

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 23 de Octubre de 2015

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

_____ Diego Fernando Medina _____, con C.C. No. _____ 1075245253 _____,
 _____ Sergio Luis Gutiérrez Salazar _____, con C.C. No. _____ 1075229217 _____,
 _____, con C.C. No. _____,
 _____, con C.C. No. _____,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o _____

titulado Diseño e Implementación de un Prototipo de Sistema para la Medición de Resistencia a Tensión Mecánica y Deformación de Cables de Acero presentado y aprobado en el año 2015 como requisito para optar al título de

_____ Ingeniero Electrónico _____;

autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.

- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.

- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					  	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: _____

	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 5

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Diseño e implementación de un prototipo de sistema para la medición de resistencia a tensión mecánica y deformación de cables de acero

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Medina	Diego Fernando
Gutiérrez Salazar	Sergio Luis

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Salgado Patrón	José de Jesús

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Salgado Patrón	José de Jesús

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero Electrónico

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería Electrónica



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 5
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2015 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 81

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos ___ Ilustraciones en general X Grabados ___ Láminas ___ Litografías ___ Mapas ___ Música impresa ___ Planos X Retratos ___ Sin ilustraciones ___ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Word 2013 o versiones más recientes

MATERIAL ANEXO: Hoja técnica de los cables de acero puestos a prueba; hoja técnica del actuador lineal eléctrico B-Track K2G05 y hoja técnica de la celda de carga SA.

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>Ensayo a Tracción</u>	<u>Traction Test</u>	6. <u>Resistencia a Tracción</u>	<u>Resistance to Traction</u>
2. <u>Actuador Lineal Eléctrico</u>	<u>Electric Linear Actuator</u>	7. <u>Rigidez</u>	<u>Stiffness</u>
3. <u>Celda de Carga de Tracción</u>	<u>Traction Load Cell</u>	8. <u>Ductilidad</u>	<u>Ductility</u>
4. <u>Esfuerzo</u>	<u>Stress</u>	9. <u>Fragilidad</u>	<u>Brittleness</u>
5. <u>Deformación</u>	<u>Strain</u>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este proyecto de grado consiste en el diseño y la construcción de un prototipo de sistema que realiza ensayos o pruebas a tracción de cables de acero (guayas) de diámetros pequeños, más específicamente diámetros de 0.8, 1.2 y 1.6 mm para cables de acero con alma de acero y 1.6 mm de diámetro para cables de acero con alma de fibra. Cada prueba a tracción que realiza el prototipo se hace bajo la norma técnica colombiana 2961 y su resultado es una gráfica de esfuerzo-deformación a partir de la cual mediante indicadores



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

3 de 5

numéricos específicos se conocen las principales características mecánicas del cable que se pone a prueba.

El prototipo se constituye por un sistema mecánico cuyo elemento principal es un actuador lineal eléctrico que tiene como función ejercer fuerza de tracción sobre el cable que se pone a prueba hasta que éste llegue a su rotura; dicho actuador es controlado desde la interfaz visual de un programa hecho en LabView. El prototipo también se constituye de un sistema de adquisición de los datos de la fuerza y del alargamiento que sufre el cable durante la prueba, dichos datos son adquiridos mediante una celda de carga de tracción y un sensor infrarrojo de desplazamiento cuyas señales de voltaje son amplificadas, filtradas y convertidas a formato digital para ser enviadas al programa hecho en Labview. El programa convierte dichas señales de voltaje en datos de fuerza, alargamiento, esfuerzo y deformación, y genera una gráfica de fuerza vs alargamiento y otra de esfuerzo vs deformación a partir de la cual mediante indicadores numéricos específicos determina las principales propiedades mecánicas del cable puesto a prueba las cuales son la resistencia a tracción, la rigidez, la ductilidad y la fragilidad.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

4 de 5

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This degree project consists of the design and construction of a prototype of a system that performs trials or tests to traction of steel wire ropes of small diameters, more specifically diameters from 0.8, 1.2 and 1.6 mm for steel wire ropes with steel core and 1.6 mm in diameter for steel wire ropes with fibre core. Each test traction made for the prototype is made under the Colombian technical standard 2961 and its result is a graph of stress-strain from which by means of specific numerical indicators are known the mechanical characteristics of the Steel wire rope that is put to test.

The prototype is made up of a mechanical system whose main element is an electric linear actuator which makes traction force on the cord that is put to test until it gets broken; This actuator is controlled from the visual interface of a program made in LabView. The prototype also is made up of a system of data acquisition of strength and elongation that suffers the wire rope during the test, these data are acquired by using a traction load cell and an infrared sensor of displacement whose voltage signals are amplified, filtered and converted to digital format to be sent to the program made in Labview. The program converts these signals from voltage in force, elongation, stress and strain data, and generates a graph of force against elongation and other stress against strain from which by means of specific numerical indicators determines the main mechanical properties of the wire rope tested which are resistance to traction, stiffness, ductility and brittleness.



GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO



CÓDIGO

AP-BIB-FO-07

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

5 de 5

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: German Martínez

Firma: _____

Nombre Jurado: Agustín Soto Otálora

Firma: _____

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA PARA LA
MEDICIÓN DE RESISTENCIA A TENSIÓN MECÁNICA Y DEFORMACIÓN DE
CABLES DE ACERO**

SERGIO LUIS GUTIERREZ SALAZAR
Cód. 2008276095

DIEGO FERNANDO MEDINA
Cód. 2008171918

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, HUILA
2014**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA PARA LA
MEDICIÓN DE RESISTENCIA A TENSIÓN MECÁNICA Y DEFORMACIÓN DE
CABLES DE ACERO**

**Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTRÓNICO**

Presentado por:

**SERGIO LUIS GUTIERREZ SALAZAR
Cód. 2008276095**

**DIEGO FERNANDO MEDINA
Cód. 2008171918**

Director:

ING. JOSÉ DE JESÚS SALGADO PATRÓN MSC.

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA, HUILA
2015**

Nota de aceptación:

Firma del director del proyecto

Firma del primer jurado

Firma del segundo jurado

Neiva, 7 de noviembre de 2014

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza y mostrarme el camino a seguir para alcanzar de la mejor manera cada una de mis metas propuestas;
A mis dos grandes amores María Delia Perdomo y Nancy Medina, porque siempre han estado ahí para brindarme su amor y apoyo incondicional;
A todos mis amigos, que de una u otra manera han estado conmigo en los buenos y malos momentos.

Diego Fernando Medina

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Surcolombiana, por darnos la oportunidad de formarnos como profesionales íntegros y como personas de bien.

A nuestro director de proyecto de grado Msc. Ing. Jose de Jesús Salgado Patrón y a nuestros jurados Ing. Agustín Soto e Ing. Germán Martínez por regalarnos parte de su tiempo y de esta manera guiarnos en el desarrollo de este proyecto.

A todos nuestros compañeros, amigos y conocidos que de una u otra manera estuvieron ahí para brindarnos su apoyo y darnos una mano cuando más lo necesitábamos.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	17
1.1 PROPÓSITO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES.....	17
1.2 CONCEPTO DE FUERZA O CARGA.....	18
1.3 CARGAS AXIALES DE TRACCIÓN O COMPRESIÓN.....	18
1.4 CONCEPTO DE ESFUERZO.....	18
1.5 ESFUERZOS NORMALES.....	19
1.6 CONCEPTO DE DEFORMACIÓN.....	20
1.7 DEFORMACIONES POR CARGAS AXIALES.....	20
1.8 RELACIÓN ESFUERZO-DEFORMACIÓN.....	22
1.8.1 Ley de Hooke.....	22
1.8.2 Ensayo o prueba a tracción.....	23
1.8.3 Gráfico esfuerzo-deformación.....	24
1.9 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.....	26
1.9.1 Resistencia a tracción.....	26
1.9.2 Ductilidad y fragilidad.....	26
1.9.3 Rigidez.....	27
2. ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO.....	28
2.1 ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO B-TRACK K2G05.....	28
2.2 CABLES DE ACERO PUESTOS A PRUEBA.....	30
2.3 MODELO 3D DEL SISTEMA MECÁNICO.....	31
2.4 ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RIEL MECÁNICO.....	32
2.5 ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ELEMENTO MÓVIL.....	35
2.6 SISTEMA MECÁNICO COMPLETO.....	37
3. ELEMENTOS, DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	38
3.1 CELDA DE CARGA DE TRACCIÓN SA.....	38
3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE SEÑAL DE CELDA DE CARGA SA.....	40
3.3 SENSOR INFRARROJO DE DESPLAZAMIENTO GP2Y0A02YK.....	42
3.4 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE SEÑAL DE SENSOR INFRARROJO DE DESPLAZAMIENTO GP2Y0A02YK.....	43
3.5 TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO UNO.....	46
3.6 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA HECHO EN LABVIEW.....	47

3.6.1 PANEL DE CONTROL.....	47
3.6.2 DIAGRAMA DE BLOQUES.....	48
3.7 ETAPA DE POTENCIA: INVERSOR DE GIRO DE MOTOR DC.....	51
3.8 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO COMPLETO.....	53
3.9 DIAGRAMA DE CIRCUITO IMPRESO.....	54
3.10 VISUALIZACIÓN 3D DEL CIRCUITO.....	56
4. VALIDACIÓN DE LAS MEDICIONES HECHAS POR EL PROTOTIPO.....	58
4.1 VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA SA.....	58
4.2 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE LA CELDA DE CARGA SA.....	59
4.3 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL SENSOR GP2Y0A02YK.....	62
5. RESULTADOS.....	67
5.1 VERIFICACIÓN DE LA REPETITIVIDAD DE LAS MEDICIONES.....	67
5.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CABLES DEL CUADRO 1.....	68
6. CONCLUSIONES.....	74
7. RECOMENDACIONES.....	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS.....	77

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cargas axiales de tracción y de compresión sobre una barra.....	18
Figura 2. Barra sometida a fuerzas iguales y opuestas	18
Figura 3. Fuerza soportada por cada unidad de área transversal de un cuerpo.....	19
Figura 4. Cuerpos sometidos a esfuerzos normales	20
Figura 5. Deformación generada por cargas de tracción y compresión.....	21
Figura 6. Relación entre fuerza y alargamiento	22
Figura 7. Relación entre esfuerzo y deformación	23
Figura 8. Probeta mecanizada	24
Figura 9. Máquina universal de ensayos.....	24
Figura 10. Tramos y valores característicos en un gráfico Esfuerzo–Deformación..	25
Figura 11. Gráfico convencional y real de esfuerzo-deformación.....	26
Figura 12. Principales propiedades mecánicas de los materiales en función de un gráfico de esfuerzo-deformación	27
Figura 13. Principales elementos del sistema mecánico.....	28
Figura 14. Actuador B-TRACK K2G05.....	28
Figura 15. Tornillo sin fin de rosca de bolas y de rosca de tornillo.....	29
Figura 16. Velocidad y consumo de corriente del actuador en función de la carga...	29
Figura 17. Construcción 7x7, 1x19 y 8x19 de cables de acero.....	30
Figura 18. Modelo 3D del sistema mecánico.....	31
Figura 19. Modelo 3D del sistema mecánico desde otro ángulo.....	31
Figura 20. Perfiles de acero en forma de C.....	31
Figura 21. Longitud de perfiles de acero con placas calibre 16 en los extremos.....	33
Figura 22. Dimensiones y orificio de cada placa calibre 16.....	33
Figura 23. Tornillo graduador de la longitud del cable de acero.....	33
Figura 24. Vista lateral: Patas y marco soldados sobre los perfiles.....	34
Figura 25. Vista frontal: Patas y marco soldados sobre los perfiles.....	34
Figura 26. Tubos rectangulares soldados transversalmente a dos pares de patas..	34
Figura 27. Rodamientos del elemento móvil	35
Figura 28. Ejes del elemento móvil.....	35
Figura 29. Eje con los rodamientos.....	35
Figura 30. Placa del elemento móvil.....	35
Figura 31. Ejes soldados sobre la placa	36
Figura 32. Placa soporte de objeto a ser detectado por el sensor de distancia.....	36
Figura 33. Elemento móvil final.....	36
Figura 34. Sistema mecánico completo al iniciar una prueba	37
Figura 35. Sistema mecánico completo al finalizar una prueba.....	37

Figura 36. Diagrama de bloques global del prototipo de sistema.....	38
Figura 37. Celda de carga SA.....	39
Figura 38. Puente de Wheatstone de la celda de carga SA.....	39
Figura 39. Etapa de amplificación de la señal de salida de la celda de carga SA...	41
Figura 40. Sensor GP2Y0A02YK.....	41
Figura 41. Voltaje de salida del sensor GP2Y0A02YK en función de la distancia del objeto a detectar.....	42
Figura 42. Circuito divisor de voltaje.....	43
Figura 43. Circuito divisor de voltaje implementado con un potenciómetro lineal de precisión.....	44
Figura 44. Circuito divisor de voltaje y etapa de amplificación de señal del Sensor GP2Y0A02YK.....	45
Figura 45. Tarjeta de desarrollo Arduino Uno SMD	46
Figura 46. Panel frontal del programa hecho en Labview	47
Figura 47. Primera parte del diagrama de bloques del programa.....	49
Figura 48. Segunda parte del diagrama de bloques del programa.....	50
Figura 49. Circuito inversor de giro de motor DC	51
Figura 50. Relé 12v-30A.....	52
Figura 51. Diagrama esquemático del circuito completo.....	54
Figura 52. Circuito impreso de las etapas de amplificación y del circuito inversor de giro.....	54
Figura 53. Área transversal a partir de amperaje e incremento de temperatura....	55
Figura 54. Ancho de pista a partir de su área transversal y su espesor.....	56
Figura 55. Modelo 3D de la placa de circuito impreso.....	56
Figura 56. Modelo 3D de los componentes montados sobre la placa.....	57
Figura 57. Medición de R_3 del puente de Wheatstone de la celda de carga SA.....	58
Figura 58. Medición de R_4 del puente de Wheatstone de la celda de carga SA.....	58
Figura 59. Prueba de la celda de carga con un disco de 10lb (4.54kg).....	59
Figura 60. Prueba de la celda de carga con un disco de 12lb (5.44kg).....	60
Figura 61. Prueba de la celda de carga con un disco de 25lb (11.34kg).....	60
Figura 62. Prueba de la celda de carga con un disco de 50lb (22.68 kg).....	61
Figura 63. Prueba de la celda de carga con un peso de 75lb (34.02kg).....	62
Figura 64. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 20cm.....	63
Figura 65. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 25cm.....	63
Figura 66. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 30cm.....	64
Figura 67. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 35cm.....	64
Figura 68. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 40cm.....	65
Figura 69. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 34cm.....	65
Figura 70. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 34.5cm.....	66

Figura 71. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 1.....	68
Figura 72. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 1.....	68
Figura 73. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 2.....	69
Figura 74. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 2.....	69
Figura 75. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 3.....	70
Figura 76. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 3.....	70
Figura 77. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 4.....	71
Figura 78. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 4.....	71
Figura 79. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 5.....	72
Figura 80. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 5.....	72
Figura 81. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 6.....	73
Figura 82. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 6.....	73

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Características de cables de acero puestos a prueba.....	30
Cuadro 2. Sentido de desplazamiento del actuador en función de V_{pin2} y V_{pin7}	52
Cuadro 3. Resultados de cinco pruebas hechas a un mismo tipo cable.....	67

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Hoja técnica de los cables de acero puestos a prueba.....	77
Anexo B. Hoja técnica del actuador lineal eléctrico B-TRACK K2G05.....	78
Anexo C. Hoja técnica de la celda de carga SA.....	80

GLOSARIO

NTC 2961: norma técnica colombiana que establece la manera de llevar a cabo un ensayo destructivo a tensión de cables de acero de propósito general con el fin de medir su carga real de rotura.

ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO: dispositivo mecánico que convierte el movimiento de rotación de un motor de corriente continua o alterna de baja tensión en movimiento lineal, es decir, en movimientos de línea recta.

CABLE DE ACERO: cable de uso mecánico constituido por una determinada cantidad de torones o trenzas colocados o cerrados en forma helicoidal alrededor de un núcleo o alma de soporte.

TIPO DE CONSTRUCCIÓN DE CABLE DE ACERO: nomenclatura que indica la cantidad de torones y la cantidad de alambres por torón que tiene un cable de acero.

CELDA DE CARGA: transductor o sensor que convierte energía mecánica (fuerza) en señales eléctricas de voltaje.

LUZ INFRARROJA: tipo de radiación electromagnética y térmica emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 Kelvin, es decir, -273,15 grados Celsius (cero absoluto).

AMPLIFICACIÓN: procesamiento que se le da a una señal eléctrica de voltaje con el fin de que su sensibilidad sea mayor al voltaje de resolución de un microcontrolador.

FILTRACIÓN: procesamiento que se le da a una señal eléctrica de voltaje con el fin de eliminar señales de ruido sobre ella que generan errores en la lectura de la información de dicha señal.

ADC: conversión de una señal analógica a formato digital con el fin de ser procesada por un microcontrolador u ordenador.

ARDUINO UNO SMD: microcontrolador o tarjeta de desarrollo de proyectos de electrónica utilizada principalmente para hacer adquisición de datos hacia un ordenador.

LABVIEW: plataforma o entorno de programación gráfico utilizado para el desarrollo de programas generalmente aplicados al campo de investigación industrial.

RESUMEN

Este proyecto de grado consiste en el diseño y la construcción de un prototipo de sistema que realiza ensayos o pruebas a tracción de cables de acero (guayas) de diámetros pequeños, más específicamente diámetros de 0.8, 1.2 y 1.6 mm para cables de acero con alma de acero y 1.6 mm de diámetro para cables de acero con alma de fibra. Cada prueba a tracción que realiza el prototipo se hace bajo la norma técnica colombiana 2961 y su resultado es una gráfica de esfuerzo-deformación a partir de la cual mediante indicadores numéricos específicos se conocen las principales características mecánicas del cable que se pone a prueba.

El prototipo se constituye por un sistema mecánico cuyo elemento principal es un actuador lineal eléctrico que tiene como función ejercer fuerza de tracción sobre el cable que se pone a prueba hasta que éste llegue a su rotura; dicho actuador es controlado desde la interfaz visual de un programa hecho en LabView. El prototipo también se constituye de un sistema de adquisición de los datos de la fuerza y del alargamiento que sufre el cable durante la prueba, dichos datos son adquiridos mediante una celda de carga de tracción y un sensor infrarrojo de desplazamiento cuyas señales de voltaje son amplificadas, filtradas y convertidas a formato digital para ser enviadas al programa hecho en Labview. El programa convierte dichas señales de voltaje en datos de fuerza, alargamiento, esfuerzo y deformación, y genera una gráfica de fuerza vs alargamiento y otra de esfuerzo vs deformación a partir de la cual mediante indicadores numéricos específicos determina las principales propiedades mecánicas del cable puesto a prueba las cuales son la resistencia a tracción, la rigidez, la ductilidad y la fragilidad.

Palabras claves: Ensayo a tracción, Actuador lineal eléctrico, Celda de carga de tracción, Esfuerzo, Deformación, Resistencia a tracción, Rigidez, Ductilidad, Fragilidad.

ABSTRACT

This degree project consists of the design and construction of a prototype of a system that performs trials or tests to traction of steel wire ropes of small diameters, more specifically diameters from 0.8, 1.2 and 1.6 mm for steel wire ropes with steel core and 1.6 mm in diameter for steel wire ropes with fibre core. Each test traction made for the prototype is made under the Colombian technical standard 2961 and its result is a graph of stress-strain from which by means of specific numerical indicators are known the mechanical characteristics of the Steel wire rope that is put to test.

The prototype is made up of a mechanical system whose main element is an electric linear actuator which makes traction force on the cord that is put to test until it gets broken; This actuator is controlled from the visual interface of a program made in LabView. The prototype also is made up of a system of data acquisition of strength and elongation that suffers the wire rope during the test, these data are acquired by using a traction load cell and an infrared sensor of displacement whose voltage signals are amplified, filtered and converted to digital format to be sent to the program made in Labview. The program converts these signals from voltage in force, elongation, stress and strain data, and generates a graph of force against elongation and other stress against strain from which by means of specific numerical indicators determines the main mechanical properties of the wire rope tested which are resistance to traction, stiffness, ductility and brittleness.

Keywords: Traction test, Electric linear actuator, Traction load cell, Stress, Strain, Resistance to traction, Stiffness, Ductility, Brittleness.

INTRODUCCIÓN

Los cables de acero o guayas son elementos ampliamente utilizados en la mayoría de actividades industriales y de ingeniería, se encuentran formando parte de los equipos para la manipulación y sujeción de cargas como grúas, cabrestantes, eslingas, etc. e incluso en sistemas de transporte de personas como teleféricos y ascensores. La fabricación de cables de uso mecánico como los cables de acero suele considerarse como industria relativamente reciente; sin embargo, desde las épocas más remotas se conocían los encordados los cuales eran uniones de hilo de cáñamo, de cuero o de otras materias.

La medición de la carga y/o esfuerzo de rotura que tienen los cables de acero es fundamental para saber que cable de acero utilizar en determinado caso o aplicación, y de esta manera garantizar seguridad en las diferentes actividades industriales y de ingeniería. Las cargas y/o esfuerzos que un determinado cable de acero puede soportar, dependen de su diámetro y tipo de construcción. Por otra parte, la norma técnica colombiana 2961 establece un método de ensayo destructivo de tensión con el fin de medir la carga real de rotura de cables de acero de propósitos generales. La norma establece básicamente tres aspectos a la hora de hacer un ensayo destructivo los cuales son: la longitud mínima que debe tener el cable en función de su diámetro, la velocidad a la cual se debe aplicar la tensión y los resultados de cada prueba deben especificar las unidades de medida de las magnitudes físicas del ensayo.

