

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ARTICULADO  
PARA PRUEBAS EN LABORATORIO DEL MARRANO INTELIGENTE ITION-E  
DE INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR  
TÉCNICA (MFL)**

**JUAN RODOLFO RODRIGUEZ LACHE  
JUAN SEBASTIAN ROZO VEGA**

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

**2012**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ARTICULADO  
PARA PRUEBAS EN LABORATORIO DEL MARRANO INTELIGENTE ITION-E  
DE INSPECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR  
TÉCNICA (MFL)**

**JUAN RODOLFO RODRIGUEZ LACHE  
JUAN SEBASTIAN ROZO VEGA**

**Trabajo de grado para optar por el titulo de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director**

**ING CARLOS BORRAS PINILLA, Ph.D., MCS.**

**CO-DIRECTOR**

**ING SERGIO QUINTERO**

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

**2012**

*Dedicado:*

*A mis padres por su apoyo y comprensión.*

*A mis hermanas por su amistad y buenos consejos.*

*Juan Rodolfo Rodríguez Lache*

*Quiero agradecer:*

*A mis padres por su apoyo.*

*A mi novia por su paciencia.*

*A la Corporación para la Investigación de la Corrosión por la oportunidad.*

*Juan Sebastián Rozo Vega.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la corporación para la investigación de la corrosión (CIC), especialmente a los funcionarios Sergio Quintero y Hernán garnica por todo el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron con la realización de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION .....	20
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	22
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....	22
1.2.1 Objetivo general.....	23
1.2.2 Objetivos específicos .....	24
1.3 DESPLIEGE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD) .....	25
1.3.1 Requerimientos del consumidor .....	25
1.3.2 Organización del requerimiento .....	25
1.3.3 Planteamientos de las alternativas .....	28
1.3.3.1. Brazo articulado con resortes de torsión en las articulaciones (Opción 1). .....	28
1.3.3.2 Mecanismo tipo Grashof de doble balancín.( Opción 2).....	29
1.3.3.3 Mecanismo brazo articulado con guía ranurada (Opción 3).....	29
1.3.4 Evaluación de las opciones de diseño .....	30
1.3.5 Descripción de la solución propuesta .....	31
1.3.5.1 Componentes .....	31
1.3.5.2 Funcionamiento.....	32
1.4 DISEÑO DEL BRAZO ARTICULADO. ....	33
1.4.1 Barra de sensores.....	34
1.4.2 Barra larga .....	35
1.4.3 Base.....	36
1.4.4 Resortes .....	37
1.4.5 Materiales de construcción. ....	37
2. PIGGING .....	38
2.1 DEFINICIÓN GENERAL.....	38
2.2 HISTORIA .....	38
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PIG'S SEGÚN LA PIPELINE PRODUCTS AND SERVICES ASSOCIATION (PPSA).....	39
2.3.1 PIG's Utilitarios .....	40

2.3.2 ILI's .....	42
2.4 HERRAMIENTAS ILI PARA DETECCIÓN DE VARIACIONES EN EL ESPESOR DE TUBERÍAS DE HIDROCARBUROS POR TÉCNICA MFL.....	44
2.5 REQUERIMIENTOS PARA EL LANZAMIENTO DE ILI'S. ....	47
3. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO A LOS IMPACTOS USANDO SIMULINK. ....	48
3.1 DINÁMICA DEL CUERPO RÍGIDO EN SIMMECHANICS.....	48
3.2 FUERZAS DE CONTACTO NO-PENETRANTES.....	51
3.3 PENALTY FORCE METHOD .....	52
3.3.1 Función de penalización en problemas de optimización matemática ....	53
3.3.2 Simulación de colisiones entre cuerpos rígidos implementando el PFM basado en un sistema de resorte-amortiguador. ....	54
3.4 MODELO DESARROLLADO EN SIMULINK PARA LA COLISIÓN ENTRE EL MECANISMO BRAZO ARTICULADO Y LA PARED DE LA TUBERÍA.....	60
3.5 CÁLCULOS Y RESULTADOS USADOS DURANTE LA SIMULACIÓN .....	64
3.5.1 Impacto con un cordón de soldadura de 5mm.....	65
3.5.2 Impacto con un defecto de 25mm.....	73
4. DISEÑO DE RESORTES. ....	80
4.1 RESORTE DE EXTENSIÓN .....	80
4.2 RESORTE DE TORSIÓN DOBLE.....	84
5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR .....	88
5.1 FUERZAS EXPERIMENTADAS EN EL MECANISMO. ....	88
5.1.1 Fuerzas en operación normal de trabajo. ....	88
5.1.1.1 Barra de sensores en operación normal de trabajo.....	88
5.1.1.2 Barra larga en operación normal de trabajo .....	90
5.1.2 Fuerzas experimentadas en la pieza por el paso de una soldadura. ....	90
5.1.2.1 Barra de sensores pasando por una soldadura .....	91
5.1.2.2 Barra larga pasando por una soldadura .....	92
5.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR .....	93
5.2.1 Análisis de del mecanismo pasando por una soldadura. ....	93

