, 18(12), 464-471. Recuperado el 28 de 07 de 2017

MARCO, Eva. Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario. Tesis pregrado. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. ¿Cómo hacer Adquisición de Datos para proyectos académicos? [en línea]. Consultado el 27 de agosto de 2019. Disponible en: <https://forums.ni.com/t5/Academia-en-Latinoamérica/Cómo-hacer-Adquisición-de-Datos-para-proyectos-académicos/ta-p/3498110?profile.language=es>

ROBERT, C. JUVINALL. Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica. Limusa, Mexico, 1991.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER (2018). MULTIAXIAL FATIGUE MACHINE. WO2018/116092A1