El prototipo que se diseñó y se construyó en este proyecto de grado realiza pruebas o ensayos a tracción de cables de acero de diámetros pequeños, diferentes longitudes y tipos de construcción con el fin de determinar qué tan resistente, rígido, dúctil y frágil es cada cable que se pone a prueba, y de esta manera establecer la dependencia de éstas propiedades en función de las dimensiones y tipos de construcción de los cables. Cada prueba a tracción que realiza el prototipo se hace bajo la norma técnica colombiana 2961.

1. FUNDAMENTOS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

En este primer capítulo se presentan los conceptos básicos de resistencia de materiales como lo son el concepto de carga o fuerza, esfuerzo, deformación total, deformación unitaria, etc. los cuales son necesarios para entender el desarrollo y la finalidad de este proyecto de grado. Teniendo en cuenta que el prototipo construido en este proyecto tiene como fin realizar pruebas a tracción de cables de acero para determinar sus principales propiedades mecánicas, al final del capítulo se hace especial énfasis de la fundamentación teórica de la relación esfuerzo-deformación resultante de pruebas o ensayos hechos en laboratorios, y a partir de la cual se realiza la caracterización mecánica de los materiales que se ponen a prueba.

1.1 PROPÓSITO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES

La Resistencia de los Materiales tiene como fin determinar la capacidad que tienen los elementos o cuerpos para soportar cargas externas y a la vez analiza sus deformaciones generadas por dichas cargas. De esta manera, en el estudio de la resistencia de los materiales se consideran a todos los cuerpos no como rígidos sino como elásticos o deformables, es decir, que cualquier carga producirá en ellos deformaciones que en magnitud son pequeñas comparadas con las dimensiones globales del cuerpo¹.

La resistencia de materiales diferencia claramente la parte teórica y la experimental:

En la parte teórica estudia mediante modelos matemáticos (ecuaciones) los esfuerzos y deformaciones producidos en el interior de los elementos estructurales por las fuerzas aplicadas. Hace uso intensivo de los diagramas de cuerpo libre y de las ecuaciones de equilibrio, así como de las relaciones geométricas entre las dimensiones de los elementos y sus deformaciones tanto lineales como angulares.

En la parte experimental, realiza pruebas o ensayos en laboratorio de probetas de materiales sometiéndolas a diferentes tipos de cargas para calcular los esfuerzos resistentes de los materiales y adicionalmente mediante la medición de las deformaciones producidas determina las relaciones entre éstas y los esfuerzos aplicados con el fin de encontrar los parámetros o valores numéricos característicos que permiten la caracterización mecánica de los materiales².

¹Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés.

²Jorge Eduardo Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

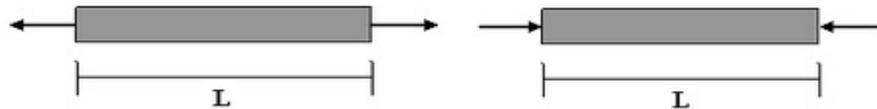
1.2 CONCEPTO DE FUERZA O CARGA³

Desde el punto de vista de la física, la fuerza o carga se define como toda acción que al ser ejercida sobre un cuerpo, produce sobre él deformaciones cuya magnitud dependen directamente de la magnitud de dicha acción causante; una misma fuerza aplicada sobre un mismo cuerpo puede generar distintos tipos de deformación dependiendo de la dirección con que se aplique dicha fuerza. Esto se debe a que la fuerza es una magnitud vectorial y por lo tanto es preciso asociar su dirección y sentido al valor de su intensidad.

1.3 CARGAS AXIALES DE TRACCIÓN O COMPRESIÓN⁴

Un cuerpo está sometido a una carga axial de tracción o compresión cuando dicha carga es paralela al eje centroidal de dicho cuerpo, Figura 1. Dependiendo de si la carga tiende a estirar o a comprimir el cuerpo, ésta será de tracción o de compresión respectivamente.

Figura 1. Cargas axiales de tracción y de compresión sobre una barra.

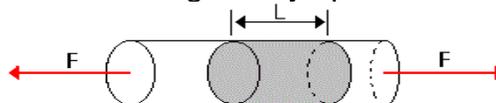


Fuente: <http://basicmechanics.wikispaces.com/Tema+5+-+Esfuerzo+normal+y+de+corte>

1.4 CONCEPTO DE ESFUERZO

Considérese una barra sometida a la acción de dos fuerzas iguales, opuestas y colineales en sus extremos como se muestra en la Figura 2, es decir, $F-F=0$. Si se aumenta el tamaño de la sección transversal de la barra hasta ver sus moléculas, la fuerza externa se distribuye en pequeñas fuerzas tirando de cada molécula que tratan de separarlas de sus otras moléculas vecinas. Sin embargo la atracción entre moléculas opone resistencia con una fuerza igual y contraria, lo que finalmente impide que las moléculas se alejen entre sí⁵.

Figura 2. Barra sometida a fuerzas iguales y opuestas



Fuente: <http://rsta.pucmm.edu.do/tutoriales/fisica/Leccion12/12.5.htm>

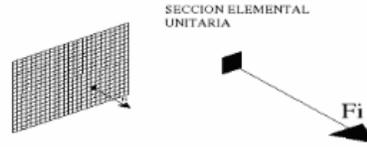
³Pablo Idrovo y Luis Quintanilla. APLICACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES PARA LA OBTENCIÓN DE DEFORMACIONES EN ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS. Cuenca: Universidad politécnica salesiana, 2010, p. 4.

⁴Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. La paz: Yucatán hermosa, 2010, p. 14.

⁵Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. La paz: Yucatán hermosa, 2010, p. 10.

De esta manera, el esfuerzo se define como la fuerza que experimenta no cada molécula sino cada unidad de área que compone la sección transversal de un cuerpo sometido a una fuerza externa como se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Fuerza soportada por cada unidad de área transversal de un cuerpo



Fuente: Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés

El esfuerzo se representa mediante la letra griega σ y se expresa matemáticamente como:

$$\sigma = \frac{\text{fuerza}}{\text{area}} = \frac{F}{A} \quad (1)$$

En el sistema inglés, la unidad de medida de fuerza es la libra (lb) y la unidad de medida de área es la pulgada cuadrada (in^2). De este modo, el esfuerzo se indica en libras por pulgada cuadrada (lb/in^2) o psi por sus siglas en inglés. En el sistema internacional de unidades, la unidad de medida de fuerza es el newton (N) y la unidad de medida de área es el metro cuadrado (m^2). De esta manera, el esfuerzo se expresa en newton por metro cuadrado (N/m^2), que recibe el nombre de pascal y se abrevia Pa^6 .

1.5 ESFUERZO NORMAL (σ)⁷

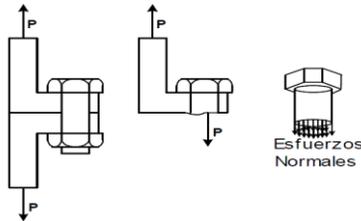
Aquella fuerza que soporta cada unidad de área y cuya dirección es perpendicular o normal a la sección transversal se conoce como esfuerzo normal, por lo tanto una carga axial ya sea de tracción o de compresión genera un esfuerzo normal. Para fuerzas de compresión el esfuerzo normal será negativo y para fuerzas de tracción el esfuerzo normal será positivo.

En la Figura 4, se muestran dos perfiles unidos por un perno que soportan la acción de dos fuerzas opuestas P y paralelas al eje del perno. En las secciones transversales al perno aparecen fuerzas internas perpendiculares a estas secciones que se distribuyen generando solo esfuerzos normales.

⁶Robert L. Mott. RESISTENCIA DE MATERIALES. University of Dayton.

⁷Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés.

Figura 4. Cuerpos sometidos a esfuerzos normales



Fuente: Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés

Debido a que el propósito de este proyecto de grado son solamente las pruebas a tracción, en adelante se hace referencia al esfuerzo normal de dichas pruebas solamente como esfuerzo.

1.6 CONCEPTO DE DEFORMACIÓN⁸

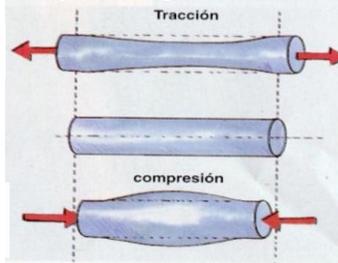
La deformación se define como el desplazamiento de las partículas que constituyen el material de un cuerpo que es sometido a una fuerza externa, dicho desplazamiento es producto de dicha fuerza externa y es creciente hasta que existe un equilibrio entre las fuerzas internas moleculares del material y la fuerza externa aplicada al cuerpo, manteniéndose esta condición de equilibrio siempre que la fuerza externa aplicada exista y sea constante. En el momento en que la fuerza externa deformadora cesa, las fuerzas internas moleculares del material tienden a restituir la posición inicial de las partículas; haciendo que el cuerpo recupere completamente, o no, su forma original.

1.7 DEFORMACIÓN POR CARGAS AXIALES

Las deformaciones experimentadas por un cuerpo que es sometido a cargas axiales, son de tipo longitudinal y transversal. Una deformación longitudinal es un cambio en la longitud del cuerpo y una deformación transversal es un cambio en el diámetro y por lo tanto en el área de sección transversal de éste. Tanto las cargas de tracción como las de compresión generan deformaciones longitudinales y transversales en los cuerpos, esto es, las cargas de tracción provocan alargamiento (deformación longitudinal) con adelgazamiento (deformación transversal) y las cargas de compresión generan acortamiento (deformación longitudinal) con ensanchamiento (deformación transversal).

⁸Pablo Idrovo y Luis Quintanilla. APLICACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS EN EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES PARA LA OBTENCIÓN DE DEFORMACIONES EN ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS. Universidad Politécnica Salesiana.

Figura 5. Deformación generada por cargas de tracción y compresión.



Fuente:http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/Giglia_Schiappacasse_Garc%C3%ADa-_Ficha_01/26062014

La deformación longitudinal total también conocida como alargamiento o elongación se expresa matemáticamente mediante la ecuación 2.

$$\bar{\delta} = L_f - L_i \quad (2)$$

en donde L_i es la longitud inicial y L_f es la longitud final del cuerpo sometido a una carga axial. La deformación longitudinal unitaria se expresa como:

$$\varepsilon = \frac{\bar{\delta}}{L_i} \quad (3)$$

en donde $\bar{\delta}$ es la deformación longitudinal total y L_i es la longitud inicial del cuerpo. Por otra parte, la deformación transversal total se expresa mediante la ecuación 4.

$$\bar{\delta}_q = d_f - d_i \quad (4)$$

en donde d_i es el diámetro inicial y d_f es el diámetro final de la sección transversal del cuerpo sometido a una carga axial. La deformación transversal unitaria, se expresa como:

$$\varepsilon_q = \frac{\bar{\delta}_q}{d_i} \quad (5)$$

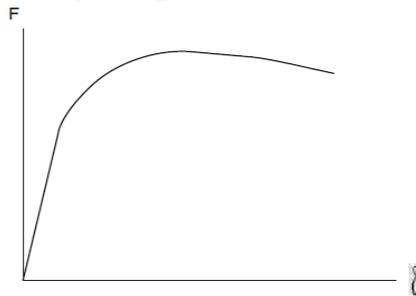
en donde $\bar{\delta}_q$ es la deformación transversal total y d_i es el diámetro inicial del cuerpo. La deformación longitudinal unitaria ε y la deformación longitudinal total $\bar{\delta}$ son de nuestro especial interés en este proyecto de grado; es por esto que de aquí en adelante y a lo largo de este libro se referirá a ellas solamente como deformación y alargamiento respectivamente.

1.8 RELACIÓN ESFUERZO (σ)- DEFORMACIÓN (ϵ)⁹

Un sólido sometido a una carga o fuerza exterior se encuentra sometido a un conjunto de acciones internas o fuerzas que generan unos desplazamientos en las moléculas que constituyen dicho sólido (deformaciones). La magnitud de estas deformaciones dependerá de la magnitud de la fuerza a la cual sea sometido el sólido, de sus fuerzas de atracción molecular y por lo tanto de su estructura cristalina. La forma de obtener una relación entre esfuerzo y deformación es a partir de ensayos de tracción o de compresión en laboratorio, este tipo de relación arroja indicadores numéricos que permiten conocer las principales propiedades mecánicas del material del sólido que se ponga a prueba.

1.8.1 Ley de hooke¹⁰. Robert Hooke en su libro *De potentia restitutiva* (1679), estableció la famosa Ley que relaciona fuerzas y deformaciones. Con un sencillo dispositivo en el cual a un plato se le van agregando pesos y se van midiendo las deformaciones producidas progresivamente en el resorte encontró una proporcionalidad directa entre los pesos aplicados y las deformaciones. La ley establece que en todo cuerpo sometido a una fuerza axial, existe inicialmente una relación directamente proporcional o lineal entre dicha fuerza y el alargamiento δ de dicho cuerpo, ésta relación se muestra al inicio de la curva de la Figura 6.

Figura 6. Relación entre fuerza y alargamiento



Fuente: Francisco Beltrán. RESISTENCIA DE MATERIALES I. Universidad Politécnica de Madrid

De esta manera, la ley de Hooke para la parte inicial de la gráfica de la Figura 6 se expresa matemáticamente como:

$$F = K\delta \quad (6)$$

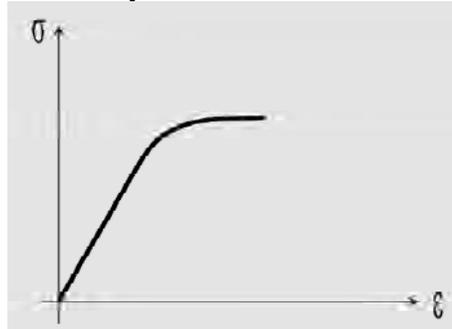
En donde F es la fuerza que experimenta el cuerpo, δ es el alargamiento o elongación producto de dicha fuerza y K es la pendiente de la recta o constante de proporcionalidad de dicha relación.

⁹Anónimo. INTRODUCCIÓN A LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES.

¹⁰Jorge Eduardo Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

Sin embargo, para estudiar las propiedades mecánicas de un material, deben relacionarse las magnitudes esfuerzo σ y deformación ϵ , como se muestra en la Figura 7, de tal manera que en la ley queden incluidas el área transversal y la longitud inicial del sólido o cuerpo sometido a la fuerza (ver ecuaciones 1 y 3).

Figura 7. Relación entre esfuerzo y deformación.



Fuente: Jorge E. Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

La pendiente inicial de la gráfica de la Figura 7 muestra cómo varían las deformaciones al incrementarse los esfuerzos. Para varios materiales esta primera parte de la gráfica es lineal presentándose por tanto una relación directamente proporcional entre el esfuerzo y la deformación. En este caso, la ley de Hooke que relaciona estas dos magnitudes unitarias se expresa mediante la ecuación 7.

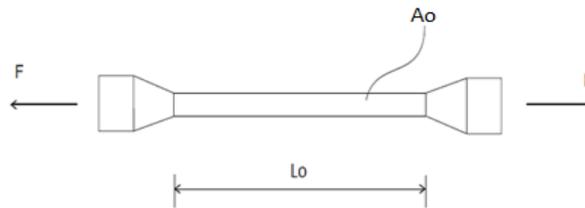
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (7)$$

En donde σ es el esfuerzo, ϵ es la deformación y E es la pendiente de la recta o factor de proporcionalidad de dicha relación. E se conoce con el nombre de módulo de Young o módulo de elasticidad y dentro de un gráfico de esfuerzo-deformación es un indicador numérico de que tan rígido es determinado material del cual se compone un cuerpo sometido a carga.

1.8.2 Ensayo o prueba a tracción¹¹. El ensayo de tracción simple es el más sencillo de los que se emplean para la caracterización mecánica de los materiales. Se utiliza una probeta mecanizada la cual tiene longitud inicial L_0 y un área de la sección transversal inicial A_0 constante, dicha probeta se muestra en la Figura 8. La probeta se sujeta por sus extremos a la máquina universal de ensayos, y ésta aplica una fuerza F creciente que estira la probeta como se muestra en la Figura 9, de esta forma la longitud L_0 pasa a ser $L_f = L_0 + \delta$ en donde $\delta = L_f - L_0$ (alargamiento o deformación total). En el ensayo se aumenta la fuerza F a una velocidad normalizada, hasta llegar a producir la rotura de la probeta. El resultado fundamental del ensayo son los datos de la fuerza aplicada por la máquina y del alargamiento sufrido por la probeta.

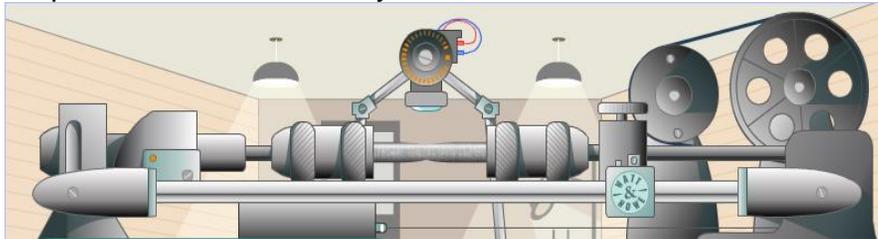
¹¹Francisco Beltrán. RESISTENCIA DE MATERIALES I. Universidad Politécnica de Madrid.

Figura 8. Probeta mecanizada



Fuente: Anónimo. RESISTENCIA DE MATERIALES I. Universidad Politécnica de Madrid

Figura 9. Máquina universal de ensayos.



Fuente: <http://classroom.materials.ac.uk/tensile.php>

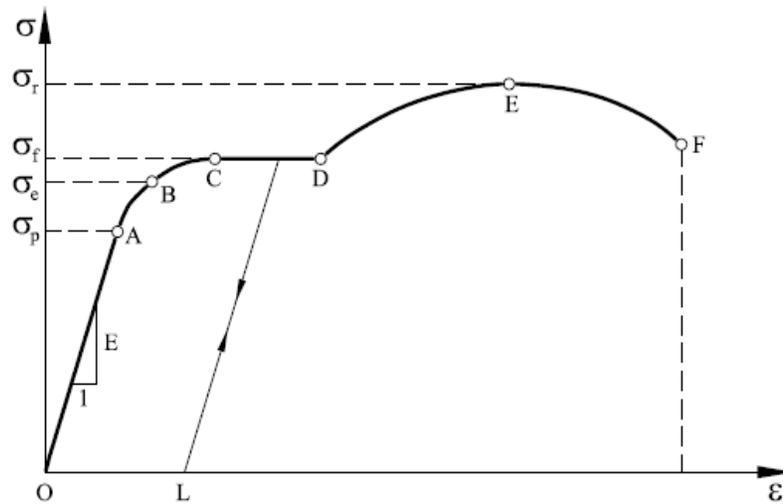
Para la caracterización mecánica del material de la probeta, el resultado de la prueba es una gráfica de esfuerzo-deformación como la mostrada anteriormente en la Figura 7. Para ello se divide la fuerza F aplicada por la máquina de ensayo por el área de la sección transversal inicial, y así se tiene el esfuerzo experimentado por la probeta. Del mismo modo, si se divide el alargamiento medido por la máquina de ensayos por la longitud inicial L_0 de la probeta, se obtiene la deformación en la probeta.

1.8.3 Tramos y valores característicos de un gráfico de Esfuerzo – Deformación¹².

Un gráfico de esfuerzo-deformación resultante de un determinado ensayo o prueba de resistencia de materiales, proporciona un grupo de valores o parámetros característicos del material, algunos de los cuales permiten establecer o determinar las principales propiedades mecánicas del material. El esfuerzo máximo o de rotura, la deformación de rotura y el módulo de Young son valores característicos que permiten establecer que tan resistente, dúctil, frágil y rígido es el material puesto a prueba respectivamente. En esta sección se definen cada uno de éstos tres valores característicos en una relación de esfuerzo-deformación como la mostrada en la Figura 10.

¹²Miguel Cervera Ruiz y Elena Blanco Díaz. MECÁNICA DE ESTRUCTURAS Y RESISTENCIA DE MATERIALES. Universidad Politécnica de Cataluña.

Figura 10. Tramos y valores característicos en un gráfico de Esfuerzo – Deformación



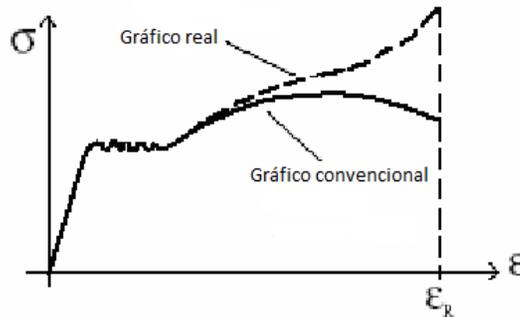
Fuente: Miguel Cervera Ruiz y Elena Blanco Díaz. MECÁNICA DE ESTRUCTURAS Y RESISTENCIA DE MATERIALES. Universidad Politécnica de Cataluña.