5.2.1.1	Análisis del poliuretano. ....	95
5.2.1.2	Análisis del duraluminio y ejes de acero inoxidable .....	97
6.	PRUEBAS DE LABORATORIO .....	99
6.1	DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS .....	99
6.1.1	Motor.....	100
6.1.2	Variador de frecuencia.....	100
6.1.3	Tubería con dos tapas. ....	101
6.1.4	Piñón de arrastre. ....	102
6.1.5	Correa sincrónica.....	103
6.1.6	Mesa para la ubicación de todos los componentes .....	103
6.1.7	Brazo articulado.....	104
6.1.8	Imu 9 DOF (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro).....	105
6.1.9	Tarjeta Arduino UNO (microcontrolador ATmega 328).....	106
6.2	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. ....	106
6.2.1	Características del sensor LSM303DLM (acelerómetro 3 ejes y magnetómetro 3 ejes) .....	107
6.2.2	Características del sensor L3G4200D (giroscopio de 3 ejes) .....	108
6.3	DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.....	111
6.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS .....	111
6.5	CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS .....	117
6.5.1	Conclusiones Pruebas a 1,5 m/seg .....	117
6.5.2	Conclusiones Pruebas a 2,25 m/seg .....	121
6.5.3	Conclusiones Pruebas a 3 m/seg .....	124
	CONCLUSIONES .....	128
	BIBLIOGRAFÍA.....	131
	ANEXOS.....	133

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MARRANO INTELIGENTE ITION-E.....	23
FIGURA 2. BRAZO ARTICULADO CON RESORTES EN LAS ARTICULACIONES. ....	28
FIGURA 3. MECANISMO TIPO GRASHOF DE DOBLE BALANCÍN .....	29
FIGURA 4. MECANISMO TIPO BRAZO ARTICULADO CON GUÍA RANURADA. .....	30
FIGURA 5. PARTES SOLUCION PROPUESTA. ....	32
FIGURA 6. BRAZO ARTICULADO EN LA TUBERÍA .....	33
FIGURA 7. ÁREA DE TRABAJO. ....	34
FIGURA 8 BARRA DE SENSORES. ....	35
FIGURA 9 BARRA LARGA.....	36
FIGURA 10. BASE.....	36
FIGURA 11 RESORTE DE EXTENSIÓN Y DOBLE DE TORSIÓN.....	37
FIGURA 12. PIG'S DE SEPARACIÓN O DRENAJE .....	40
FIGURA 13. PIG DE DISCOS DE POLIURETANO.....	41
FIGURA 14. PIGS DE LIMPIEZA CON CEPILLOS DE ACERO.....	41
FIGURA 15 PIG'S ESPECIALES.....	42
FIGURA 16. ILI PARA DETECCIÓN DE PÉRDIDA DE ESPESOR POR TÉCNICA MIXTA MFL-UT (MAGNETIC-FLUX-LEAKAGE Y ULTRA SONIDO). ....	43
FIGURA 17 MARRANO INTELIGENTE ITION-E.....	44
FIGURA 18. CIRCUITO MAGNÉTICO CON CEPILLOS .....	45
FIGURA 19. PIG MFL.....	46
FIGURA 20. MECANISMO DE CUATRO BARRAS BAJO LA INFLUENCIA DE LA GRAVEDAD.....	49
FIGURA 21 ÁNGULOS ENTRE LAS BARRAS 1-2 2-3.....	51
FIGURA 22 FUERZAS DE CONTACTO NO-PENETRANTES.....	52
FIGURA 23. ESQUEMÁTICO DE LA SITUACIÓN DESCRITA POR LA TEORÍA HERTZIANA DEL CONTACTO.....	54
FIGURA 24 IMPACTO EXCÉNTRICO DE DOS CUERPOS RÍGIDOS .....	55
FIGURA 25 : DIAGRAMA DE MOMENTUN E IMPULSOS DEL CUERPO A DURANTE UNA LA ETAPA DE DEFORMACIÓN. ....	57
FIGURA 26 ESQUEMÁTICO DEL BRAZO Y REPRESENTACIÓN EN SIMMECHANICS .....	60
FIGURA 27 VENTANA PRINCIPAL DEL MODELO EN SIMULINK .....	61
FIGURA 28. DIAGRAMA CONTENIDO EN EL BLOQUE 'RESORTE DE EXTENSIÓN' .....	62

FIGURA 29. DIAGRAMA CONTENIDO EN 'FUERZA DE CONTACTO BARRA MAYOR' .....	62
FIGURA 30. DIAGRAMA CONTENIDO EN 'PENALTY FORCE' .....	63
FIGURA 31 DIAGRAMAS CONTENIDOS EN EL BLOQUE 'FORCÉ'(IZQUIERDA) Y EN EL BLOQUE 'ZERO FORCÉ'(DERECHA).....	63
FIGURA 32. IMPACTO CON UN CORDÓN DE SOLDADURA DE 5MM .....	65
FIGURA 33 VELOCIDAD EN EL PUNTO DE CONTACTO CON CORDÓN DE SOLDADURA 5 MM.....	66
FIGURA 34 ESQUEMÁTICO DEL RESORTE DE TORSIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DEL BRAZO ARTICULADO AL SER ENSAMBLADO .....	67
FIGURA 35 GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA MAYOR. ....	69
FIGURA 36. GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA DE SENSORES.....	70
FIGURA 37 DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE LA BARRA MAYOR.....	71
FIGURA 38. DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE LA BARRA DE SENSORES ..	72
FIGURA 39 DEFECTO 25MM .....	73
FIGURA 40 VELOCIDAD EN EL PUNTO DE CONTACTO CON CORDON DE SOLDADURA 25 MM.....	74
FIGURA 41 GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA MAYOR. ....	76
FIGURA 42. GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA DE SENSORES.....	77
FIGURA 43 DESPLAZAMIENTO ANGULAR BARRA MAYOR .....	78
FIGURA 44 DESPLAZAMIENTO ANGULAR BARRA DE SENSORES .....	79
FIGURA 45. FUERZAS BARRA DE SENSORES EN OPERACIÓN NORMAL DE TRABAJO .....	88
FIGURA 46 FUERZAS BARRA LARGA EN OPERACIÓN NORMAL DE TRABAJO .....	90
FIGURA 47 FUERZA BARRA DE SENSORES PASANDO POR UNA SOLDADURA.....	91
FIGURA 48 FUERZAS BARRA LARGA PASANDO POR UNA SOLDADURA ....	92
FIGURA 49. FUERZAS EN EL MECANISMO POR EL PASO POR UNA SOLDADURA.....	94
FIGURA 50 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL POLIURETANO.....	95
FIGURA 51 DEFORMACIÓN DEL POLIURETANO .....	96
FIGURA 52 FACTOR DE SEGURIDAD DEL POLIURETANO .....	96
FIGURA 53 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE .....	97

FIGURA 54 DEFORMACIÓN DEL DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE .....	98
FIGURA 55 FACTOR DE SEGURIDAD DEL ACERO INOXIDABLE Y EL POLIURETANO .....	98
FIGURA 56 BANCO DE PRUEBAS.....	99
FIGURA 57. MOTOR SIEMENS .....	100
FIGURA 58. VARIADOR DE FRECUENCIA .....	101
FIGURA 59 TUBERÍA CON DOS TAPAS .....	102
FIGURA 60. PIÑÓN DE ARRASTRE.....	102
FIGURA 61 CORREA SINCRÓNICA.....	103
FIGURA 62. MESA PARA LA UBICACIÓN DE TODOS LOS COMPONENTES.	104
FIGURA 63 BRAZO ARTICULADO.....	104
FIGURA 64. IMU 9 DOF (ACELERÓMETRO, GIROSCOPIO, MAGNETÓMETRO). .....	105
FIGURA 65 TARJETA ARDUINO UNO (MICROCONTROLADOR ATMEGA 328) .....	106
FIGURA 66 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS. ....	107
FIGURA 67 VENTANA FRONTAL DEL PROGRAMA EN LABVIEW .....	109
FIGURA 68 VENTANA DE BLOQUES DEL PROGRAMA. ....	110
FIGURA 69 GRAFICA TIPO 1 .....	112
FIGURA 70 GRAFICA TIPO 2 .....	113
FIGURA 71. GRAFICA TIPO 3 .....	114
FIGURA 72. GRAFICA TIPO 4 .....	115
FIGURA 73 GRAFICA TIPO 5 .....	116
FIGURA 74.COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PRUEBA 1.5 M/S .....	117
FIGURA 75. PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 1.5 M/S .....	118
FIGURA 76. SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 1.5 M/S .....	119
FIGURA 77 TERCERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 1.5 M/S .....	119
FIGURA 78 COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PRUEBA DE 2,25 M/S .....	121
FIGURA 79 PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 2,25 M/S .....	121
FIGURA 80 SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 2,25 M/S .....	122
FIGURA 81 TERCERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 2,25 M/S .....	122

FIGURA 82 COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PARA LA PRIMERA TOMA A 3 M/S ..... 124

FIGURA 83 PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S ..... 124

FIGURA 84 SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S ..... 125

FIGURA 85 TERCERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S ..... 126

FIGURA 86. ARDUINO UNO ..... 167

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. MATRIZ DE CALIDAD.....	27
TABLA 2. EVALUACION DE LAS OPCIONES DE DISEÑO. ....	31
TABLA 3. COEFICIENTES Y EXPONENTES PARA DETERMINAR <i>Sut</i> .....	82
TABLA 4. LIMITES ELÁSTICOS A LA TORSIÓN MÁXIMOS $S_Y$ Y $S_{YS}$ PARA RESORTES HELICOIDALES DE EXTENSIÓN EN APLICACIONES ESTATICAS .....	83
TABLA 5. TABLA DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.....	156