- Esfuerzo máximo o de rotura σ_r (E): es el máximo valor del esfuerzo medido en el ensayo y corresponde al valor del esfuerzo a partir del cual las deformaciones transversales comienzan a aparecer en la zona media de la probeta, es decir, es el valor del esfuerzo en el que el área transversal del sólido comienza a disminuir.
- Deformación de rotura ϵ_r (F): es el máximo valor de la deformación unitaria medido en el ensayo y corresponde al valor de la deformación a la cual se da la separación física total del sólido que se pone a prueba.
- Módulo de elasticidad o módulo de Young: es la pendiente o constante de proporcionalidad de la recta correspondiente al tramo proporcional (OA). A partir de la ecuación 7 se puede obtener una expresión para el módulo de elasticidad E:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (8)$$

En el tramo EF de la Figura 10, la aparente disminución de esfuerzo se debe a la definición convencional de esfuerzo, el cual es calculado siempre con el área transversal inicial del sólido y no con el área transversal real que tiene el sólido en cada instante, la cual va disminuyendo durante el ensayo más específicamente durante el tramo de estricción. El resultado de esto es un gráfico convencional, en vez de uno real como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Gráfico convencional y real de esfuerzo-deformación



Fuente: Alejandro M. Mayori. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés.

1.9 PRINCIPALES PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.

Las principales propiedades mecánicas de los materiales que se pueden determinar mediante algunos valores característicos de una relación esfuerzo-deformación son la resistencia a tracción, la ductilidad, la fragilidad y la rigidez. A continuación se define cada una de ellas con su respectivo valor numérico característico.

1.9.1 Resistencia a tracción. Es la capacidad que tiene un material de oponerse a la rotura¹³. Dentro de un gráfico de esfuerzo-deformación, un indicador numérico de que tan resistente es un material es el esfuerzo máximo o de rotura σ_r .

1.9.2 Ductilidad y fragilidad. La ductilidad es la capacidad que tiene un material de deformarse lo más que se pueda antes de rotarse, la fragilidad es lo contrario a la ductilidad, es decir, es la capacidad que tiene un material de deformarse lo menos que se pueda antes de rotarse. Dentro de un gráfico de esfuerzo-deformación, un indicador numérico de que tan dúctil o frágil es determinado material es la deformación máxima o de rotura, entre mayor sea el valor de la deformación máxima más dúctil y por lo tanto menos frágil es el material y viceversa¹⁴; se considera que un material es frágil cuando su deformación máxima está por debajo de 0.05 y se considera que es dúctil cuando está por encima de 0.05¹⁵.

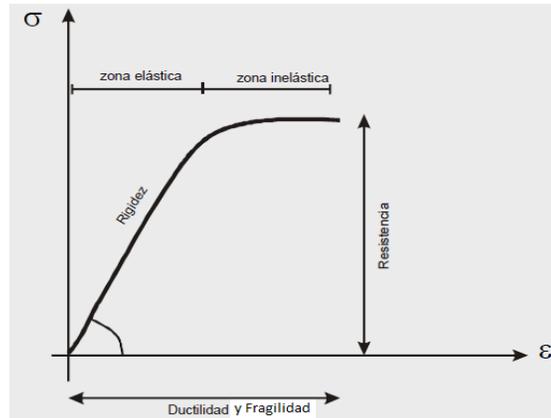
¹³Jorge Eduardo Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

¹⁴Francisco Beltrán. RESISTENCIA DE MATERIALES I. Universidad Politécnica de Madrid.

¹⁵Anónimo. INTRODUCCIÓN A LA RESISTENCIA DE LOS MATERIALES.

1.9.3 Rigidez. Es la capacidad que tiene un material de oponerse a las deformaciones. Dentro de un gráfico de esfuerzo-deformación, un indicador numérico de que tan rígido es un material es el módulo de elasticidad o módulo de Young, entre mayor sea el módulo de elasticidad más rígido es el material y viceversa¹⁶.

Figura 12. Principales propiedades mecánicas de los materiales en función de un gráfico de esfuerzo-deformación



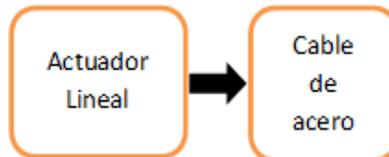
Fuente: Jorge E. Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

¹⁶Jorge Eduardo Salazar. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia.

2. ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico diseñado y construido en este proyecto, tiene como función ejercer fuerza de tracción sobre el cable de acero que se ponga a prueba hasta llevarlo a la rotura. Es por esto, que sus elementos principales son un actuador lineal eléctrico que se encarga de ejercer fuerza de tracción y el cable de acero como tal el cual es sometido a dicha fuerza. También hacen parte del sistema mecánico otros elementos de menor importancia, pero que son indispensables para que su funcionamiento sea más práctico y seguro. En este capítulo se describen cada uno de los elementos que hacen parte del sistema mecánico al igual que su diseño y materiales empleados para su construcción. Es bueno aclarar que las unidades de medida de longitud de todas las figuras que se muestran en este capítulo son en milímetros, excepto las figuras de la sección 2.1 correspondientes al actuador lineal eléctrico las cuales se dan en pulgadas.

Figura 13. Principales elementos del sistema mecánico



2.1 ACTUADOR LINEAL ELÉCTRICO B-TRACK K2G05

El actuador lineal eléctrico utilizado en este proyecto es el mostrado en la Figura 14, su fabricante es Warner Linear y su referencia es B-Track K2G05; tiene una capacidad de carga nominal de hasta 300 lb (150 kg-f), una sobrecarga del 25% de la carga nominal (37.5kg-f), una longitud de carrera de 8 pulgadas (20 cm) y se constituye de un motor dc de 12 voltios. Su elección se basó en las cargas de roturas proporcionadas por la hoja técnica de los cables de acero que se pusieron a prueba en este proyecto (ver anexo A), dichas cargas de rotura no sobre pasan los 180 kg-f; lo anterior teniendo en cuenta que en sobrecarga el actuador puede ejercer una fuerza tracción de hasta 187.5kg-f. Por otra parte, se escogió VDC ya que es mucho más económico que su contraparte VAC.

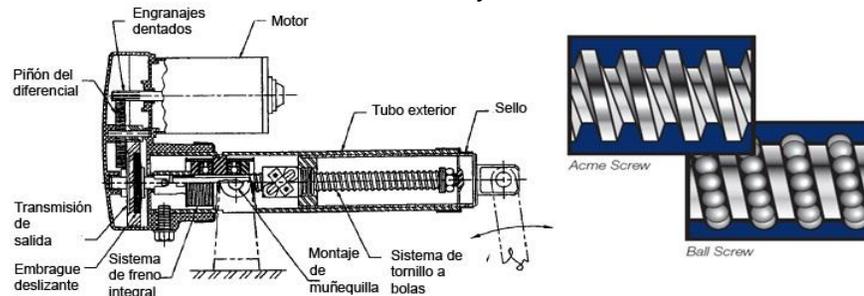
Figura 14. Actuador B-TRACK K2G05



Fuente: ACTUADOR WARNER ELECTRIC MANUAL.pdf

Su principio de funcionamiento es un motor de 12VDC cuyo movimiento de rotación se transmite mediante un sistema de engranajes a un eje roscado o tornillo sin fin cuya rosca puede ser de bolas o de tornillo como se muestra en la Figura 15. El movimiento giratorio del eje roscado hace que un cilindro se desplace en las dos direcciones posibles de línea recta.

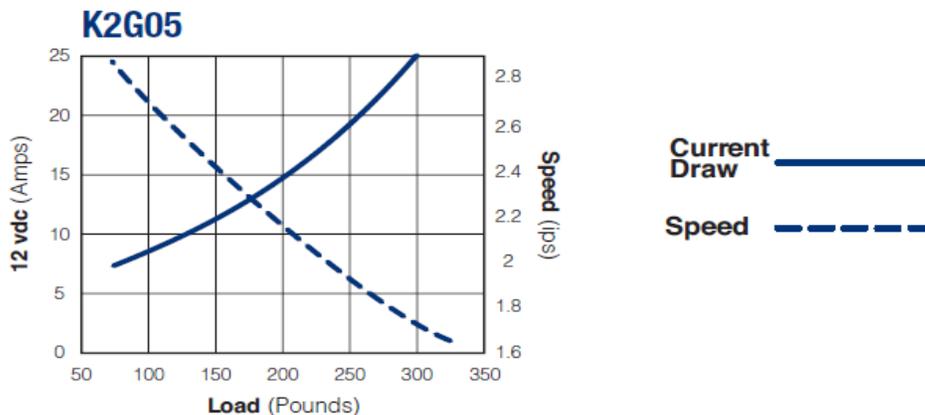
Figura 15. Tornillo sin fin de rosca de bolas y de rosca de tornillo.



Fuente: http://www.tecnoficio.com/electricidad/velocidad_de_motores_electricos4.php

La velocidad de desplazamiento del actuador y el consumo de corriente del motor dependen de la carga o fuerza que ejerza el actuador en determinado momento, el comportamiento de estas dos variables se muestra en la gráfica de la Figura 16.

Figura 16. Velocidad y consumo de corriente del actuador en función de la carga.



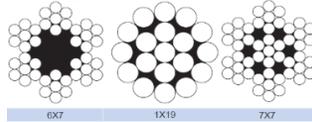
Fuente: ACTUADOR WARNER ELECTRIC MANUAL.pdf

De la gráfica de la Figura 16, se puede inferir que el actuador sin carga alguna tiene un consumo de corriente por debajo de 5A y su velocidad es aproximadamente igual a 3.2 pulgadas por segundo. A la máxima carga (300lb), el actuador tiene un consumo de corriente de 25 A y su velocidad es de 1.6 pulgadas por segundo. En este caso, el alto consumo de corriente a la máxima carga del actuador se suple con una batería de carro ya usada de 12v la cual proporciona hasta 400Ah.

2.2 CABLES DE ACERO PUESTOS A PRUEBA

Como se había dicho al inicio de este libro, el prototipo construido en este proyecto realiza pruebas o ensayos a tracción de cables de acero de 0.8, 1.2 y 1.6 mm de diámetro. Los tipos de construcción de estos cables son 7x7, 1x19 y 6x7 los cuales se muestran en la Figura 17.

Figura 17. Construcción 6x7, 1x19 y 7x7 de cables de acero.



Fuente: Listas_Materias_Primas_V2_2011.pdf

Las pruebas realizadas por el prototipo permiten determinar las principales propiedades mecánicas de los cables de acero (rigidez, resistencia, ductilidad y fragilidad) a partir de sus características físicas; como lo son la longitud, el diámetro y el tipo de construcción de cada cable. De esta manera, cuando se comparan los resultados de las pruebas entre cables de diferentes características físicas, se puede analizar y determinar cómo sus propiedades mecánicas dependen de éstas.

En el Cuadro 1 se muestran los cables de acero puestos a prueba en este proyecto con sus respectivas características físicas.

Cuadro 1. Cables de acero puestos a prueba.

Cable	Tipo de construcción	Diámetro	Longitud
1	7x7	1.2 mm	50 cm
2	1x19	1.2 mm	50 cm
3	7x7	0.8 mm	55 cm
4	7x7	1.2 mm	55 cm
5	6x7	1.6 mm	55 cm
6	6x7	1.6 mm	60 cm

Al realizar las pruebas a los cables mostrados en el Cuadro 1, se puede determinar cómo varían las propiedades mecánicas en función de las características físicas de la siguiente manera:

- Al comparar los resultados de las pruebas de los cables 1 y 2, se puede determinar cómo varían las propiedades mecánicas entre cables de un mismo diámetro y longitud, pero de diferente tipo de construcción.
- Al comparar los resultados de las pruebas de los cables 3 y 4, se puede determinar cómo varían las propiedades mecánicas entre cables de un mismo tipo de construcción y longitud, pero de diferente diámetro.

- Al comparar los resultados de las pruebas de los cables 5 y 6, se puede determinar cómo varían las propiedades mecánicas entre cables de un mismo tipo de construcción y diámetro, pero de diferente longitud.

Los resultados de las pruebas y las comparaciones de éstos se muestran al final de este libro en el capítulo 5.

2.3 MODELO 3D DEL SISTEMA MECÁNICO

Aparte del actuador lineal eléctrico y del cable de acero, el tercer elemento de mayor importancia que constituye el sistema mecánico es un riel a través del cual se desplaza un elemento móvil. En las Figuras 18 y 19, un modelo en 3D muestra detalladamente el riel dentro del cual en uno de sus extremos se encuentra el actuador lineal eléctrico y en el otro un tornillo graduador al cual va sujetado el cable puesto a prueba. El actuador a través de una celda de carga ejerce tracción sobre el elemento móvil para a su vez ejercer tracción sobre el cable puesto a prueba.

Figura 18. Modelo 3D del sistema mecánico.

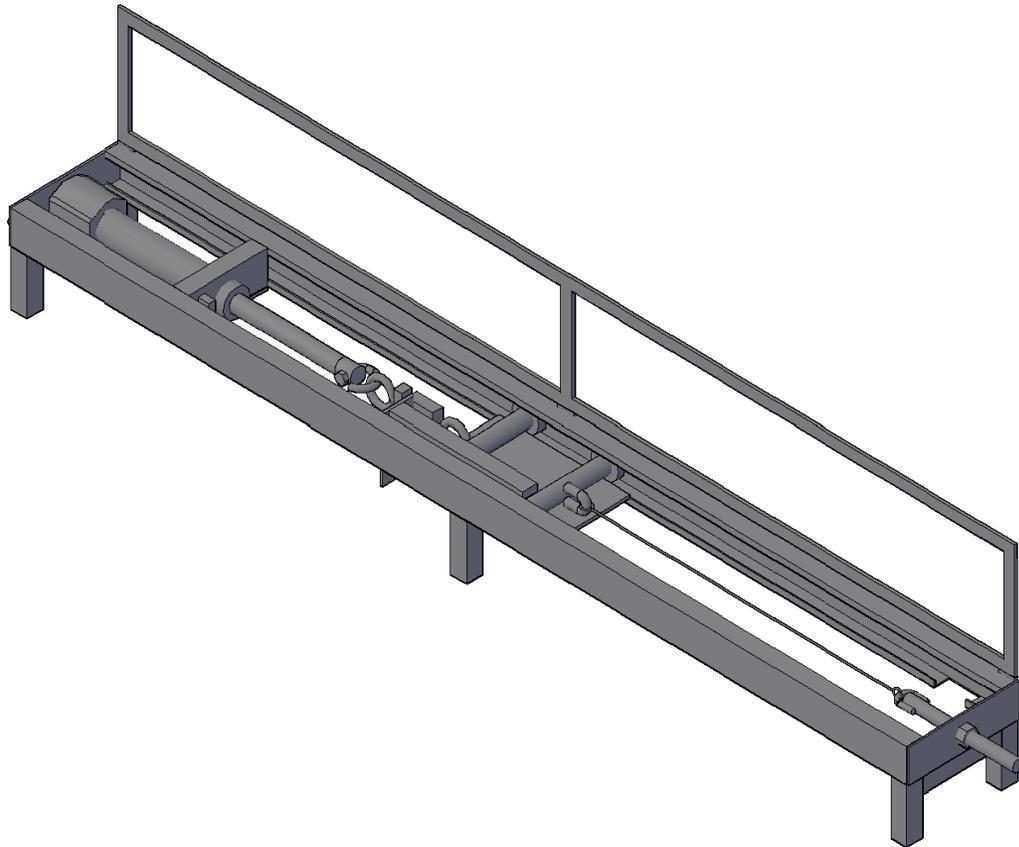


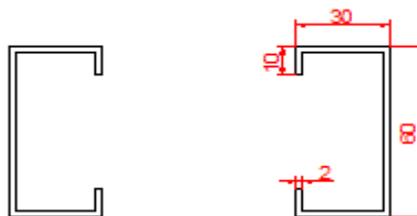
Figura 19. Modelo 3D del sistema mecánico desde otro ángulo.



2.4 ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL RIEL MECÁNICO

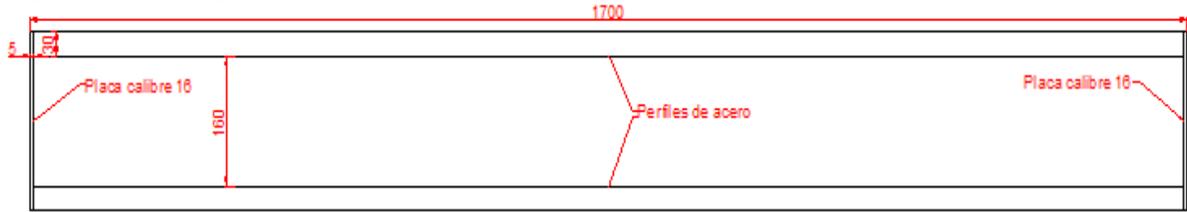
El riel mecánico fue construido con dos perfiles de acero en forma de “C” paralelos entre sí, cuya forma y dimensiones en milímetros se muestran en la Figura 20.

Figura 20. Perfiles de acero en forma de C.



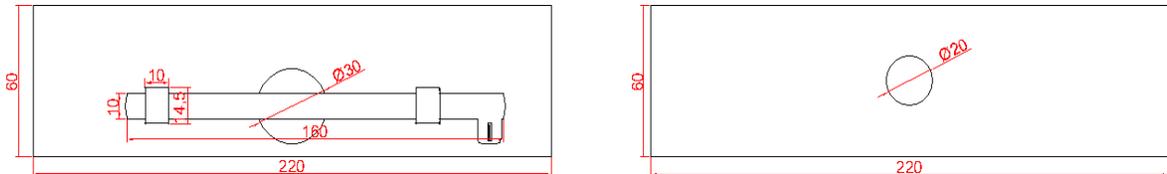
Cada perfil de acero tiene una longitud de 1700 mm (1.7m) y va soldado en cada extremo a una placa de acero calibre 16 (espesor 5mm) de tal manera que cada perfil se encuentra estable y distanciado 160 mm uno del otro, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Longitud de perfiles de acero con placas calibre 16 en los extremos.



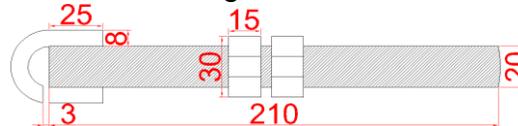
Cada placa de calibre 16 tiene en su centro un orificio, una de ellas junto con el orificio tiene un pasador utilizado para dar soporte al actuador lineal eléctrico en un extremo del riel y la otra placa solo con el orificio se utiliza para dar soporte a un tornillo graduador de la longitud del cable de acero. En la Figura 22 se muestra cada placa con sus dimensiones y los respectivos orificios, el orificio de 30 mm junto con el pasador da soporte al actuador y el orificio de 20 mm al tornillo graduador.

Figura 22. Dimensiones y orificio de cada placa calibre 16.



En la Figura 23 se muestra el tornillo graduador de la longitud del cable, el cual en uno de sus extremos tiene un gancho al cual va agarrado el cable que se pone a prueba. Su función es estirar completamente el cable antes de comenzar cada prueba, y además permite que la longitud del cable no tenga que ser siempre la misma, sino que puede estar dentro del rango de 50-65 cm.

Figura 23. Tornillo graduador de la longitud del cable de acero.



Por otra parte, a los dos perfiles que constituyen el riel van soldadas por la parte de abajo seis patas que dan soporte a todo el sistema mecánico; dos en cada extremo y las otras dos en la mitad de los dos perfiles. A uno de los perfiles va soldado por la parte de encima un marco sobre el cual van pegados dos vidrios y cuya función es abrir y cerrar sobre el sistema brindando así protección para evitar un accidente en el momento en que el cable que se esté poniendo a prueba se rompa. Lo anterior se muestra en una vista lateral como la de la Figura 24 y una vista frontal como la de la Figura 25.

Figura 24. Vista lateral: Patas y marco soldados sobre los perfiles.

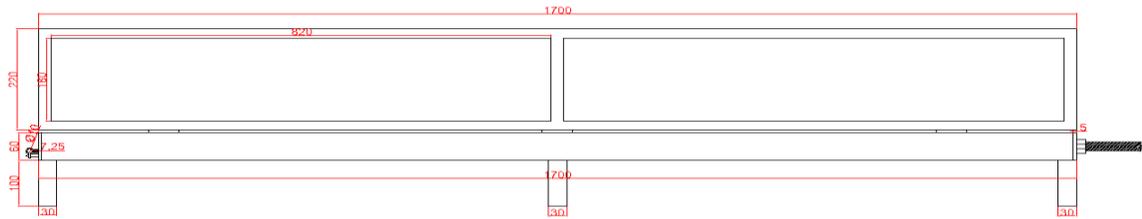
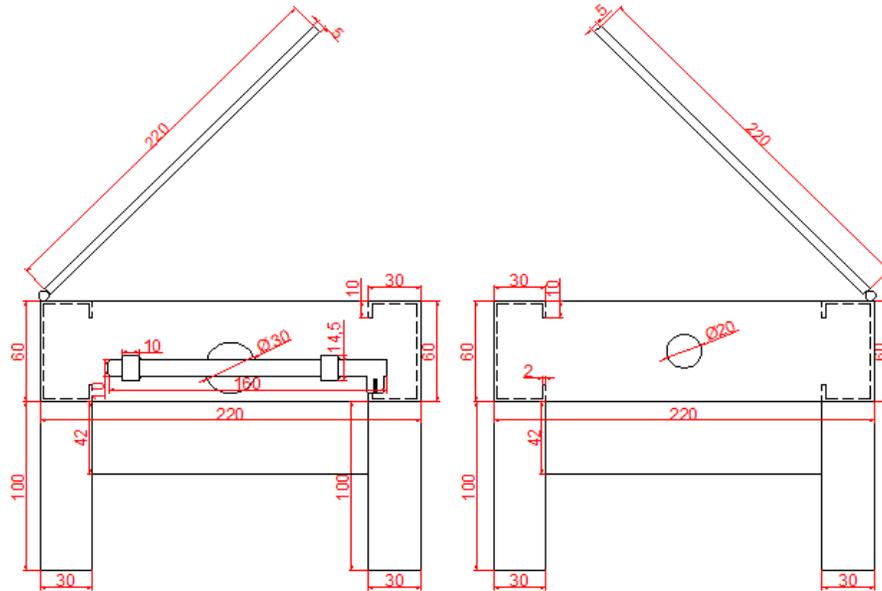
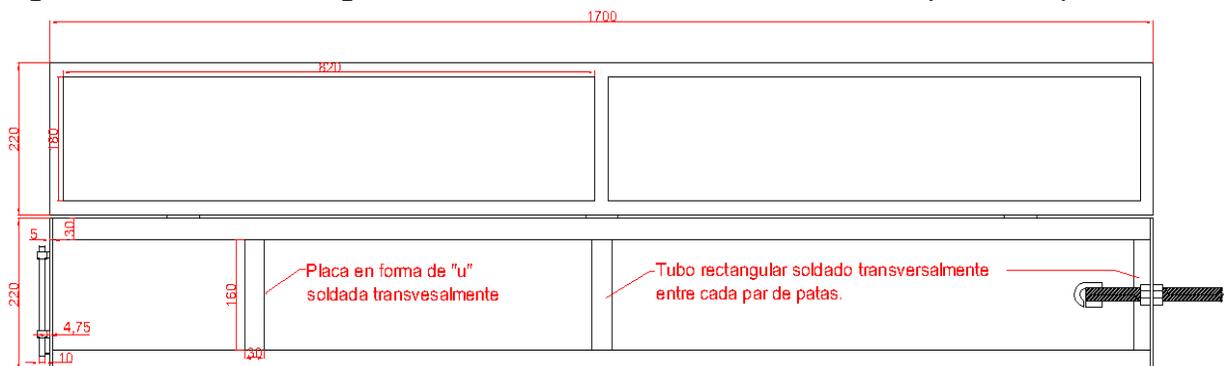


Figura 25. Vista frontal: Patas y marco soldados sobre los perfiles.



Entre dos de los tres pares de patas que dan soporte a todo el sistema mecánico (en un extremo y en la mitad de los perfiles), un tubo rectangular fue soldado transversalmente para darle más solidez y estabilidad a todo el sistema mecánico. También una placa en forma de "u" fue soldada perpendicularmente entre los dos perfiles con el fin de dar soporte al cuerpo del actuador; una vista superior como la de la Figura 26 permite observar todo lo descrito anteriormente.

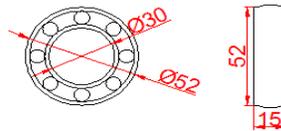
Figura 26. Tubos rectangulares soldados transversalmente a dos pares de patas.



2.5 ELEMENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL ELEMENTO MÓVIL

Como se había dicho anteriormente, a través del riel se desplaza un elemento móvil que está sujetado por un extremo al cable y por el otro a una celda de carga la cual a su vez va anclada por el otro extremo al actuador. Dicho elemento móvil es específicamente un carro cuyos rodamientos se muestran en la Figura 27.

Figura 27. Rodamientos del elemento móvil.

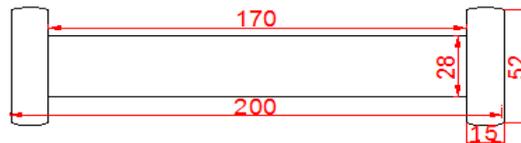


Cada rodamiento va sujetado a presión a cada extremo de dos ejes los cuales tienen una longitud de 200mm (20cm) y un diámetro de 28mm como se observa en las Figuras 28 y 29.

Figura 28. Ejes del elemento móvil.



Figura 29. Eje con los rodamientos.



Cada eje con su par de rodamientos va soldado sobre la parte de encima a una placa de 250 mm de largo, 155 mm de ancho y 5mm de espesor, dicha placa en uno de sus extremos tiene soldado un gancho al cual va sujetado el cable y en el otro extremo tiene un orificio al cual se engancha la celda de carga. Las Figuras 30 y 31 son una vista superior, lateral y frontal de la placa sola y de los ejes soldados sobre la placa respectivamente.

Figura 30. Placa del elemento móvil

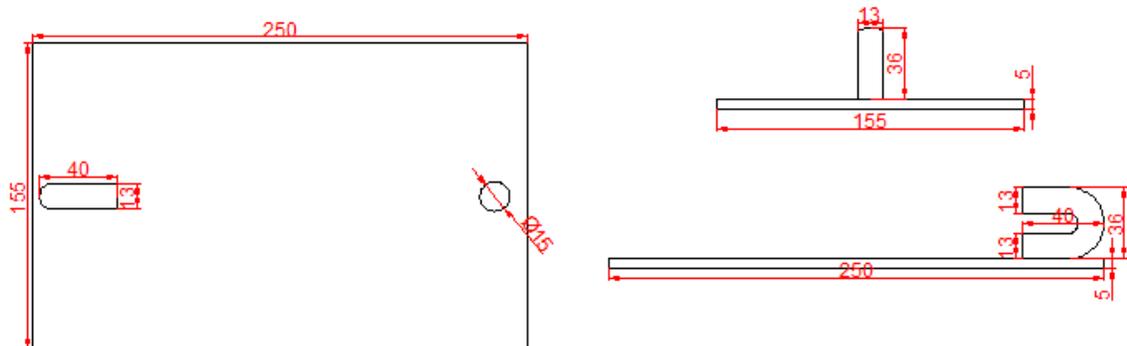
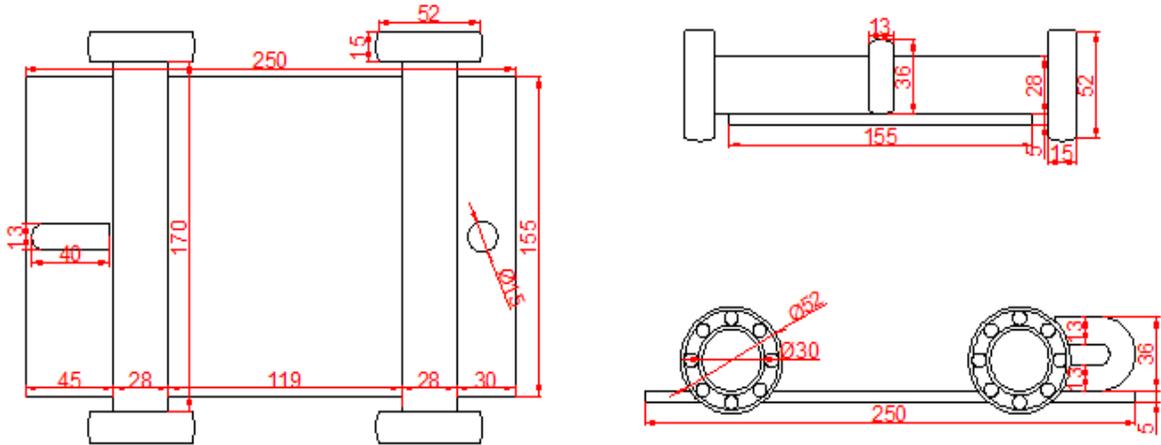
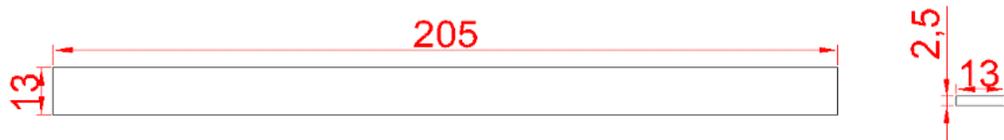


Figura 31. Ejes soldados sobre la placa.



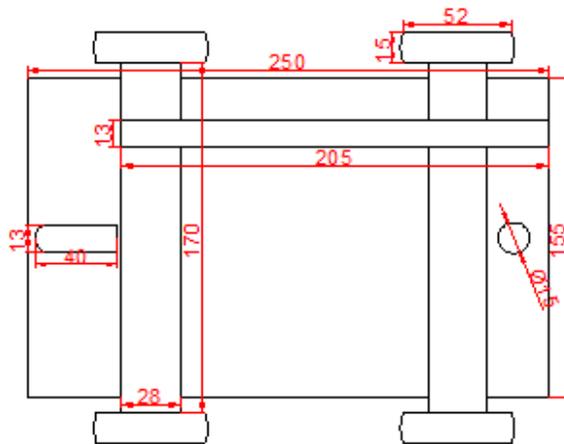
Por último, sobre los dos ejes va soldada transversalmente una pequeña placa de 205 mm de largo, 13mm de ancho y 2.5 mm de espesor (Figura 32), esta placa da soporte de forma perpendicular al objeto que es detectado por un sensor de distancia encargado de captar el alargamiento del cable que se ponga a prueba.

Figura 32. Placa soporte de objeto a ser detectado por el sensor de distancia.



La placa soldada transversalmente sobre los dos ejes del carro se puede observar en la Figura 33, en la que se muestra el elemento móvil final.

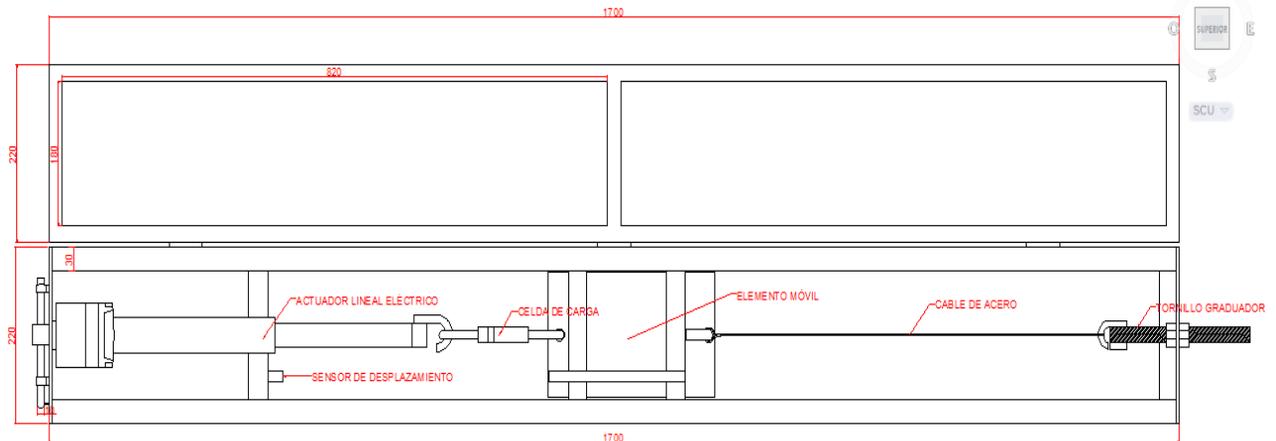
Figura 33. Elemento móvil final



2.6 SISTEMA MECÁNICO COMPLETO

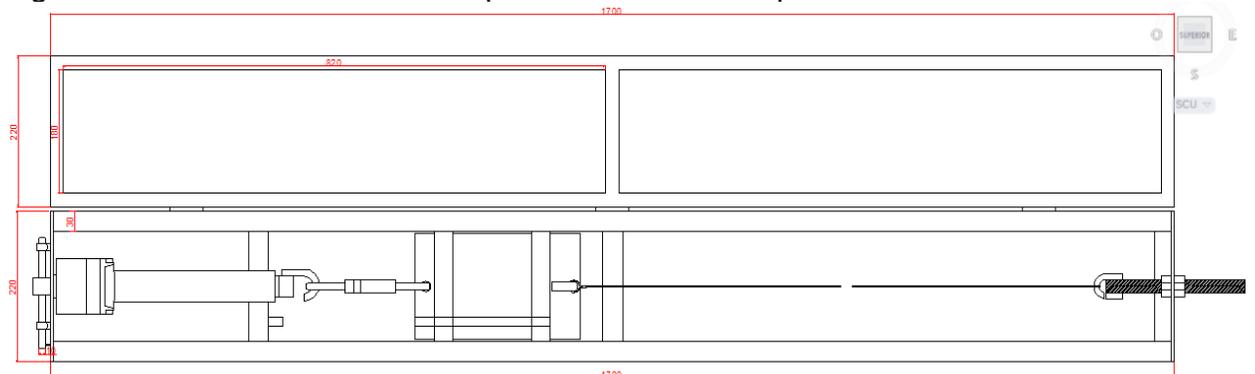
La Figura 34 es una vista superior del sistema mecánico al juntar todos sus elementos, es decir, al colocar el actuador lineal eléctrico en la placa del pasador, al poner el elemento móvil dentro del riel, enganchar la celda de carga al actuador y al elemento móvil, y al enganchar el cable por un extremo al tornillo graduador y por el otro al elemento móvil.

Figura 34. Sistema mecánico completo al iniciar una prueba.



La Figura 34 muestra también el estado inicial del sistema mecánico, es decir, listo para iniciar una determinada prueba. Una vez iniciada una prueba, ésta finaliza en el instante en el cual el cable se empieza a romper, esto es, en el momento en el que los primeros alambres del cable se rompen. La Figura 35 es una vista superior del sistema mecánico completo una vez finaliza una determinada prueba.

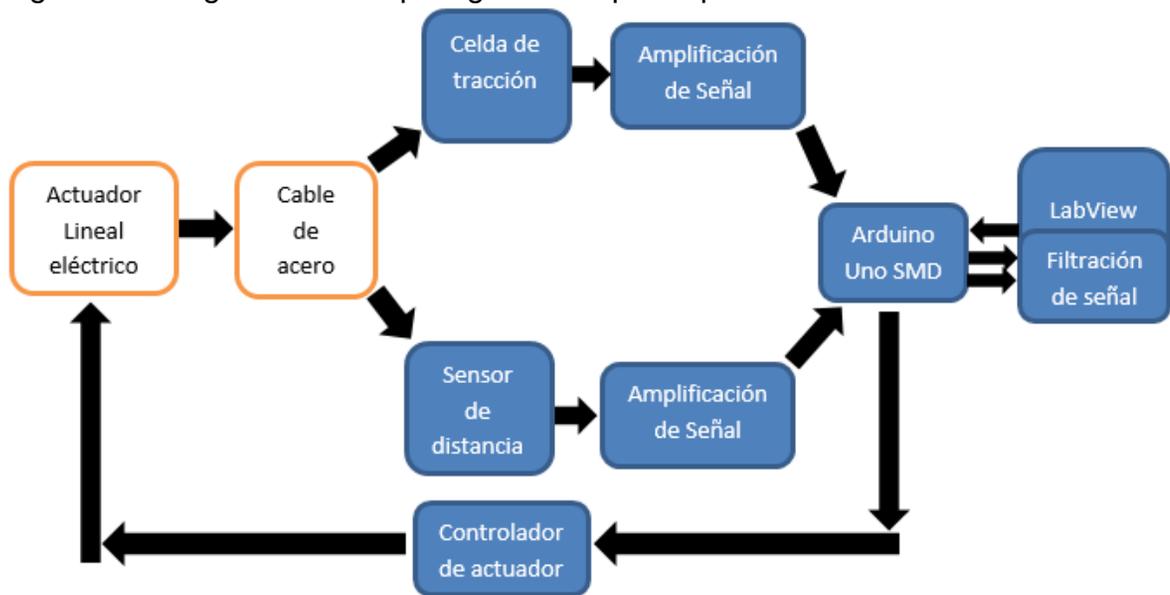
Figura 35. Sistema mecánico completo al finalizar una prueba



3. ELEMENTOS, DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema electrónico diseñado e implementado en este proyecto, tiene como función adquirir los datos de la fuerza que experimenta un determinado cable durante una determinada prueba y los datos del alargamiento o elongación que éste sufre a medida que se va tensando más y más. En este capítulo se presentan las principales características de la celda de carga de tracción y del sensor infrarrojo de desplazamiento utilizados en este proyecto, y se explica el diseño y funcionamiento de sus correspondientes etapas de amplificación de señal. Además, se explica el panel frontal y el diagrama de bloques (la programación) del programa hecho en Labview desde el cual también se programó la tarjeta de Arduino Uno SMD, y por último se explica el diseño y funcionamiento del circuito controlador del actuador a través del cual junto con la tarjeta de Arduino Uno SMD se extiende o se retrae el actuador desde la interfaz visual del programa hecho en LabView. Todo lo anterior se puede observar en el diagrama de bloques de todo el prototipo de sistema mostrado en la Figura 36.

Figura 36. Diagrama de bloques global del prototipo de sistema.



3.1 CELDA DE CARGA DE TRACCIÓN SA

La celda de carga utilizada en este proyecto es de referencia SA y su fabricante es LEXUS ELECTRONIC SCALES. Su carga nominal es de 200 kg-f, su sensibilidad es de 2mV/V y su rango de alimentación es de 5-12 VDC o VAC. La elección de su carga nominal se hizo de tal manera que fuera mayor a la sobrecarga que puede ejercer el actuador lineal eléctrico, esto con el fin de que la celda no experimente fuerzas mayores a las que puede sentir.

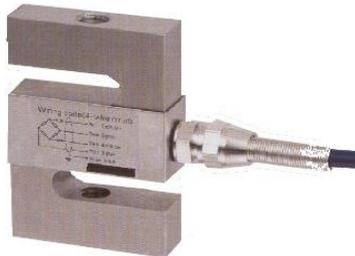
En este caso la celda se alimenta con 12Vdc, ya que de esta manera la celda de carga entrega el mayor voltaje posible a la máxima carga y así su señal tiene la mayor sensibilidad posible. Para calcular el voltaje proporcionado por la celda a la máxima carga, se multiplica su voltaje de alimentación por su sensibilidad como se muestra a continuación:

$$V_{\text{carga máx}} = \frac{2\text{mV}}{\text{V}} * 12\text{v} = 24 \text{ mV} \quad (11)$$

Para obtener la sensibilidad de la señal entregada por la celda de carga, se divide el voltaje a la máxima carga sobre la máxima carga que la celda puede sensar como se muestra a continuación:

$$\text{Sensibilidad de señal de salida} = \frac{24 \text{ mV}}{200 \text{ kg-f}} = 0.12 \text{ mV/kg-f} \quad (12)$$

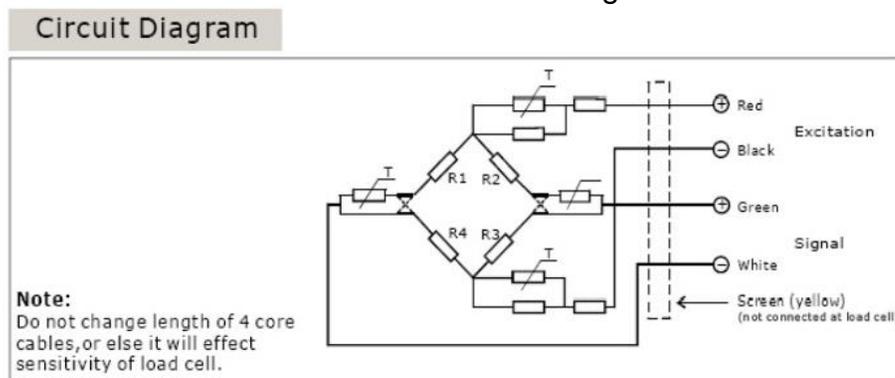
Figura 37. Celda de carga SA



Fuente: catalogo_sa.pdf

Entre otras características de la celda de carga SA está su carga de rotura o carga a la cual la celda se destruye la cual corresponde al 300% de la carga nominal, es decir, 600 kg-f. Su resistencia eléctrica de entrada es de 385 ± 5 ohmios (medida entre los terminales rojo y negro de la Figura 38) y la de salida es de 350 ± 2 ohmios (medida entre los terminales blanco y verde de la Figura 38).

Figura 38. Puente de wheatstone de la celda de carga SA



Fuente: catalogo_sa.pdf

3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DE LA CELDA DE CARGA

Dado que al alimentar la celda de carga con 12 voltios la sensibilidad de su señal de salida es de 0.12 mV/kg-f, fue necesario implementar una etapa de amplificación de señal para que dicha sensibilidad estuviese por encima del voltaje de resolución del conversor análogo-digital de la tarjeta Arduino Uno SMD el cual es 4.88mV, y de esta manera adquirir los datos de fuerza cada 1kg-f.