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR ARTICULADO .....	134
ANEXO B DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS.....	139
ANEXO C. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DURALUMINIO.....	146
ANEXO D PROPIEDADES DEL POLIURETANO .....	153
ANEXO E. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y MODELAMIENTO EN ANSYS .....	154
ANEXO F. CATALOGO MOTOR SIEMENS.....	159
ANEXO G VARIADOR DE FRECUENCIA.....	160
ANEXO H ARDUINO .....	167
ANEXO I IMU 9 GRADOS DE LIBERTAD.....	168

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE BRAZO ARTICULADO PARA PRUEBAS EN LABORATORIO DEL MARRANO INTELIGENTE ITION-E DE INSPECCION DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS POR TECNICA (MFL).\*

**AUTORES** JUAN RODOLFO RODRÍGUEZ LACHE\*\*  
JUAN SEBASTIAN ROZO VEGA\*\*

**PALABRAS CLAVES** Técnica MFL, herramientas de inspección de tuberías, marrano inteligente, CIC, ITION-E, IMU de 9 grados de libertad

### DESCRIPCIÓN

En la industria en general, y especialmente de hidrocarburos, es de vital importancia mantener en condiciones de operación óptimas las tuberías. Existen muchos tipos de metodologías y tecnologías para el monitoreo del estado de las tuberías. Desde 1965 y gracias al gran desarrollo tecnológico que se presentó en los últimos años, el método más popular y acertado es la corrida de herramientas de inspección dentro de la tubería. En este orden de ideas la Corporación para la investigación de la corrosión CIC aborda el reto de desarrollar una herramienta de inspección inteligente para la detección de la pérdida de espesor en líneas de transporte basadas en la técnica MFL (Magnetic Flux leakage), la cual tendrá como nombre ITION- E. dada la complejidad de este reto tecnológico la CIC subdivide este proyecto en uno de los cuales es el soporte, orientación y protección de los sensores del modulo de inspección por dispersión de flujo magnético MFL.

Este trabajo de grado consiste en el diseño y construcción de un mecanismo prototipo para dar solución al problema planteado. Se simularan sus componentes en SolidWorks y validaran en Ansys respectivamente, además el prototipo se equipara con una tarjeta IMU de 9 grados de libertad con el fin de determinar la estabilización del mecanismo después del paso por una soldadura. Para este escenario se construirá un banco de pruebas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Director. Ing. Carlos Borrás Pinilla, Ph.D., MCS Codirector Ing. Sergio Quintero

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE ARTICULATED ARM FOR LABORATORY TESTING OF THE INTELLIGENT PIG ITION-E FOR IN LINE INSPECTION BY MFL TECHNIQUE OF OIL TRANSPORTATION PIPELINES:.\*

**AUTHORS** JUAN RODOLFO RODRÍGUEZ LACHE\*\*  
JUAN SEBASTIAN ROZO VEGA\*\*

**KEYWORDS** Technical MFL pipeline inspection tools, intelligent pig, CIC, ITION-E, IMU 9 degrees of freedom

### DESCRIPTION

In the industry in general, and especially for hydrocarbons, it is vital to maintain the pipelines in optimum operating conditions. There are many different types of methodologies and technologies for monitoring the condition of the pipes. Since 1965, thanks to the great technological development that occurred in recent years, the most popular and successful is the In Line Inspection (ILI) tools that run inside the pipe. In this vein the Corporación para la Investigación de la Corrosion (CIC) addresses the challenge of developing an intelligent inspection tool for detecting thickness loss in transmission lines based on the MFL (Magnetic Flux leakage) technique, which will name as ITION-E. Given the complexity of this technological challenge the CIC divided this project in one of which is the support, guidance and protection of the MFL sensor module.

This degree work is the design and construction of a prototype mechanism for solving the problem. Its components will be modeled and validated in SolidWorks and Ansys respectively, and the prototype is matched with a sensor IMU 9 degrees of freedom in order to determine the stabilization of the mechanism after its passage through a weld. For this scenario, a test bench will be constructed.

+

---

\* Graduate project

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Director. Ing. Carlos Borrás Pinilla, Ph.D., MCS. Codirector Sergio Quintero.

## INTRODUCCION

En la industria en general, y especialmente de hidrocarburos, es de vital importancia mantener en condiciones de operación óptimas las tuberías. Existen muchos tipos de metodologías y tecnologías para el monitoreo del estado de las tuberías. Desde 1965 y gracias al gran desarrollo tecnológico que se presentó en los últimos años, el método más popular y acertado es la corrida de herramientas de inspección dentro de la tubería.

Una herramienta de inspección de tuberías, o herramienta ILI (In Line Inspection) por sus siglas en inglés, es un dispositivo que viaja dentro de una tubería, impulsada por el producto, recolectando datos del estado de la tubería a través de la implementación de técnicas de inspección no destructiva que son instaladas en dichos equipos. Este tipo de herramientas evolucionaron de los PIG (pipeline inspection gauge) o raspadores convencionales. Los dispositivos convencionales solo cumplían funciones de limpieza y son herramientas netamente mecánicas, por esta razón también se conoce a las ILI como PIG'S inteligentes. Existe un gran número de empresas a nivel mundial que prestan este tipo de servicios y a pesar de ser el método más efectivo de diagnóstico, este tipo de corridas se hacen con una baja frecuencia debido entre otras razones a sus altos costos, compleja logística para su ejecución, impacto en la producción y su alto riesgo. El mayor obstáculo en nuestro país es que no hay industria nacional que preste servicios con este tipo de herramientas. Lo cual se traduce en costos aún más elevados y poca flexibilidad del servicio.

La Corporación para la Investigación de la Corrosión – CIC inició el desarrollo de herramientas de inspección de líneas de transporte de hidrocarburos en el año 2004, en miras de ofrecer a través de investigación aplicada, soluciones locales a las problemáticas de inspección presentes en el país.

Los desarrollos de la CIC se fundamentaron inicialmente en sistemas de registro de variables operacionales al interior de toda la línea, más adelante se logró construir una herramienta de inspección inercial ITION-I, la cual además de medir las variables operacionales, también cuenta con la capacidad de reconstrucción de la altimetría y la planimetría, identificación y localización de accesorios, abolladuras críticas, fugas de producto transportado, registro de parámetros operacionales y carta de soldadura. Los resultados obtenidos lograron el posicionamiento de esta tecnología en el sector del transporte de hidrocarburos del país.

En el 2011 la CIC aborda el reto de desarrollar una nueva herramienta de inspección inteligente para la detección de la pérdida de espesor en líneas de transporte basada en la técnica de MFL (Magnetic Flux leakage), la cual ha llamado ITION-E. Dada la complejidad de este nuevo reto tecnológico la CIC abre espacios de interacción académica a futuros profesionales en las diferentes áreas del conocimiento para la integración y búsqueda de soluciones a través de procesos de investigación aplicada.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

### **1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

La información técnica o detallada de este tipo de herramientas es muy escasa ya que por lo general son desarrollos de empresas privadas que son muy celosas con sus diseños. La información que brindan las empresas es más de carácter operacional, aplicabilidad y rendimiento de la herramienta. Esto sumado al hecho que no existen empresas Colombianas que desarrollen herramientas ILI hace necesario un trabajo de investigación y desarrollo partiendo de un diseño propio. Para el caso del módulo MFL de la herramienta ITION-E, que es una técnica de inspección no destructivo NDT (not-destruction-testing), el mecanismo requerido por este módulo está compuesto por un grupo de brazos articulados distribuidos radialmente que brindan soporte y posicionamiento al elemento sensor. Este mecanismo debe garantizar un correcto desempeño del circuito magnético durante la actividad de inspección, pero al mismo tiempo debe permitir la deformación controlada del arreglo de sensores durante el paso por una restricción física como por ejemplo una abolladura, soldadura o accesorios presentes sin llegar a sufrir daños físicos en sus componentes ni en los elementos sensores. Estos mecanismos articulados usados en el módulo MFL deberán permanecer a una distancia y orientación específica con respecto a la pared de la tubería independientemente de su comportamiento.

Lo que compete a este proyecto, como ya ha sido mencionado anteriormente, es el grupo de brazos articulados del módulo MFL de la herramienta. En una herramienta real de revisión longitudinal, que es el tipo de inspección que se pretende implementar con ITION-E, este grupo de brazos se encuentran distribuidos de forma radial de forma que se tenga una lectura en toda la circunferencia de la tubería. Esto se debe tener en cuenta en el diseño pero no hace parte de este proyecto la ubicación espacial de los brazos en la herramienta,