Por otra parte, la etapa de amplificación se implementó con un amplificador de instrumentación debido a que éste responde ante variaciones muy pequeñas de la señal de entrada (0.12 mV/kg-f). Su ganancia se estableció de tal manera que al máximo voltaje entregado por la celda de carga el cual es 24 mV, el voltaje de salida del amplificador de instrumentación no excede el máximo voltaje de la escala de conversión análogo-digital de la tarjeta Arduino Uno el cual es 5V. La ganancia que se estableció para esta etapa fue la máxima posible como se muestra a continuación:

$$G_{\text{máx}} = \frac{5V.}{24mV.} = 208.33 \quad (13)$$

La referencia del amplificador de instrumentación se eligió de tal manera que su alimentación fuera simple o unipolar y que se pudiera alimentar con 12V para poder alimentarlo desde la batería de 12V que alimenta al actuador. Una de las referencias que tiene estas características es la INA122 cuya alimentación es simple y puede ser desde 2.2V hasta 36v. Su ganancia se establece mediante la ecuación 14.

$$G = 5 + \frac{200k\Omega}{R_g} \quad (14)$$

Al despejar R_g de la ecuación 14, se obtiene:

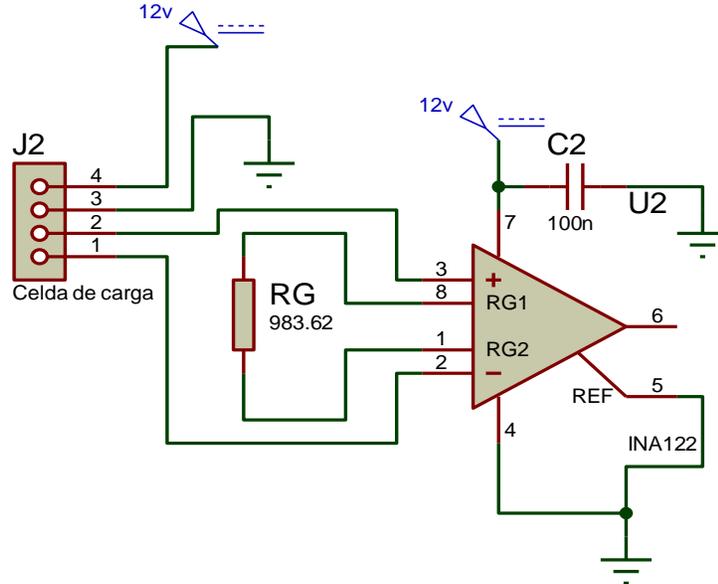
$$R_g = \frac{200k\Omega}{G-5} \quad (15)$$

El valor de la resistencia del amplificador de instrumentación que proporciona la máxima ganancia posible es:

$$R_g = \frac{200k\Omega}{208.33-5} = \frac{200k\Omega}{203.33} = 983.62 \Omega \quad (16)$$

Así, la etapa de amplificación de la señal de salida de la celda de carga es la que se muestra en la Figura 39.

Figura 39. Etapa de amplificación de la señal de salida de la celda de carga SA



A los terminales 1 y 2 del conector J2 mostrado en la Figura 39 van conectados los terminales blanco y verde de la celda de carga respectivamente (terminales correspondientes a la señal de salida de la celda de carga en la Figura 38), y los terminales 3 y 4 de ese mismo conector van conectados a los terminales negro y rojo de la celda de carga respectivamente (terminales correspondientes a la alimentación de la celda de carga en la Figura 38).

Es importante tener en cuenta que al establecer una ganancia de 208.33, la sensibilidad del voltaje de salida del amplificador de instrumentación está determinado por el producto entre la sensibilidad de la señal de la celda de carga y la ganancia de la etapa de amplificación como se muestra a continuación:

$$\frac{0.12mV}{kg-f} * 208.33 = 25mV/kg-f \quad (17)$$

Por otra parte, teniendo en cuenta que la mínima variación de voltaje para generar un cambio en el bit menos significativo (LSB) del conversor análogo-digital del Arduino es:

$$\frac{5V}{2^{10}} = \frac{5V}{1024} = 4.88mV/LSB$$

Al hacer la adquisición de los datos de fuerza éstos varían en incremento y/o decremento cada:

$$\frac{4.88mV/LSB}{25mV/kg-f} = 0.1952 kg-f/LSB$$

3.3 SENSOR INFRARROJO DE DESPLAZAMIENTO GP2Y0A02YK

Teniendo en cuenta que el riel construido en este proyecto tiene un ancho de tan solo 21cms y que el sensor del desplazamiento va dentro de él, se escogió un sensor infrarrojo de desplazamiento cuya energía de propagación es convergente y no uno de ultrasonido cuya energía de propagación es divergente. En este caso una onda de ultrasonido al ser divergente pegaría primero contra los perfiles del riel antes de pegar contra el objeto a ser detectado lo cual generaría errores en la lectura de los datos de distancia.

La referencia del sensor utilizado en este proyecto es GP2Y0A02YK y se muestra en la Figura 40. Tiene un rango de operación de 20 a 150 cm y su rango de alimentación es de -0.3V a 7V, pero su fabricante recomienda polarizarlo con un voltaje entre 4.5V y 5.5V, es por esto que en este caso se polariza con 5V. Consta de solamente 3 terminales de conexión; Vcc, GND y Vo.

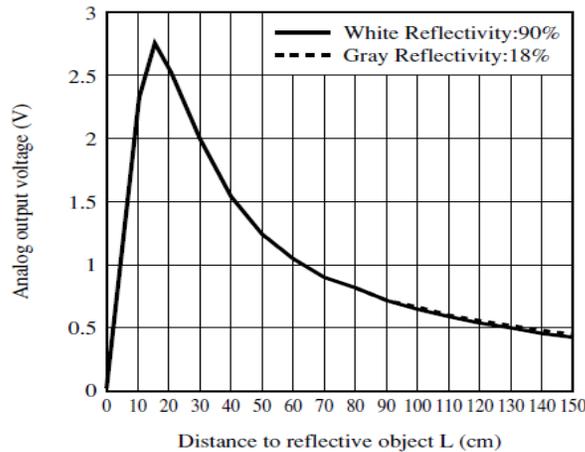
Figura 40. Sensor GP2Y0A02YK



Fuente: <http://www.dfrobot.com/wiki/images/8/89/SEN0013.jpg>

Su elección se hizo en base a la longitud de carrera del actuador lineal eléctrico utilizado en este proyecto la cual es de 8 pulgadas (20 cm); el voltaje de salida proporcionado por el sensor es lineal en el rango de 20 a 40 cm y es no lineal de 40 a 150 cm como se muestra en la Figura 41. Con un rango lineal de 20 cm, el sensor GP2Y0A02YK es el apropiado para utilizarlo en este caso.

Figura 41. Voltaje de salida del sensor GP2Y0A02YK en función de la distancia del objeto a detectar.



Fuente: GP2Y0A02YK.pdf

La sensibilidad de la señal del voltaje de salida en el rango lineal es la pendiente de dicha recta como se determina a continuación:

$$\frac{V_f - V_i}{L_f - L_i} = \frac{2.5v - 1.5v}{20cm - 40cm} = \frac{1v}{-20cm} = \frac{-50mV}{cm} = -5mV/mm \quad (18)$$

El signo menos significa que en el rango lineal, el voltaje que proporciona el sensor es inversamente proporcional a la distancia entre el objeto detectado y el sensor. Es importante tener en cuenta que el fabricante recomienda no utilizar el sensor GP2Y0A02YK para distancias que estén por debajo de 20 cm debido a que en este rango el voltaje de salida del sensor es inexacto.

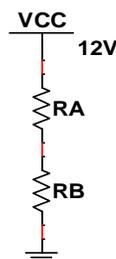
3.4 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN DE LA SEÑAL DEL SENSOR GP2Y0A02YK

Dado que la sensibilidad de la señal de voltaje de salida en el rango lineal es ligeramente mayor al voltaje de resolución del Arduino ($5mV/mm > 4.88mV$), en este caso se implementó una etapa de amplificación con el fin de hacer que dicha sensibilidad fuera mayor a dicho voltaje de resolución, y de esta manera garantizar que los datos de alargamiento se adquieren por cada 1mm.

Por otra parte, dado que el voltaje de salida del sensor GP2Y0A02YK en el rango lineal está entre 1.5V y 2.5V y con el fin de establecer como punto de partida o de referencia 34cm cuyo voltaje de salida es 1.8V (ver Figura 41), también se debió implementar un circuito divisor de voltaje que proporcionara 1.8V que al ser ingresados por V_{IN^-} del amplificador de instrumentación, fueran restados al voltaje del sensor GP2Y0A02YK el cual es ingresado por V_{IN^+} ; esto sabiendo que un amplificador de instrumentación amplifica la diferencia entre los voltajes V_{IN^+} y V_{IN^-} . De esta manera, el voltaje correspondiente al punto de partida es 0V.

El circuito divisor de voltaje es alimentado con 12V como se muestra en la Figura 42, y es implementado con un potenciómetro lineal de precisión de $1k\Omega$ como se muestra en la Figura 43.

Figura 42. Circuito divisor de voltaje.



El voltaje en R_B es 1.8v y está determinado por la siguiente ecuación:

$$V_{RB} = \frac{V_T \cdot R_B}{R_B + R_A} \quad (19)$$

Al despejar R_B de la ecuación 20, se obtiene la ecuación 20.

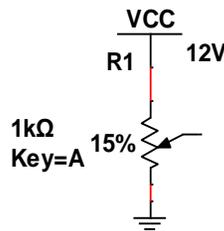
$$R_B = \frac{(R_B + R_A) V_{RB}}{V_T} \quad (20)$$

En donde $R_B + R_A$ es el valor nominal del potenciómetro utilizado para implementar el circuito divisor de voltaje, el cual en este caso es de $1k\Omega$ de esta manera, al reemplazar todos los valores en la ecuación 20, el valor de R_B obtenido es:

$$R_B = \frac{(1k\Omega) \cdot 1.8V}{12V} = 150 \Omega \quad (21)$$

Al implementar el circuito divisor de voltaje con un potenciómetro lineal de precisión, la resistencia entre el terminal de la mitad y el terminal conectado a tierra debe ser de 150Ω lo que corresponde al 15% del valor nominal del potenciómetro. Lo anterior se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Circuito divisor de voltaje implementado con un potenciómetro lineal de precisión



Teniendo en cuenta que el alargamiento máximo de los cables de acero puestos a prueba en este proyecto no alcanza los 4cm antes de su rotura, la ganancia del amplificador de instrumentación se establece de tal manera que a la máxima diferencia entre V_{IN^+} y V_{IN^-} la cual es $2V - 1.8V = 0.2V$ (el voltaje proporcionado por el sensor GP2Y0A02YK a 30cm es 2V), el voltaje de salida del amplificador de instrumentación no puede exceder el máximo voltaje de la escala de conversión análogo-digital de la tarjeta de Arduino Uno el cual es 5V. De esta manera, la máxima ganancia que se puede establecer es:

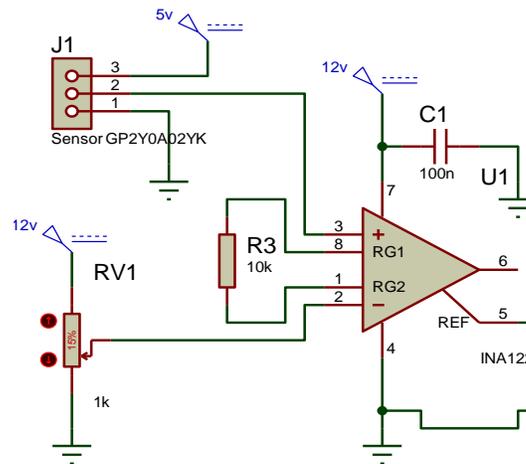
$$G_{\text{máx}} = \frac{5V}{0.2V} = 25 \quad (22)$$

Al igual que en la etapa de amplificación de señal de la celda de carga, la referencia del amplificador de instrumentación utilizada para este caso también es INA 122 y también es alimentado con 12V. Así, el valor de la resistencia que establece una ganancia de 25 es:

$$R_g = \frac{200k\Omega}{25-5} = 10\text{ k}\Omega \quad (23)$$

En la Figura 44 se muestra la etapa de amplificación junto con el circuito divisor de voltaje.

Figura 44. Circuito divisor de voltaje y etapa de amplificación de señal del sensor GP2Y0A02YK



A los terminales 1, 2 y 3 del conector J1 mostrado en la Figura 44, van conectados respectivamente los terminales GND, V_o y V_{cc} del sensor GP2Y0A02YK.

Por otra parte, es importante tener en cuenta que al establecer una ganancia de 25, la sensibilidad de la señal de salida de la etapa de amplificación es:

$$(-5\text{mV/mm}) * 25 = -125\text{mV/mm} \quad (24)$$

En donde el signo negativo significa que dentro del rango lineal del sensor GP2Y0A02YK, el voltaje de salida de la etapa de amplificación es inversamente proporcional a la distancia sensada.

Teniendo en cuenta que la mínima variación de voltaje para generar un cambio en el bit menos significativo (LSB) del conversor análogo-digital del Arduino es:

$$\frac{5V}{2^{10}} = \frac{5V}{1024} = 4.88\text{mV/LSB}$$

Al hacer la adquisición de los datos de distancia éstos varían en incremento y/o decremento cada:

$$\frac{4.88\text{mV/LSB}}{125\text{mV/mm}} = 0.03904 \text{ mm/LSB}$$

3.5 TARJETA DE DESARROLLO ARDUINO UNO SMD.

Con el fin de hacer la conversión análogo-digital de las señales provenientes de cada una de las etapas de amplificación y enviar dichos voltajes digitales resultantes al programa hecho en LabView, se optó por elegir hardware cuya programación de sus funcionalidades se hiciera de una vez desde LabView. Hardware de bajo costo como Arduino, Raspberry Pi y módulos de adquisición de datos de la National Instruments como SensorDAQ son elementos que a diferencia de los microcontroladores de la Microchip se pueden programar todas sus funcionalidades desde LabView de manera sencilla.

Dado que Arduino es el elemento de bajo costo más utilizado y por lo tanto más fácil de adquirir, en este proyecto se escogió una tarjeta de Arduino Uno SMD cuya función es precisamente la de leer las señales análogas de voltaje provenientes de cada una de las etapas de amplificación para convertirlas en voltajes digitales y enviarlos al programa hecho en LabView. Para ello, en este caso se utilizan las entradas analógicas A2 y A4 de la tarjeta la cual se muestra en la Figura 45.

Figura 45. Tarjeta de desarrollo Arduino Uno SMD



Fuente: <http://www.microelectronicos.com/datasheets/ARDUINOUNO.pdf>

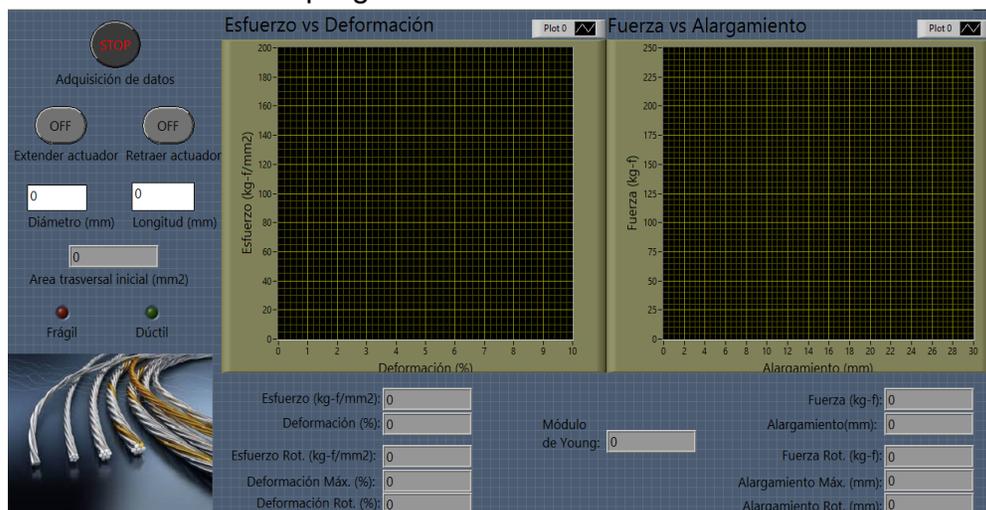
La tarjeta proporciona los 5V de alimentación para el sensor GP2Y0A02YK. También tiene la función de escribir “1” o “0” en las salidas digitales 2 y 7 (poner en alto o en bajo dichas salidas digitales), esto con el fin de controlar el actuador lineal eléctrico a través de un circuito inversor de giro y desde el programa hecho en Labview.

La tarjeta de Arduino Uno SMD es programada en LabView mediante el Toolkit que tiene LabView para programar tarjetas de Arduino, es decir, las funciones de lectura y escritura hechas por la tarjeta son programadas haciendo uso de los bloques de lectura y escritura que ofrece el Toolkit en Labview. Así, la programación del Arduino se explica en la sección 3.6.2 en donde se explica todo el diagrama de bloques del programa hecho en LabView.

3.6 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA HECHO EN LABVIEW

3.6.1 Panel frontal. El panel frontal del programa hecho en LabView muestra la gráfica de esfuerzo-deformación junto con los elementos indicadores de la resistencia a tracción (esfuerzo de rotura), rigidez (módulo de Young) y de la ductilidad y fragilidad (deformación de rotura) del cable que se pone a prueba. También presenta una gráfica de fuerza-alargamiento junto con los elementos indicadores de la fuerza de ruptura, el alargamiento de ruptura y el alargamiento máximo; esto con el fin de validar los datos comparando la carga de ruptura resultante en cada prueba con la proporcionada por el fabricante de cables de acero y comparando el alargamiento máximo con la posición final del elemento móvil medida con un metro, es decir, el alargamiento máximo corresponde al desplazamiento total del elemento móvil. Por otra parte, debido a que la ductilidad y la fragilidad son propiedades mecánicas opuestas, existen dos elementos LEDS que indican si el cable puesto a prueba es dúctil o si es frágil dependiendo de si la deformación de rotura es mayor o menor al 5% respectivamente.

Figura 46. Panel frontal del programa hecho en Labview.



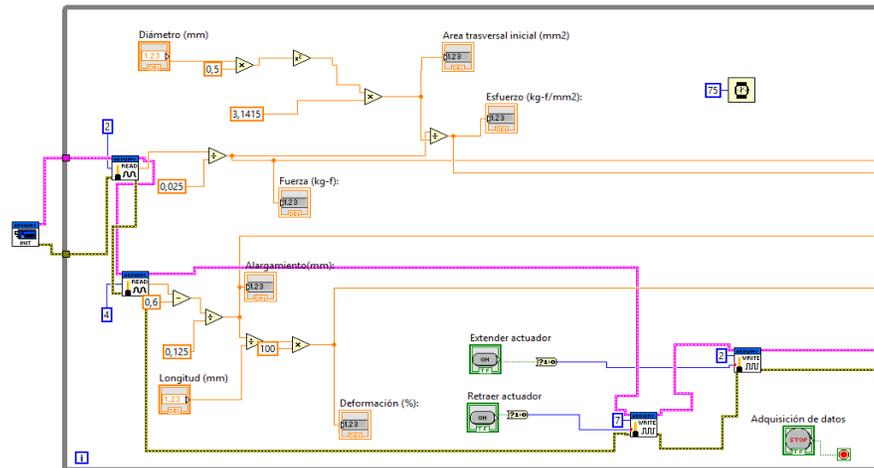
El panel de control también presenta dos elementos utilizados para ingresar el diámetro y la longitud del cable al inicio de cada prueba; esto con el fin de obtener los datos de esfuerzo y deformación a partir de los datos de fuerza y alargamiento respectivamente. Por último, hay tres pulsadores, dos de los cuales controlan al actuador, uno hace que el desplazamiento del actuador sea de extensión y el otro hace que sea de retracción; el tercer pulsador se utiliza para detener la adquisición de los datos una vez haya finalizado una determinada prueba, es decir, en el momento en que se rompa el cable que se esté poniendo a prueba.

3.6.2 Diagrama de bloques. El diagrama de bloques del programa se muestra en la Figura 47, los bloques de color azul conectados en serie corresponden a la programación del Arduino; los bloques INIT y CLOSE tienen la función de inicializar y finalizar el Arduino respectivamente. Los dos bloques READ tienen la función de leer por los pines analógicos 2 y 4 del Arduino las dos señales analógicas de voltaje provenientes de las etapas de amplificación, y proporcionar dichas señales en formato digital, cada una en una variable de tipo real del programa. En LabView, el parámetro o constante de entrada de los bloques READ es un valor de tipo entero que se establece con el fin de indicar el número del pin analógico por el cual se quiere realizar la lectura de los datos (en nuestro caso dicho valor es 2 y 4); y el parámetro de salida de los bloques READ es una variable de tipo real correspondiente al voltaje que entra por el respectivo pin analógico, es decir, la variable de tipo real toma valores dentro del rango de 0-5V.

El voltaje proporcionado por el bloque READ 1 correspondiente al voltaje proveniente de la etapa de amplificación de la celda de carga, se divide por su sensibilidad la cual es 25mV o 0.025 (ver operación 17 en la sección 3.2) para determinar la fuerza en kg-f, la cual a su vez se divide por el área transversal del cable que se esté poniendo a prueba para determinar el esfuerzo en kg-f/mm². Con el diámetro del cable ingresado por el usuario, el programa determina el área transversal del cable mediante la siguiente expresión:

$$A = \pi * r^2 = \pi * \frac{d^2}{4} \quad (27)$$

Figura 47. Primera parte del diagrama de bloques del programa.

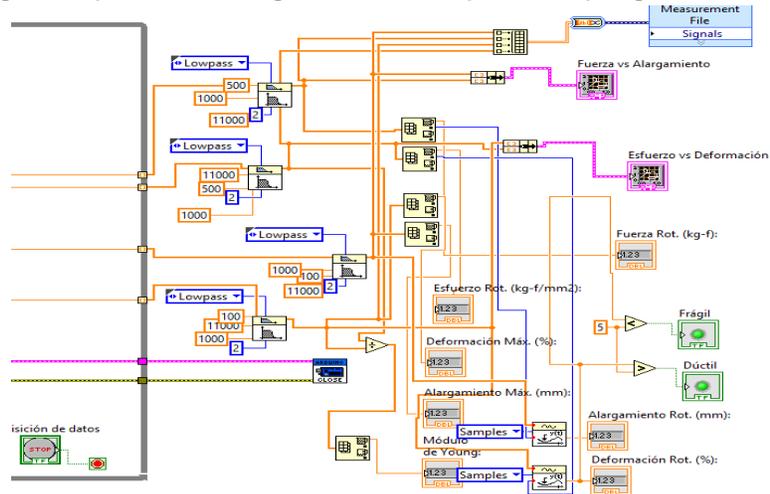


El voltaje proporcionado por el bloque READ 2 correspondiente al voltaje proveniente de la etapa de amplificación del sensor de distancia, se divide por su sensibilidad la cual es 125mV o 0.125 (ver operación 24 en la sección 3.4) para determinar el alargamiento en mm del cable, el cual a su vez se divide por la longitud inicial del cable que se esté poniendo a prueba y se multiplica por 100 para determinar la deformación en porcentaje.

Por otra parte, dependiendo del estado de los pulsadores llamados EXTENDER ACTUADOR y RETRAER ACTUADOR, los dos bloques WRITE tienen la función de poner en alto o bajo (1 o 0) los pines 2 y 7 del Arduino los cuales van conectados a las entradas del circuito inversor de giro. Así, uno de los parámetros de entrada de los bloques WRITE es una variable de tipo entero que toma valores de 0 o 1 dependiendo de los estados booleanos del respectivo pulsador. Al igual que los bloques READ, el otro parámetro o constante de entrada de los bloques WRITE es un valor de tipo entero que se establece con el fin de indicar el número del pin digital que se quiere poner en alto o en bajo (en nuestro caso dicho valor es 2 y 7).

Con el fin de calcular el módulo de Young, al final de cada prueba el programa divide el vector que contiene los datos de esfuerzo entre el vector que contiene los datos de deformación (ver expresión 8 de la sección 1.5.3) y determina el máximo valor contenido en el vector resultante como se muestra en la Figura 48. Dicho valor máximo corresponde a la pendiente del tramo lineal más inclinado de la gráfica esfuerzo-deformación (módulo de Young) y lo muestra mediante un indicador en el panel frontal; los demás valores contenidos en el vector resultante corresponden a las pendientes de los tramos lineales menos inclinados y a los valores resultantes de dividir el esfuerzo entre la deformación en los tramos no lineales.

Figura 48. Segunda parte del diagrama de bloques del programa.



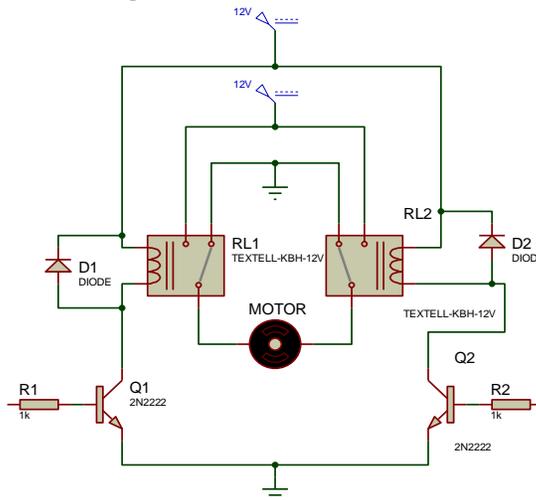
Con cada iteración del ciclo WHILE los datos de fuerza, esfuerzo, alargamiento y deformación son almacenados en vectores y filtrados con el fin de eliminar las señales de ruido y así poder generar sin errores las gráficas de fuerza-alargamiento y esfuerzo-deformación. Dado que la frecuencia del ruido que ingresa por los pines analógicos del Arduino es de alrededor de 1kHz y tiene una amplitud de 100mV para los datos de fuerza y 500mV para los datos de alargamiento, la frecuencia de corte de los filtros implementados en Labview se estableció de 500Hz para los vectores que contienen los datos de fuerza y esfuerzo, y de 100Hz para los vectores que contienen los datos de alargamiento y deformación. Se optó por filtrar a nivel de software y no de hardware debido a que inicialmente al hacer pruebas con filtros de diferente orden y distintas topologías, éstos no atenúan suficientemente la amplitud del ruido para que estuviera al menos por debajo de las sensibilidades de cada señal que ingresa al Arduino.

Por otra parte, en los cuatro vectores se determina el máximo valor con el fin de mostrar en el panel de control la fuerza de rotura, el esfuerzo de rotura (resistencia a tracción del cable), el máximo alargamiento y la máxima deformación. Además, el programa determina el alargamiento de rotura (alargamiento correspondiente a la fuerza de rotura) y la deformación de rotura (deformación correspondiente al esfuerzo de rotura) la cual es la que determina si el cable es dúctil o frágil dependiendo de que si ésta es mayor o menor al 5% respectivamente. Finalmente, con los cuatro vectores que contienen los datos de fuerza, esfuerzo, alargamiento y deformación se construye una matriz la cual es enviada a un archivo de Excel mediante el bloque llamado WRITE TO MEASUREMENT FILE como se muestra en la Figura 48.

3.7 CONTROLADOR DE ACTUADOR: INVERSOR DE GIRO DE MOTOR DC

Como se había dicho en la sección 2.1, el actuador lineal eléctrico B-TRACK K2G05 se constituye de un motor de 12Vdc cuyo sentido de giro determina si el actuador se extiende o se retrae. Es por esto que con el fin de extender o retraer el actuador desde el programa en LabView, se hace necesario el diseñar e implementar un circuito inversor de giro como el mostrado en la Figura 49 para el motor del actuador.

Figura 49. Circuito inversor de giro de motor DC.



Las resistencias R1 y R2 van conectadas a las salidas digitales 2 y 7 de la tarjeta Arduino respectivamente, las cuales se ponen en alto o bajo (0V o 5V) para controlar el sentido de giro del motor del actuador. De esta manera, los transistores Q1 y Q2 trabajan en la región de corte o en la región de saturación dependiendo de si se mandan respectivamente 0v o 5v por las salidas digitales 2 y 7 del Arduino.

Al mandar 0v por la salida digital 2, el transistor Q1 trabaja en la región de corte o de no conducción ($V_{CE} = V_{CC}$) por lo tanto ninguna corriente circula a través del embobinado interno de RL1 lo cual hace que RL1 no cambie de estado, es decir, que el terminal COM se mantiene conectado a NC y por lo tanto el terminal del motor conectado al COM de RL1 se mantiene conectado a GND. Al mandar 5V por R1, el transistor Q1 entra en saturación o conducción ($V_{CE} \approx 0v.$), permitiendo así que una corriente circule desde V_{CC} hasta GND pasando por el embobinado interno de RL1, de esta manera RL1 cambia de estado, es decir, el terminal COM de RL1 deja de estar conectado al terminal NC y pasa a estar conectado al NA conectando así el terminal del motor a V_{CC} . De igual forma funciona la otra mitad del circuito en la que está R2, Q2 y RL2.

Así, al poner en bajo ambas salidas digitales del Arduino, el motor se conecta por ambos lados a GND lo cual hace que no haya desplazamiento alguno del actuador; de igual forma sucede al poner en alto ambas salidas digitales, con la diferencia de que en este caso el motor se conecta por ambos lados a V_{CC} . Al poner en bajo la salida digital 2 y en alto la salida digital 7, el motor gira en sentido tal que el actuador se retrae, de manera viceversa el actuador se extiende. Lo anterior se muestra en el Cuadro 2, en donde V_{pin2} y V_{pin7} son los voltajes de las salidas digitales 2 y 7 del Arduino respectivamente.

Cuadro 2. Sentido de desplazamiento del actuador en función de V_{pin2} y V_{pin7} .

V_{pin2}	V_{pin7}	Desplazamiento del actuador
0V.	0V.	Ninguno
0V.	5V.	Se retrae
5V.	0V.	Se extiende
5V.	5V.	Ninguno

El diseño de este circuito inversor de giro parte del hecho de que la alimentación del actuador B-TRACK K2G05 es de 12Vdc y de que su consumo de corriente a la máxima carga que puede ejercer es de 25A. Así, con el fin de que RL1 y RL2 sean alimentados también con la misma batería que alimenta al actuador y puedan soportar en sus terminales COM, NC y NA el máximo amperaje que éste consume, RL1 y RL2 deben ser de 12V-30A, este tipo de relé se muestra en la Figura 50.

Figura 50. Relé 12v-30A



Fuente: SRx1252 datasheet.pdf

La resistencia del embobinado interno de estos relés es aproximadamente de 87Ω lo que significa que cuando cualquiera de los dos transistores está en saturación, a través del embobinado del respectivo relé circula un amperaje de:

$$I_L = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{12V}{87\Omega} = 137.93 \text{ mA} \quad (27)$$

Así, las referencias de los transistores se eligieron de tal manera que pudieran soportar éste amperaje en el colector, es decir, que el máximo amperaje que pudiera soportar el colector de dicha referencia fuera mayor al amperaje que circula por el embobinado de cada relé ($I_{Cmáx} \geq 137.93mA$). En este caso se eligieron los dos transistores de referencia 2N 2222 cuyo máximo amperaje que puede soportar en su colector es de 1A.

Por último, el valor de R1 y R2 se establecieron de tal manera que en estado alto el amperaje proporcionado por los pines 7 y 2 del Arduino, no fuera a exceder a 40mA el cual es máximo amperaje que puede proporcionar cualquier pin de salida del Arduino. A continuación se muestra el cálculo para determinar el rango en el que se pueden establecer R1 y R2.

$$R1 \text{ y } R2 \geq \left(\frac{V_{Ohigh} - V_{BE}}{I_{Omáx}} = \frac{5V - 0.7}{40mA} = 107.5 \Omega \right) \quad (28)$$

Por otra parte, teniendo que $I_C = 150mA$ y $\beta = 200$, la corriente de base es:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{150mA}{200} = 750 \mu A \quad (29)$$

$$I_B = 10 * I_B = 7.5 \text{ mA} \quad (30)$$

Con una corriente de base de 7.5 mA, el valor de R₁ y R₂ es:

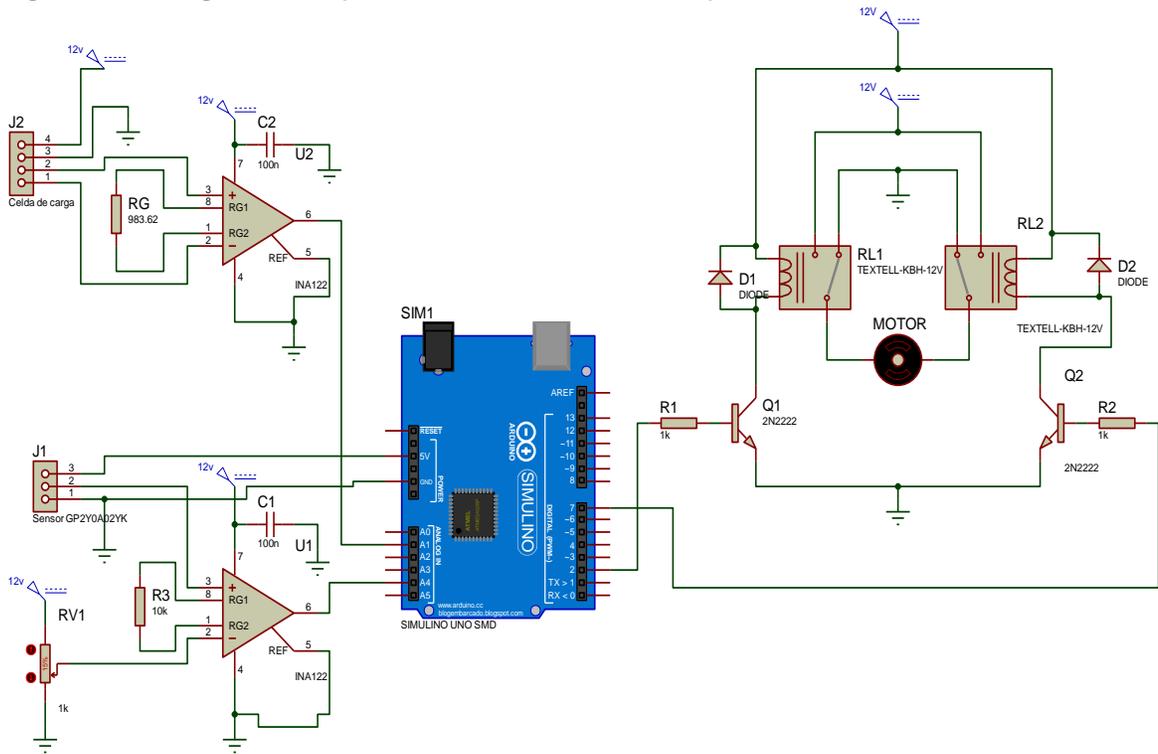
$$R = \frac{5v. - 0.7v.}{7.5 \text{ mA}} = 573 \Omega \quad (31)$$

Así, en este caso se eligió $R_1 = R_2 = 573 \Omega$ como se muestra en la Figura 49.

3.8 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO COMPLETO

Al juntar la celda de carga, el sensor GP2Y0A02YK, las dos etapas de amplificación de señal, el circuito inversor de giro y la tarjeta de Arduino Uno SMD se constituye la totalidad del hardware de este proyecto cuyo diagrama esquemático se muestra en la Figura 51.

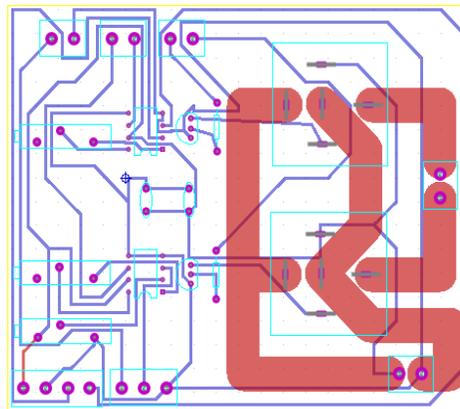
Figura 51. Diagrama esquemático del circuito completo.



3.9 CIRCUITO IMPRESO DE LAS ETAPAS DE AMPLIFICACIÓN Y DEL CIRCUITO INVERSOR DE GIRO

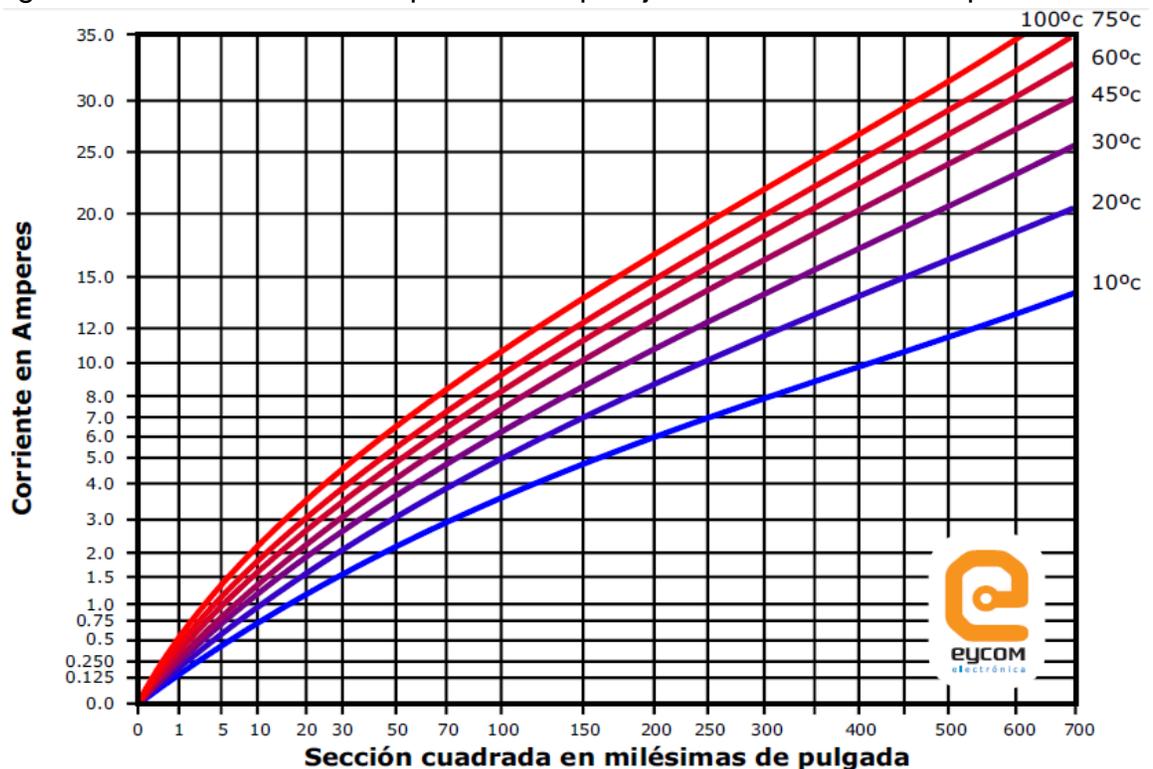
Las etapas de amplificación de señal junto con el circuito inversor de giro son implementados en una placa cuyo circuito impreso se muestra en la Figura 52.

Figura 52. Circuito impreso de las etapas de amplificación y del circuito inversor de giro.



Como se puede observar en la Figura 52, el circuito impreso fue hecho a doble cara o doble faz (las pistas azules van por debajo de la placa y las rojas van por encima). Las pistas que están en contacto con los terminales COM, NC y NA de los relés (pistas rojas), se hicieron con una área transversal tal que tuvieran la capacidad de hacer circular la máxima corriente que consume el actuador la cual es de 25A. Por otra parte, teniendo en cuenta que durante una determinada prueba el lapso de tiempo en el que el actuador consume 25A es muy corto (lapso de tiempo en el que el actuador ejerce tracción igual a su carga nominal), el área transversal de las pistas se estableció también de tal manera que al circular dicha corriente éstas tuvieran un incremento de temperatura admisible de no más de 100 °C. Así, a partir de los anteriores requerimientos y mediante el gráfico de la Figura 53 se determinó el área transversal de las pistas en mils cuadrados.

Figura 53. Área transversal a partir de amperaje e incremento de temperatura.



Fuente: IPC2221 – Generic Standard on Printed Circuit Board Design.

A partir de una corriente de 25A y un incremento máximo de temperatura de 100 °C, el gráfico de la Figura 53 proporciona un área transversal de 360 mils². Con un área transversal de 360 mils² y con un espesor de 1 Oz/ft² proporcionado por el fabricante del circuito impreso, mediante el gráfico de la Figura 54 se determina finalmente el ancho de la pista.

Figura 54. Ancho de pista a partir de su área transversal y su espesor.



Fuente: IPC2221 – Generic Standard on Printed Circuit Board Design.

El gráfico de la Figura 54 proporciona un ancho de pista de 0.26 pulgadas (6.6mm). En este caso, las pistas se hicieron con un ancho de 7.62 mm (0.3 pulgadas) de tal manera que tuvieran la capacidad hacer circular las corrientes correspondientes a las tracciones de sobrecarga del actuador.

3.10 VISUALIZACIÓN 3D DE LA PLACA DE CIRCUITO IMPRESO Y DE SUS COMPONENTES.

En la Figura 55 se muestra un modelo en 3D de la placa de circuito impreso vista por la parte de encima y por la parte de abajo, y en la Figura 56 se muestran los componentes montados sobre ella.

Figura 55. Modelo 3D de la placa de circuito impreso.

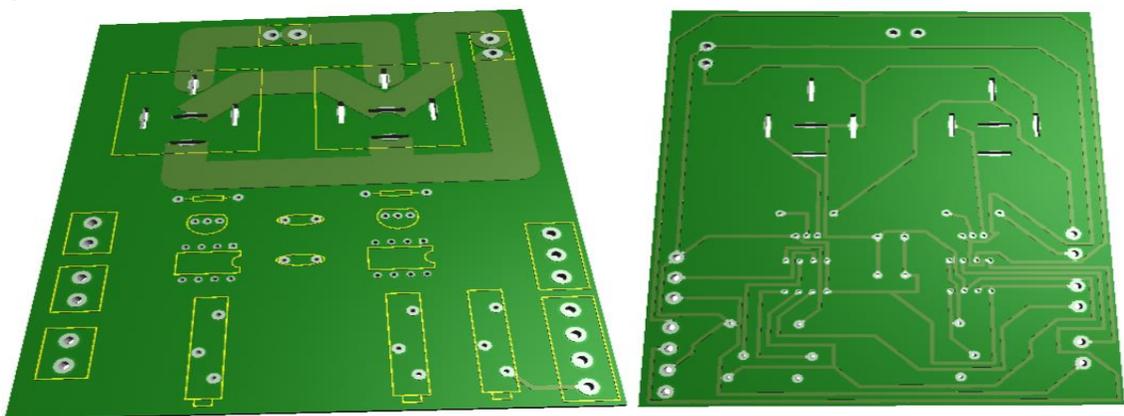
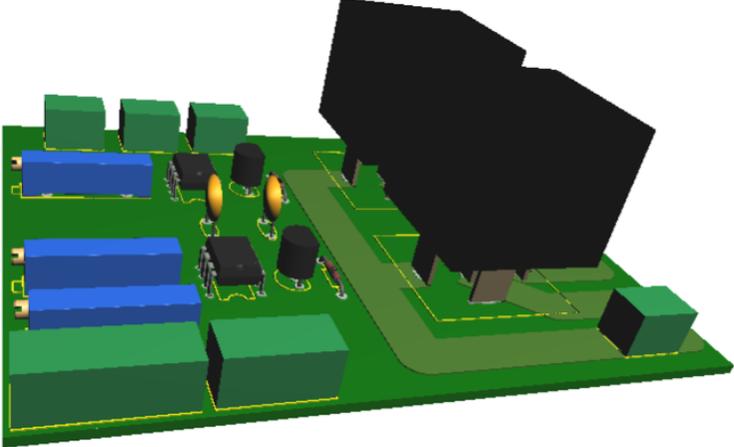


Figura 56. Modelo 3D de los componentes montados sobre la placa.