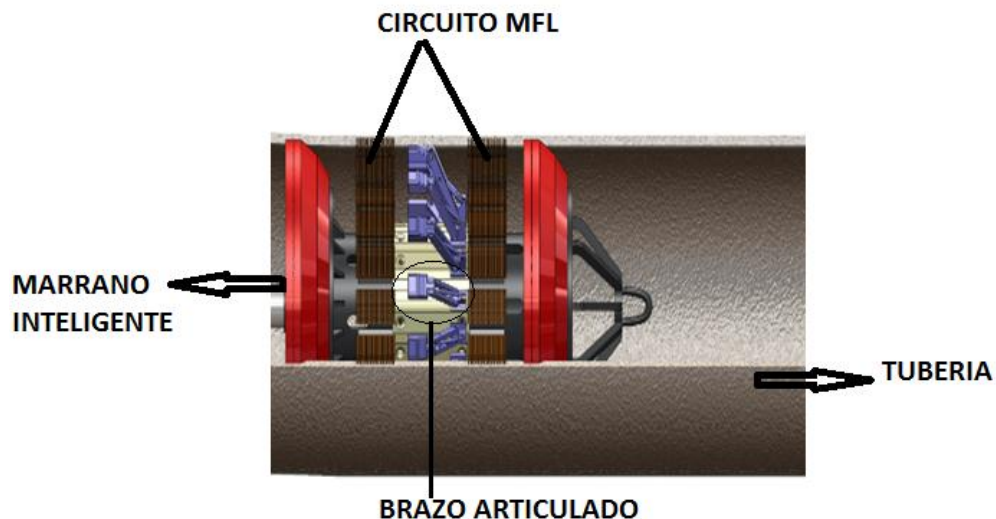
lo que se debe asegurar es la modularidad de los brazos para que estos puedan ser acoplados a la herramienta bajo las especificaciones que se necesiten para la corrida.

## 1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.2.1 Objetivo general

Contribuir con la misión y la formación integral del estudiante de la Universidad Industrial de Santander fortaleciendo la relación Universidad-Industria (UIS- CIC) y el desarrollo investigativo y tecnológico de la Escuela de Ingeniería Mecánica, a través del grupo de investigación DICBOT (Dinámica, control y robótica), mediante el diseño y construcción de un prototipo de brazo articulado que soporte, proteja y oriente los sensores del modulo de inspección por dispersión de flujo magnético (MFL) del marrano inteligente ITION-E para pruebas en laboratorio.

**FIGURA 1. MARRANO INTELIGENTE ITION-E**



Fuente: CIC.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un prototipo brazo articulado, instrumentado con sensores angulares y de medición inercial tarjeta IMU de 5 ejes), cumpliendo con las siguientes especificaciones:
  - La barra que soporta los sensores esté paralela con la tubería durante la mayor parte de la operación normal de la herramienta a excepción del paso por accesorios u obstrucciones.
  - La barra que soporta los sensores estén ubicados a la mínima distancia posible de la superficie interna de la tubería.
  - Los sensores estén estructural y físicamente protegidos contra los impactos que se pueden presentar durante el desplazamiento de la herramienta.
- Realizar el diseño del mecanismo brazo articulado basado en una tubería petrolera CASING de 20" en las siguientes dimensiones (20x10x10 cm) que son las disponibles para el brazo según los requerimientos de la CIC como una primera aproximación al volumen disponible en la herramienta.
- Diseñar los resortes del sistema de recuperación del brazo articulado a su posición de trabajo después de pasar por una soldadura presente en la línea de transporte de hidrocarburos en operación simulada en Matlab.
- Realizar un análisis de esfuerzos del brazo articulado en una herramienta CAD-CAE (solidworks y Ansys) utilizando las fuerzas obtenidas en la simulación en Matlab.
- Realizar pruebas en laboratorio utilizando software de adquisición y procesamiento de datos (LabView) con el fin de determinar el máximo desplazamiento angular, aceleraciones y tiempo que le toma al mecanismo

brazo articulado estabilizarse, después de pasar por una soldadura a la velocidad de operación normal de la herramienta (0 - 3 m/s). Una vez finalizadas las pruebas, se realizarán los planos detallados para la construcción del mecanismo brazo articulado.

### **1.3 DESPLIEGE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)**

#### **1.3.1 Requerimientos del consumidor**

Las demandas básicas de la CIC para el desarrollo del proyecto giran en torno a los siguientes requerimientos:

- Segura para operación dentro de líneas de transporte de hidrocarburos.
- Resistente.
- Modular.
- Fácil mantenimiento.
- Confiable.
- Escalable.
- Simplicidad del diseño.
- Larga expectativa de vida.
- Económico.
- Poca contaminación ambiental.
- Resistente a la oxidación.

#### **1.3.2 Organización del requerimiento**

Para un mayor entendimiento de los requerimientos, estos los podemos clasificar en subgrupos que tengan que ver con el brazo articulado.

<b>Construcción:</b>	Simplicidad en el diseño Modular Escalable Económico
<b>Operación:</b>	Confiable Segura para operación en líneas de hidrocarburos Poca contaminación ambiental Compatible con el circuito magnético
<b>Prolongado servicio:</b>	Resistente Larga expectativa de vida Fácil mantenimiento Resistente a la oxidación

**TABLA 1. MATRIZ DE CALIDAD.**

		Pocas piezas	Materiales no abrasivos	Materiales de alta tenacidad	Materiales Inoxidables	Medidas proporcionales	Ensamblaje sencillo	Disponibilidad de materiales	Materiales no ferromagnéticos	Materiales resistentes a fatiga	Baja vibración	Piezas estandarizadas	Materiales inertes
Segura para la operación en líneas de	12	3	9	9	3	0	0	0	0	9	3	0	9
		36	108	108	36	0	0	0	0	108	36	0	108
Resistente	11	3	3	9	3	0	0	3	0	9	3	0	0
		33	33	99	33	0	0	33	0	99	33	0	0
Compatible con el circuito	10	0	3	0	0	0	0	3	9	0	9	0	0
		0	30	0	0	0	0	30	90	0	90	0	0
Confiable	9	9	3	9	0	0	3	3	0	9	3	0	3
		81	27	81	0	0	27	27	0	81	27	0	27
Poca contaminación	8	0	9	0	3	0	0	0	0	0	0	0	9
		0	72	0	24	0	0	0	0	0	0	0	72
Resistente a la oxidación	7	0	3	0	9	0	0	0	0	0	0	0	9
		0	21	0	63	0	0	0	0	0	0	0	63
Simplicidad en el diseño	6	9	0	0	0	9	9	3	0	0	0	9	0
		54	0	0	0	54	54	18	0	0	0	54	0
Fácil mantenimiento	5	9	3	0	0	0	9	3	0	0	0	3	0
		45	15	0	0	0	45	15	0	0	0	15	0
Larga expectativa de vida	4	3	3	9	3	0	0	0	0	9	3	0	3
		12	12	36	12	0	0	0	0	36	12	0	12
Modular	3	9	0	0	0	9	9	0	0	0	0	9	0
		27	0	0	0	27	27	0	0	0	0	27	0
Económica	2	3	0	0	3	0	0	9	0	0	0	9	0
		6	0	0	6	0	0	18	0	0	0	18	0
Escalable	1	3	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	0
		3	0	0	0	9	0	0	0	0	0	9	0
		297	318	324	174	90	153	141	90	324	198	123	282

Fuente: Autores.

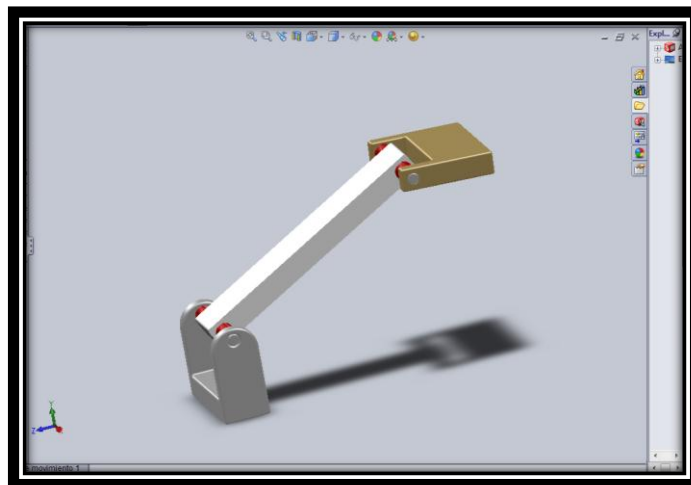
### 1.3.3 Planteamientos de las alternativas

A continuación se plantearán las posibilidades de solución del problema teniendo muy en cuenta las necesidades presentadas por la CIC. Posteriormente se presentará la selección de la solución teniendo como base los requerimientos obtenidos en el análisis QFD

#### 1.3.3.1. Brazo articulado con resortes de torsión en las articulaciones (Opción 1).

Esta solución consiste en un mecanismo tipo brazo articulado, como se muestra en la figura. Este mecanismo funciona con dos resortes que accionan cada articulación. La función del resorte en la base consiste en que el mecanismo siempre este en contacto con la tubería, y el resorte en la articulación superior garantiza que la tarjeta de sensores esté paralelas con la tubería en la mayor parte de su operación. Cumpliendo así con los requerimientos dados por la CIC. En este diseño tenemos en cuenta limitar el rango angular del brazo, para evitar golpes y vibraciones obteniendo un buen desempeño del mecanismo.

**FIGURA 2. Brazo articulado con resortes en las articulaciones.**

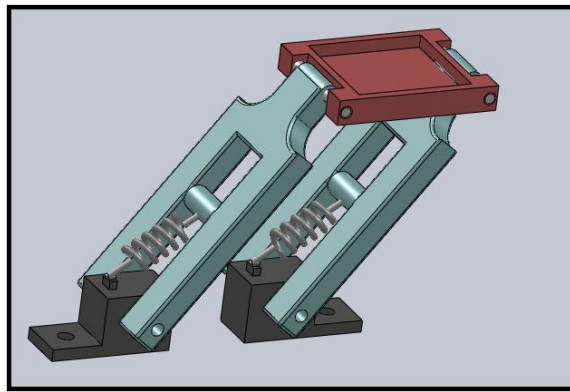


Fuente: Autores

### 1.3.3.2 Mecanismo tipo Grashof de doble balancín.( Opción 2)

Esta solución consiste en un mecanismo tipo Grashof de doble balancín accionado por resortes. La característica más deseable de este mecanismo es que la barra donde se encontrarían los sensores esta paralela con el cuerpo del marrano en todo momento, aunque esto no significa que este paralelo a la pared de la tubería.