4. VALIDACIÓN DE LAS MEDICIONES HECHAS POR EL PROTOTIPO

Con el fin de validar las mediciones hechas por el prototipo, en este capítulo se verifica que realmente la celda de carga se encuentra calibrada y que los datos proporcionados por ésta corresponden a los datos reales de fuerza. Por otra parte, también se verifica que la sensibilidad del sensor GP2Y0A02YK realmente sea la calculada anteriormente a partir de la Figura 41.

4.1 VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE LA CELDA DE CARGA SA

Para verificar que la celda de carga realmente se encuentra calibrada, sin carga alguna se midió R_3 y R_4 del puente de wheatstone mostrado anteriormente en la Figura 38. Al estar calibrada, R_3 tiene que ser igual a R_4 . Para medir R_3 se mide la resistencia entre el cable verde y el cable negro de la celda como se muestra a continuación en la Figura 57.

Figura 57. Medición de R_3 del puente de wheatstone de la celda de carga SA.



Para medir R_4 se mide la resistencia entre el cable blanco y el cable negro de la celda como se muestra a continuación en la Figura 58.

Figura 58. Medición de R_4 del puente de wheatstone de la celda de carga SA.



Las mediciones de las Figuras 57 y 58 indican que $R_3 = 311.1\Omega$ y que $R_4 = 310.8$, siendo la diferencia de tan solo 0.3Ω . De esta manera, se considera que R_3 es igual R_4 y que por lo tanto la celda carga se encuentra calibrada.

4.2 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE LA CELDA DE CARGA SA

Para validar los datos de la celda de carga, ésta se probó en un gimnasio con discos de 10, 12, 25 y 50 libras (4.54, 5.44, 11.34 y 22.68 kg respectivamente), y con un multímetro se verificó que el voltaje proporcionado por la celda de carga corresponde al peso de cada uno de los discos como se muestra en las Figuras 59, 60, 61, 62 y 63.

Figura 59. Prueba de la celda de carga con un disco de 10lb (4.54kg).



Como se observa en la Figura 59, para un disco de 10lb (4.54kg) el voltaje de salida de la celda de carga es de 0.3mV. En este caso, el voltaje proporcionado por la celda de carga debería ser de 0.54mV como se muestra a continuación:

$$0.12\text{mV/kg-f} * 4.54\text{kg-f} = 0.5448 \text{ mV}$$

Lo anterior demuestra que en este caso el voltaje proporcionado por la celda de carga tiene un error de 0.2448mV el cual corresponde a 2.04 kg-f como se muestra a continuación:

$$0.5448\text{mV} - 0.3\text{mV} = 0.2448\text{mV}$$
$$0.2448\text{mV} / 0.12\text{mV/kg-f} = 2.04\text{kg-f}$$

Figura 60. Prueba de la celda de carga con un disco de 12lb (5.44kg).



Para un disco de 12lb (5.44kg) el voltaje de salida de la celda de carga es de 0.4mV como se muestra en la Figura 60. Para este caso, el voltaje proporcionado por la celda de carga debería ser de 0.6528mV como se muestra a continuación:

$$0.12\text{mV/kg-f} * 5.44\text{kg-f} = 0.6528\text{mV}$$

Lo anterior significa que en este caso el voltaje proporcionado por la celda de carga tiene un error de 0.2528mV el cual corresponde a 2.1 kg-f como se muestra a continuación:

$$0.6528\text{mV} - 0.4\text{mV} = 0.2528\text{mV}$$
$$0.2528\text{mV} / 0.12\text{mV/kg-f} = 2.1\text{kg-f}$$

Figura 61. Prueba de la celda de carga con un disco de 25lb (11.34kg).



Al observar la Figura 61, para un disco de 25lb (11.34 kg) el voltaje proporcionado por la celda de carga es de 1.2mV. En este caso, dicho voltaje debería ser de 1.3608mV como se muestra a continuación:

$$0.12\text{mV/kg-f} * 11.34\text{kg-f} = 1.3608\text{mV}$$

Lo anterior indica que en este caso el voltaje proporcionado por la celda de carga tiene un error de 0.1608mV el cual corresponde a 1.34 kg-f como se muestra a continuación:

$$1.3608\text{mV} - 1.2\text{mV} = 0.1608\text{mV}$$
$$0.1608\text{mV} / 0.12\text{mV/kg-f} = 1.34 \text{ kg-f}$$

Figura 62. Prueba de la celda de carga con un disco de 50lb (22.68 kg).



Para un disco de 50lb (22.68kg) el voltaje de salida de la celda de carga es de 2.6mV como se muestra en la Figura 62. En este caso, el voltaje proporcionado por la celda de carga debería ser de 2.7216mV como se muestra a continuación:

$$0.12\text{mV/kg-f} * 22.68\text{kg-f} = 2.7216\text{mV}$$

Lo anterior significa que para este caso el voltaje proporcionado por la celda de carga tiene un error de 0.1216mV el cual corresponde a 1.013kg-f como se muestra a continuación:

$$2.7216\text{mV} - 2.6\text{mV} = 0.1216\text{mV}$$
$$0.1216\text{mV} / 0.12\text{mV/kg-f} = 1.013\text{kg-f}$$

Figura 63. Prueba de la celda de carga con un peso de 75lb (34.02kg)



Finalmente, para un peso de 75lb (34.02kg) el voltaje de salida de la celda de carga es de 4.1 mV como se observa en la Figura 63. Para este caso, dicho voltaje debería ser de 4.0824mV como se muestra a continuación:

$$0.12\text{mV/kg-f} * 34.02\text{kg-f} = 4.0824\text{mV}$$

Lo anterior indica que en este caso el voltaje proporcionado por la celda de carga tiene un error de 0.0176mV el cual corresponde a 0.14667kg-f como se muestra a continuación:

$$4.1\text{mV} - 4.0824\text{mV} = 0.0176\text{mV}$$
$$0.0176\text{mV} / 0.12\text{mV/kg-f} = 0.14667\text{kg-f}$$

De esta manera, se puede observar que el error en el voltaje de salida de la celda de carga disminuye a medida que aumenta el peso de los discos y por lo tanto el mayor error es de 2 kg-f. Así, se considera que los datos de fuerza adquiridos en cada prueba por el prototipo tienen un error de ± 2 kg-f.

4.3 VALIDACIÓN DE LOS DATOS DEL SENSOR GP2Y0A02YK

Para validar los datos del sensor infrarrojo de distancia, se procedió a medir el voltaje de salida de éste a varias distancias del objeto detectado dentro del rango lineal, es decir, dentro de 20-40cm. En la Figuras 64, 65, 66, 67 y 68 se muestra el voltaje proporcionado por el sensor a 20, 25, 30, 35 y 40 cm respectivamente del objeto detectado, esto con el fin de verificar los datos en el rango lineal proporcionados por la gráfica de la Figura 41. Por último, en las Figuras 69 y 70 se muestra la variación de dicho voltaje por cada variación de 5mm de distancia del objeto detectado con el fin de verificar la sensibilidad del sensor.

Figura 64. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 20cm.



Figura 65. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 25cm.



Figura 66. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 30cm.



Figura 67. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 35cm.



Figura 68. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 40cm.



Al observar las Figuras 64, 65, 66, 67 y 68, se verifica que realmente el sensor GP2Y0A02YK proporciona los voltajes del rango lineal mostrados en la gráfica de la Figura 41 a las distancias correspondientes.

Figura 69. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 34cm.



Figura 70. Prueba del sensor GP2Y0A02YK para una distancia de 34.5cm.



Al observar las Figuras 69 y 70, se verifica que la variación o sensibilidad del voltaje por cada 5mm de distancia del objeto detectado es como se muestra a continuación:

$$\frac{1.812V - 1.780V}{34cm - 34.5cm} = 0.032V/5mm = 32mV/5mm = 6.4mV/mm$$

Teniendo en cuenta que la sensibilidad proporcionada por la gráfica de la Figura 41 es de 5mV/mm, el error o diferencia es de 1.4mV el cual corresponde a 0.28mm como se muestra a continuación:

$$1.4mV / 5mV/mm = 0.28mm$$

De esta manera, se considera que los datos de distancia adquiridos en cada prueba por lo prototipo tienen un error de ± 0.28 mm.

5. RESULTADOS

Con el fin de conocer la repetitividad de las mediciones hechas por el prototipo, en este capítulo se muestran los resultados de pruebas hechas en el prototipo a cinco cables de características físicas idénticas, es decir, de igual diámetro, longitud y tipo de construcción. Por otra parte, una vez se verifica la repetitividad de las mediciones, se muestran los resultados de las pruebas hechas a los cables de acero listados en el Cuadro 1 del capítulo 2.

5.1 VERIFICACIÓN DE LA REPETITIVIDAD DE LAS MEDICIONES

En el Cuadro 3 se muestran y se comparan entre sí los resultados de cinco pruebas hechas en el prototipo a cinco cables de características físicas iguales con el fin de conocer la repetitividad de sus mediciones.

Cuadro 3. Resultados de cinco pruebas hechas a un mismo tipo cable.

Cable	Tipo de construcción	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Esfuerzo de rotura (kg/mm ²)	Deformación de rotura (%)	Módulo de Young
1	6x7	1.6	565	58.465	2.024	28.874
2	6x7	1.6	563	56.619	1.918	50.368
3	6x7	1.6	562	58.376	2.130	27.401
4	6x7	1.6	565	56.803	2.066	27.486
5	6x7	1.6	565	55.253	2.028	27.245

Como se observa en el Cuadro 3, las mediciones resultantes de cada prueba son muy similares y las pequeñas diferencias entre éstas se deben a los errores proporcionados por la celda de carga de tracción y por el sensor de desplazamiento. Las diferencias entre las mediciones resultantes del esfuerzo de rotura, también se deben a que los casquillos que forman los ojales de los cables puestos a prueba fueron remachados o prensados manualmente (no mediante un método o máquina para prensar los casquillos de manera estándar); lo anterior teniendo en cuenta que el remachar o prensar los casquillos debilita un poco el cable como tal y esto afecta la carga y/o esfuerzo de rotura real, por lo tanto al hacerlo manualmente hace que hayan diferencias entre los indicadores del esfuerzo de rotura.

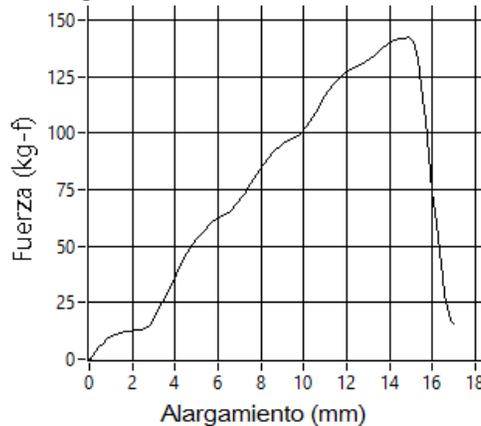
Por otra parte, para los resultados de la prueba hecha al cable 2, se puede observar que su deformación de rotura está aproximadamente 0.1% por debajo de las otras y de esta manera genera un módulo de Young de 50.368. La diferencia de este valor comparado con los demás valores no es significativa teniendo en cuenta que una

pendiente vertical es infinita o indeterminada y una pendiente horizontal es cero, y que además es generado por una deformación de rotura que tan solo se diferencia aproximadamente 0.1% de las otras deformaciones de rotura.

5.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS CABLES DEL CUADRO 1

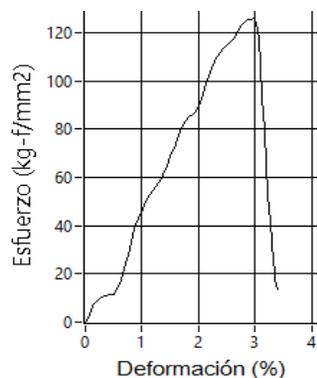
Para el caso del cable 1 se obtuvo una fuerza de rotura de 142,15 kg-f y un alargamiento de rotura de 14,86 mm, el desplazamiento total del elemento móvil o alargamiento máximo de la prueba fue de 17,01 mm como se muestra en la Figura 71.

Figura 71. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 1.



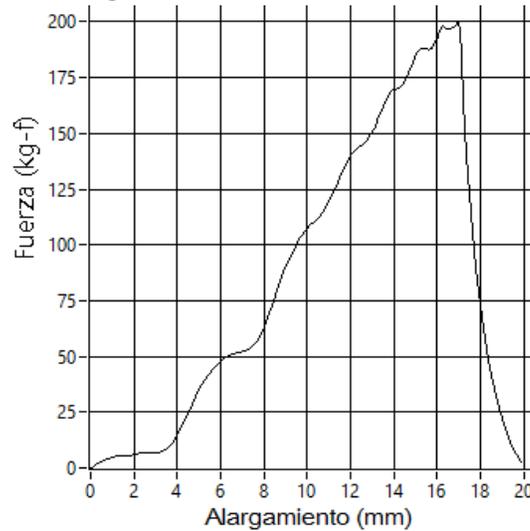
En cuanto al gráfico de esfuerzo-deformación, se obtuvo un esfuerzo de rotura de 125,69 kg-f/mm², una deformación de rotura de 2,97% y un módulo de Young de 52,54. La deformación máxima la cual corresponde al alargamiento máximo fue de 3,4% como se observa en la Figura 72.

Figura 72. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 1.



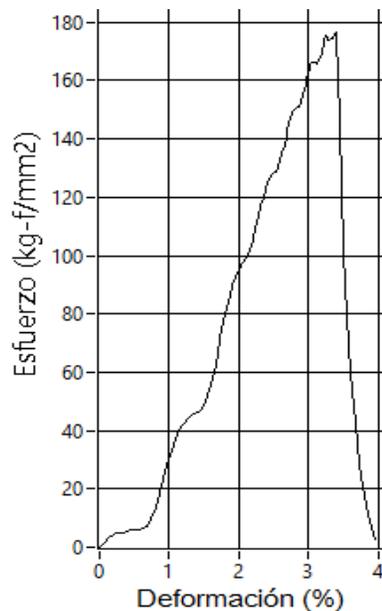
Para el caso del cable 2 se obtuvo una fuerza de rotura 199,81 kg-f y un alargamiento de rotura de 16,98 mm, la posición final del elemento móvil o alargamiento máximo fue de 19,85mm como se muestra en la Figura 73.

Figura 73. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 2



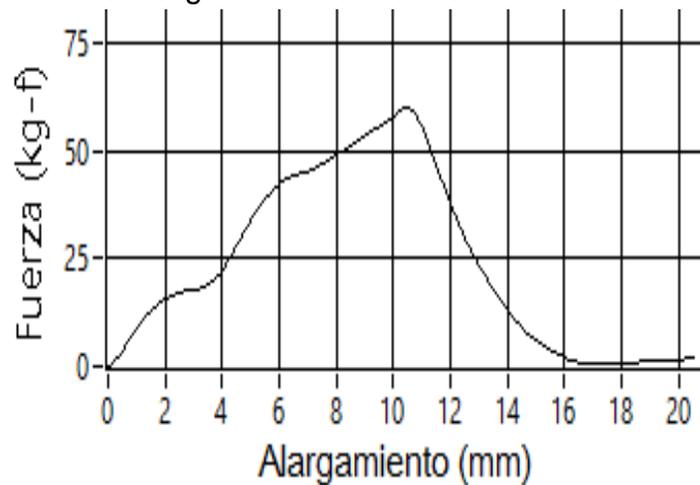
Los indicadores del gráfico esfuerzo-deformación fueron un esfuerzo de rotura de 176,67 kg-f/mm², una deformación de rotura de 3,39% y un módulo de Young de 54,61. La deformación máxima correspondiente al alargamiento máximo fue de 3,97% como se puede observar en la Figura 74.

Figura 74. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 2



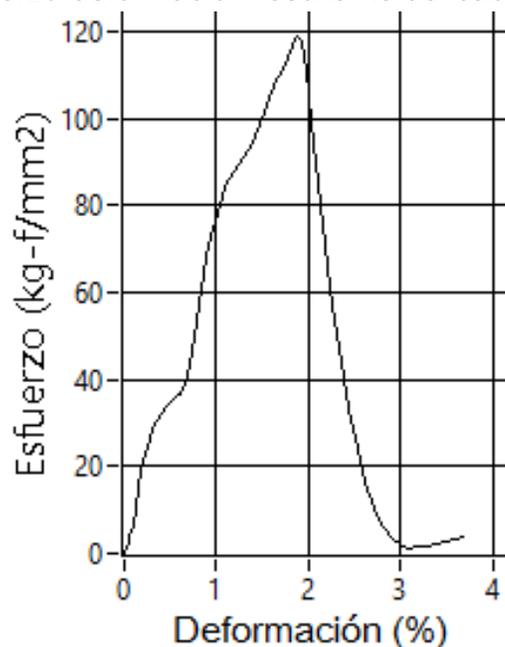
Como se muestra en la Figura 75, para el caso del cable 3 se obtuvo una fuerza de rotura de 59,76 kg-f y un alargamiento de rotura de 10,39mm. El alargamiento máximo o desplazamiento total del elemento móvil en la prueba fue de 20,51mm.

Figura 75. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 3



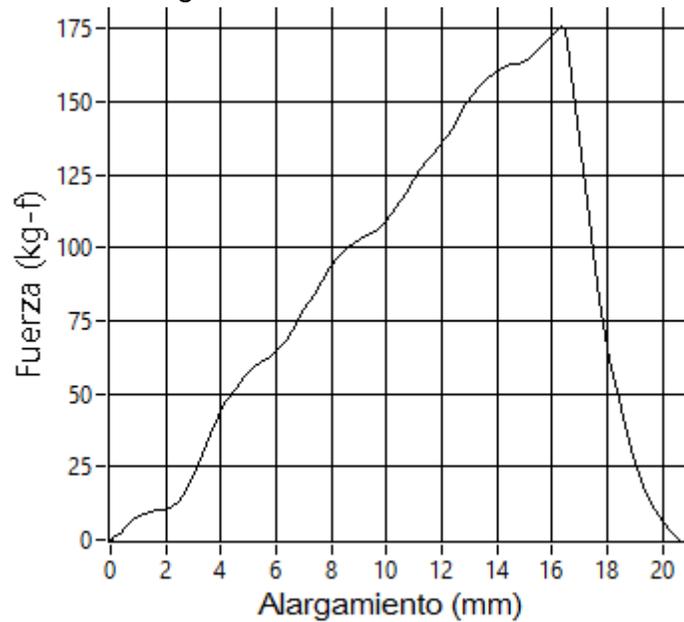
En cuanto al gráfico de esfuerzo-deformación, se obtuvo un esfuerzo de rotura de 118,89 kg-f/mm², una deformación de rotura de 1,86% y un módulo de Young de 101,07. La deformación máxima la cual corresponde al alargamiento máximo fue de 3,68% como se observa en la Figura 76.

Figura 76. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 3



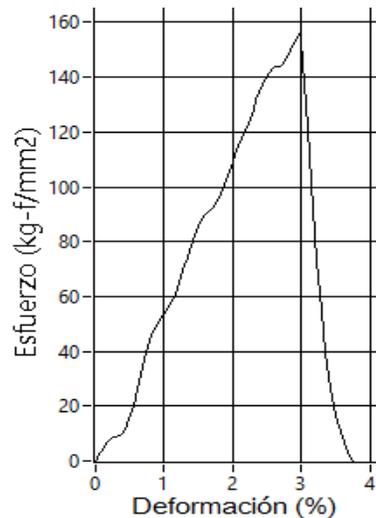
Para el caso del cable 4 se obtuvo una fuerza de rotura 176,08 kg-f y un alargamiento de rotura de 16,32 mm, la posición final del elemento móvil o alargamiento máximo fue de 22,65mm como se muestra en la Figura 77.

Figura 77. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 4



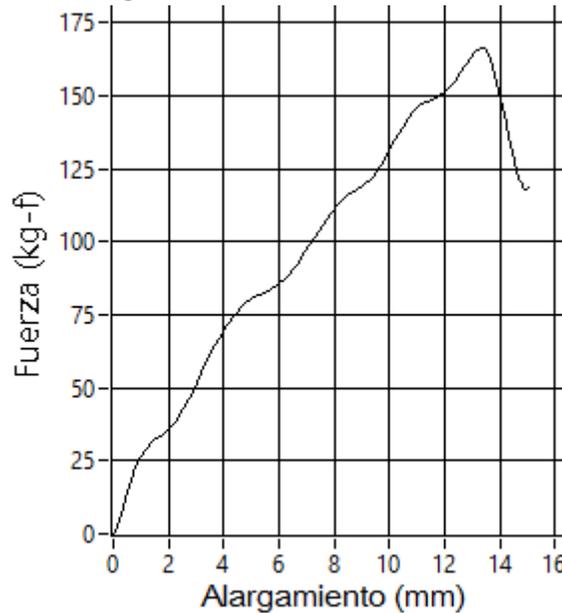
Como se puede observar en la Figura 78, los indicadores del gráfico esfuerzo-deformación fueron un esfuerzo de rotura de 155,69 kg-f/mm², una deformación de rotura de 2,96% y un módulo de Young de 56,8. La deformación máxima correspondiente al alargamiento máximo fue de 4,11%.

Figura 78. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 4



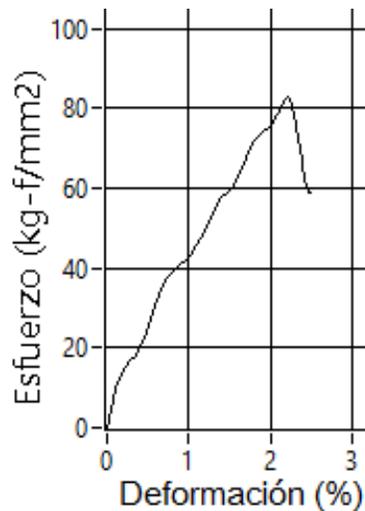
Como se observa en la Figura 79, para el caso del cable 5 se obtuvo una fuerza de rotura de 166,21 kg-f y un alargamiento de rotura de 13,35mm. El alargamiento máximo o desplazamiento total del elemento móvil en la prueba fue de 15,00mm.

Figura 79. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 5



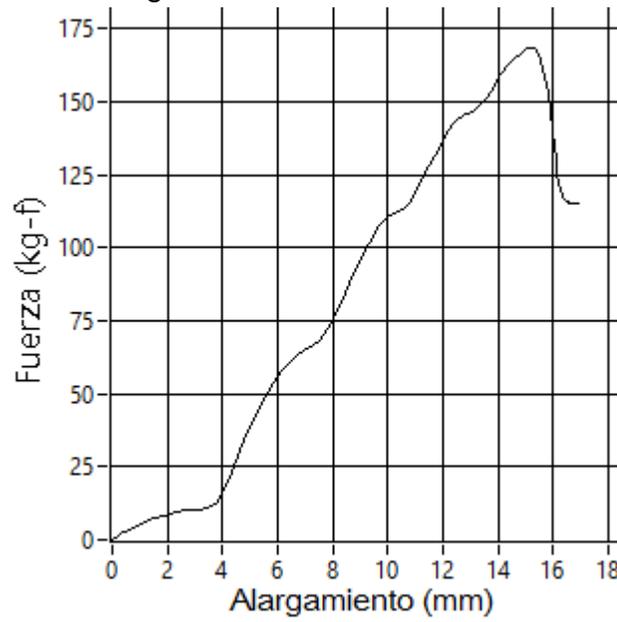
En cuanto al gráfico de esfuerzo-deformación, se obtuvo un esfuerzo de rotura de 82,67 kg-f/mm², una deformación de rotura de 2,21% y un módulo de Young de 87,64. La deformación máxima la cual corresponde al alargamiento máximo fue de 2,48% como se muestra en la Figura 80.

Figura 80. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 5



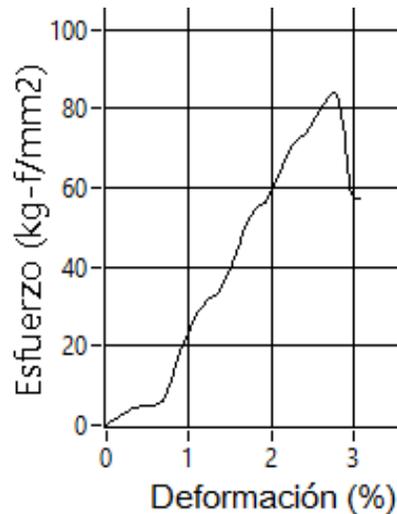
Para el caso del cable 6 se obtuvo una fuerza de rotura 168,55 kg-f y un alargamiento de rotura de 15,25 mm, la posición final del elemento móvil o alargamiento máximo fue de 16,88mm como lo muestra la Figura 81.

Figura 81. Gráfico fuerza-alargamiento resultante del cable 6



Los indicadores del gráfico esfuerzo-deformación fueron un esfuerzo de rotura de 83,83 kg-f/mm², una deformación de rotura de 2,77% y un módulo de Young de 40,05. La deformación máxima correspondiente al alargamiento máximo fue de 3,06% como se observa en la Figura 82.

Figura 82. Gráfico esfuerzo-deformación resultante del cable 6



6. CONCLUSIONES

Terminado este proyecto de grado, se evidencia que se alcanzaron cada uno de los propósitos, objetivos y/o metas establecidas al inicio en el anteproyecto de grado. Así, los logros alcanzados durante el desarrollo de este proyecto fueron:

- Se diseñó y se construyó un sistema mecánico que permite tensionar cables de acero de 0.8, 1.2 y 1.6mm de diámetro hasta llegar a su rotura.
- Se diseñó y se implementó el hardware necesario para realizar la adquisición de los datos de fuerza y alargamiento del cable durante cada prueba.
- Se desarrolló un programa en LabView que permite controlar el actuador lineal eléctrico desde la interfaz visual y que también permite visualizar los datos de fuerza, esfuerzo, alargamiento y deformación, graficarlos y a partir de ellos conocer los indicadores numéricos de las principales propiedades mecánicas de cada cable puesto a prueba.

En cuanto a los resultados de las pruebas a tracción hechas en este proyecto, los cuales se muestran en el capítulo 4, se concluyó que:

- En igualdad de diámetro y longitud, cables de construcción 1x19 son más resistentes, ligeramente más rígidos y menos frágiles que cables de construcción 7x7.
- En igualdad de tipo de construcción y longitud, cables de 0.8mm de diámetro son mucho menos resistentes, mucho más rígidos y más frágiles que cables de 1.2mm.
- En igualdad de tipo de construcción y diámetro, cables de 60cm de longitud son igualmente de resistentes, pero menos rígidos e igual de frágiles que cables de 55 cm de longitud.

7. RECOMENDACIONES

Al realizar pruebas a tracción en el prototipo de sistema diseñado y construido en este proyecto de grado, los autores recomiendan:

- Al inicio de cada prueba a realizar, el elemento móvil del sistema mecánico debe estar posicionado exactamente en el punto de referencia establecido el cual es a 34cm del sensor de desplazamiento.
- Antes de empezar cada prueba, se debe cerrar el marco sobre el riel del sistema mecánico con el fin de evitar que el cable de acero al romperse ocasione lesiones a las personas que estén cercanas al riel.
- Al finalizar cada prueba y con el fin de iniciar una nueva, al extender el actuador con el fin de posicionar nuevamente el elemento móvil en el punto de referencia, se recomienda desanclar la celda de carga de tracción de la punta del actuador ya que ésta al finalizar su longitud de recorrido empieza a girar fuertemente lo cual puede dañar la celda de carga de tracción.

Al culminar este proyecto y con el fin de desarrollar proyectos similares en un futuro, los autores recomiendan:

- Con el fin de implementar un sistema que tenga la capacidad de hacer pruebas a cables de acero de cualquier diámetro (cables hasta de 1" de diámetro), se recomienda utilizar un actuador lineal hidráulico cuya carga nominal esté por encima de 45 toneladas, y por lo tanto utilizar una celda de carga cuya carga nominal esté por encima de la del actuador.
- Desarrollar proyectos en los que se diseñe e implemente prototipos de sistemas que realicen pruebas a torsión de cables de acero y pruebas a compresión y/o flexión de objetos de diferentes materiales.
- Al utilizar amplificadores de instrumentación, éstos se deben polarizar con un voltaje mayor a los voltajes que ingresan por las entradas inversora y no inversora; esto con el fin de que el voltaje de salida no se sature, es decir, no sea igual al voltaje de polarización.
- Verificar con un osciloscopio cada una de las señales proporcionadas por los sensores y por las etapas de amplificación con el fin de identificar señales de ruido y así tomar las medidas correspondientes de filtrado.

BIBLIOGRAFÍA

BELTRÁN, Francisco. RESISTENCIA DE MATERIALES I. Universidad Politécnica de Madrid. 2007

CERVERA RUIZ, Miguel; BLANCO DÍAZ, Elena. MECÁNICA DE ESTRUCTURAS. 2 ed. Barcelona: UPC, 2002. 328p.

ICONTEC. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA 2961. Bogotá D.C. 2008

IDROVO URGILES, Pablo Xavier.; QUINTANILLA MOLINA, Luis Miguel. APLICACIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS PARA LA OBTENCIÓN DE DEFORMACIONES EN ELEMENTOS SOMETIDOS A CARGAS COMBINADAS. Facultad de Ingeniería. Universidad Politécnica Salesiana. 2010

MAYORI, Alejandro. RESISTENCIA DE MATERIALES APLICADA. Universidad Mayor de San Andrés. 2010

MEUNE, René. CABLES DE ACERO PARA MAQUINARIAS DE OBRAS PÚBLICAS, CONSTRUCCIÓN Y CANTERAS. Traducido por Félix López Otamendi. Bilbao: Ediciones Urmo S. A., 1966. 271p.

MOTT, Robert. RESISTENCIA DE MATERIALES. Traducido por Rodolfo Navarro Salas. 5 ed. México D.F.: PEARSON Educación, 2009. 787p.

RAYAS, J.A.; RODRIGUEZ VERA, R.; MARTINEZ, A. MEDICIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG EN EL HULE LÁTEX USANDO ESPI. En: Revista Mexicana de Física. Diciembre, 2003

SABATÉ CARRERAS, Pere. NTP 155: CABLES DE ACERO. Centro de Investigación y Asistencia Técnica - Barcelona. 1980

SALAZAR TRUJILLO, Jorge Eduardo. RESISTENCIA DE MATERIALES BÁSICA PARA ESTUDIANTES DE INGENIERÍA. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. 2007

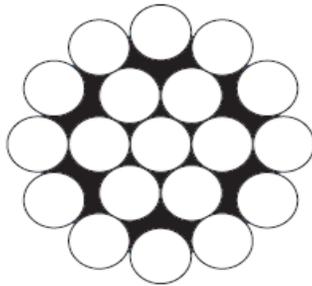
TIOLI, Humberto; NAVAS, Alejandro. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CELDAS DE CARGA PARA COMPROBACIONES INTERMEDIAS DE MÁQUINAS DE FUERZA. En: Ingeniería. Mayo, 2012

ANEXOS

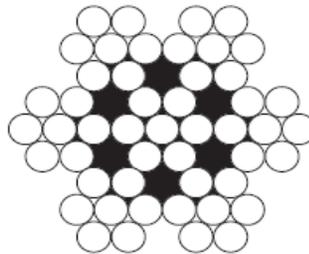
Anexo A. Hoja técnica de los cables de acero puestos a prueba.

Código	Cons.	Diametro	Kg X Metro	Carga Ruptura En Kg Aprox.	Valor X Metro
01-Cga-01	1 X 19	1.2 mm (3/64")	0.007	115 Kg	\$ 95
01-Cga-02	1 X 19	1.6 mm (1/16")	0.012	180 Kg	\$ 132
01-Cga-36	1 X 19	1.8 mm	0.016	220 Kg	\$ 220
01-Cga-11	1 X 19	2 mm (5/64")	0.0194	239 Kg	\$ 230
01-Cga-12	1 X 19	2.4 mm (3/32")	0.0281	360 Kg	\$ 300
01-Cga-13	1 X 19	3 mm	0.0446	480 Kg	\$ 485
01-Cga-08	1 X 19	3.2 mm (1/8")	0.0508	520 Kg	\$ 420
01-Cga-14	1 X 19	3.5 mm	0.0607	850 Kg	\$ 540
01-Cga-15	1 X 19	4 mm (5/32")	0.0781	660 Kg	\$ 696

Código	Cons.	Diametro	Kg X Metro	Carga Ruptura En Kg Aprox.	Valor X Metro
01-Cga-16	7 X 7	1.2 mm (3/64")	0.007	120 Kg	\$ 250
01-Cga-03	7 X 7	1.6 mm (1/16")	0.01	180 Kg	\$ 180
01-Cga-04	7 X 7	1.8 mm	0.01	220 Kg	\$ 295
01-Cga-05	7 X 7	2 mm (5/64")	0.014	240 Kg	\$ 292
01-Cga-06	7 X 7	2.4 mm (3/32")	0.022	380 Kg	\$ 335
01-Cga-17	7 X 7	3 mm	0.036	500 Kg	\$ 440
01-Cga-07	7 X 7	3.2 mm (1/8")	0.037	538 Kg	\$ 410
01-Cga-18	7 X 7	3.5 mm	0.048	580 Kg	\$ 500
01-Cga-19	7 X 7	4 mm (5/32")	0.064	620 Kg	\$ 750
01-Cga-09	7 X 7	4.7 mm (3/16")	0.081	1000 Kg	\$ 765



1X19



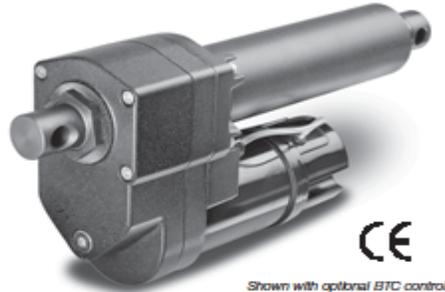
7X7

Anexo B. Hoja técnica del actuador lineal eléctrico B-TRACK K2G05

B-Track | K2

Rugged Duty Actuator DC Motor Acme Screw

Up to 1200 lbs. Rated Load
Up to 2.7 in./sec. Travel Speed



Shown with optional BTC control

The K2 is the base model in the B-Track family. It incorporates a patented in-line load transfer design which provides high load capability for rugged-duty use, efficient power use, compact package size, excellent corrosion and washdown protection, and high performance synthetic lubrication for life, all at an affordable price.

The K2 uses a solid bronze or Delrin® nut with a rolled hybrid screw yielding high impact capability and long screw life. Heavy-duty double-ended ball bearing motors, hardened gears, O-ring seals and an extension rod bearing system that provides best in class capabilities.

Features

- Protective coatings and O-ring seals throughout
- Patented in-line load system
- Hybrid nut and screw design, no brake needed
- Ball detent overload clutch
- 2 to 24 inch stroke lengths
- Up to 1200 pound load capacities
- Speeds up to 2.7 in./sec. travel
- Thermal overload incorporated into the motor
- Heavy wall construction
- Double ball bearing motors and heat treated gears
- Rugged extension rod bearing support
- Optional 90 vdc motor for use with SBC-AC control
- Custom mounting options available

Typical Applications

- Heavy duty platform and engine lifts
- Deck and implement lifts for tractors and mobile applications
- Wheelchair and scooter lifts
- Bin and tank cover lifts
- Flow gate open/close
- Table positioning

Load/Current/Speed/Duty Cycle

- Maximum Static Rating: 3000 lbs. Static (in-line load)
 - Refer to performance chart for load/current/speed capabilities
 - Stroke Length Tolerance: +/- .06"
 - Motor is protected with auto reset breaker inside motor housing (temperature/current/time dependent)
 - Overload clutch setting: +25% over rated dynamic load
 - Duty cycle is time/temperature/load dependent, suggested guidelines are:
 - 50% max on-time/50% off-time for loads up to 50% of capability
 - 25% max on-time/75% off-time for loads between 50%-80% of capability
 - 10% max on-time/90% off-time for loads between 80%-100% of capability
- (Load/stroke profiles will allow some adjustment variation from these guidelines.)

Operating Environment

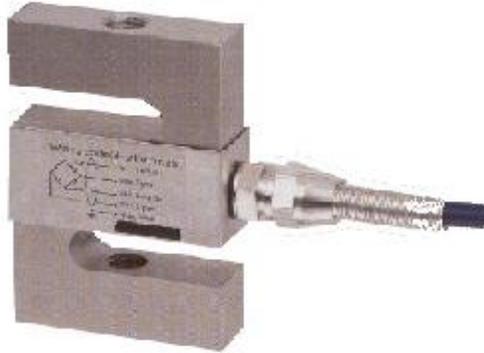
- Ambient temp range: -30°F to 150°F
- Weather resistant enclosure & seals (IP 65 capable, 250 hour salt spray, 500 hour for paint)
- Normal operating voltage: 10-16 vdc (Ratings are at 12 vdc Normal.)

Control/Connections

- 14 gauge stranded lead wires-UL style 1230 w/PVC insulation Class F 105°C
- Lead wires abrasion protected with braided covering
- Use momentary contact double pole/double throw switch in powering unit for extend/retract operation. (ON)-OFF-(ON) DPDT
- Connectors:
 - Packard 56 series or Delphi Weather-Pack
 - Packard 56 series with 56 series blades (#2984883 & #2982987)
 - Delphi Weather-Pack series (#121015792 & #12101973)

Anexo C. Hoja técnica de la celda de carga SA

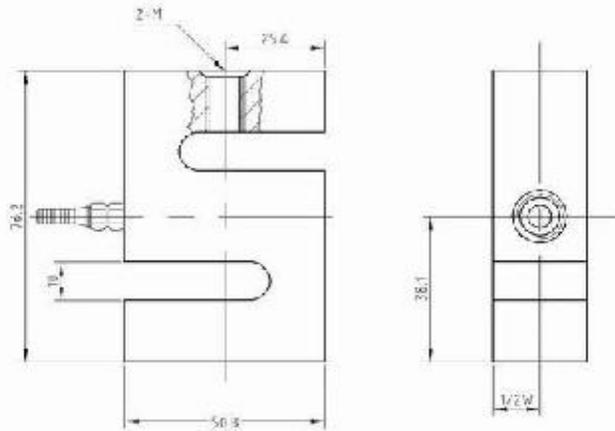
Data Sheet



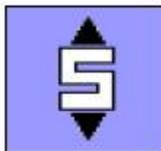
SA
LOAD CELL "S"

Double-parallel construction, has superiority in loading and its structure. Easy installation. High precision. High reliability and stability. Can be used in combination scale, package scale, systematic scale and belt scale.

Dimensions



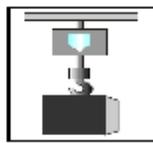
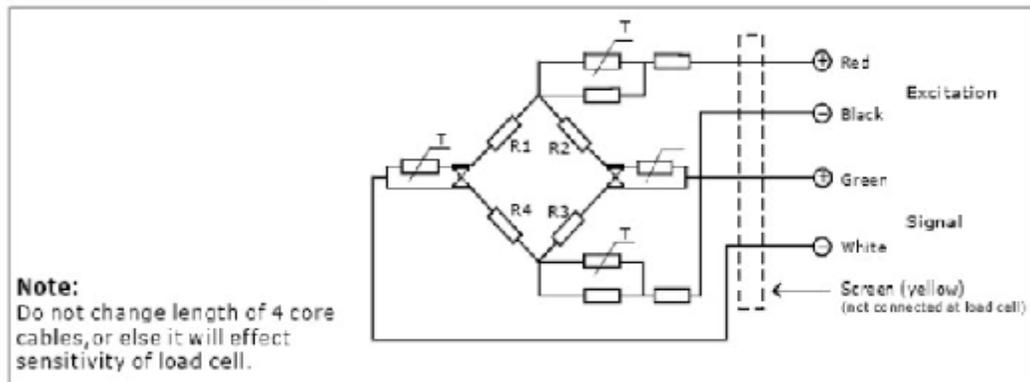
Rated load (kg)	50	100	150	200	250	300	500	1000
W	15	15	15	19	19	19	19	38
M	M8	M8	M8	M12	M12	M12	M12	M16



Specification

ITEM \ PARAMETER	C2	C3	UNIT
Rated load (E _{max}):	50,100,200,300,500,1000		kg
Maximal numbers of load cell intervals(N _{lc}):	2000	3000	
Minimum load cell verification intervals(V _{min})	0,03		% of rated load
Sensitivity(C _n):	2±0.2%		mV/V
Total error:	0,03	0,02	±% of rated output
Temperature effect on sensitivity (TK _c):	0,0024	0,0012	±% of rated output/°C
Temperature effect on zero balance (TK ₀):	0,002	0,0008	±% of rated output/°C
Zero balance:	1		±% of rated output
Input impedance(red+,blank-):	385±5		Ω
Output impedance(green+,blue-):	350±2		Ω
Insulation impedance:	≥5000		MΩ
Safe overload:	150		% of rated capability
Ultimate overload:	300		% of rated capability
Operating temperature range:	-30~+70/-20~+160		°C/°F
Recommend excitation:	5~12		V(AC or DC)
Maximum excitation:	15		V(AC or DC)
Material of elastomer :	alloy steel / stainless steel		
Protection class:	IP65/IP67		
Cable:	3m		Ø5
Citation:	OIML R60 / GB7551-1997		
The data for deviation of synthesis error · TK ₀ · TK _c are typical values · The sum of these data meets the requirements according to OIML R60 ·			

Circuit Diagram



LEXUS
ELECTRONIC SCALES