**FIGURA 3. Mecanismo tipo grashof de doble balancín**

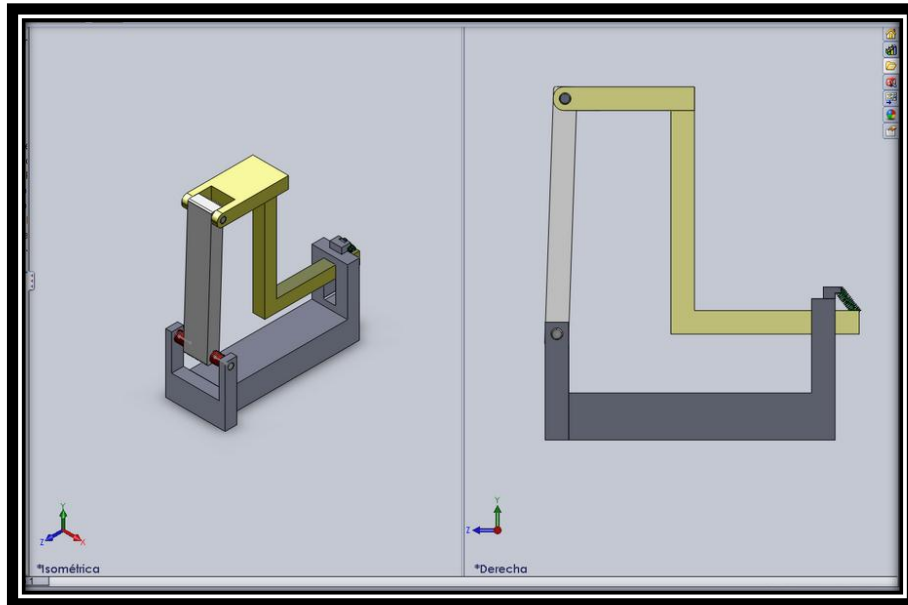


Fuente: Autores

### 1.3.3.3 Mecanismo brazo articulado con guía ranurada (Opción 3).

Esta solución también consiste en un mecanismo con dos articulaciones pero en este caso se usa una combinación de resortes de torsión y extensión para su operación como se muestra en la figura. El resorte en la articulación inferior mantiene el mecanismo en contacto con la pared de la tubería mientras que la paralelidad de los sensores y la tubería se garantiza gracias al resorte de extensión entre la barra superior y la guía ranurada. Esta solución limita el rango angular de su articulación por medio de la guía ranurada en su base. Esta solución también cumple los requerimientos realizados por la CIC:

**FIGURA 4. MECANISMO TIPO BRAZO ARTICULADO CON GUÍA RANURADA.**



Fuente:Autores

#### **1.3.4 Evaluación de las opciones de diseño**

Para alcanzar una solución definitiva se evalúa la relación de cada una de las alternativas de solución. Para esto, se aplica una ponderación a los requerimientos más críticos de los parámetros de diseño más importantes, determinados en la matriz de calidad. Se observa 4 opciones con mayor puntaje, lo cual significa que es la solución que cumple de manera más global los requerimientos previamente establecido.

**TABLA 2. EVALUACION DE LAS OPCIONES DE DISEÑO.**

					OPCIÓN 1		OPCIÓN 2		OPCIÓN 3	
TOTAL	Parámetros de ingeniería		REQUERIMIENTOS	POND.	Nota	Resultado	Nota	Resultado	Nota	Resultado
297	Pocas piezas	0,1922	Simplicidad en el diseño	0,0769	5	0,3844	3	0,23064	1	0,07688
			facil mantenimiento	0,0641	3	0,19218	3	0,19218	1	0,06406
			Modular	0,0384	5	0,1922	5	0,1922	3	0,11532
			Económica	0,0085	5	0,0427	3	0,02562	3	0,02562
			Escalable	0,0043	5	0,02135	5	0,02135	1	0,00427
318	Materiales no abrasivos	0,2058	Circuito magnético	0,0605	3	0,18156	3	0,18156	3	0,18156
			Poca contaminación	0,1453	5	0,72635	5	0,72635	5	0,72635
324	Materiales tenaces	0,2097	Segura para líneas de transporte de hidrocarburos	0,1094	5	0,547	3	0,3282	1	0,1094
			Resistente	0,1003	5	0,50145	5	0,50145	3	0,30087
324	Materiales resistente a la fatiga	0,2097	Confiable	0,1452	5	0,72585	5	0,72585	1	0,14517
			Larga expectativa de vida	0,0645	3	0,19356	3	0,19356	1	0,06452
282	Materiales inertes	0,1825	Resistentes a la oxidación.	0,1825	5	0,9125	5	0,9125	5	0,9125
TOTAL		1,0000		1,000		4,6211		4,23146		2,72652

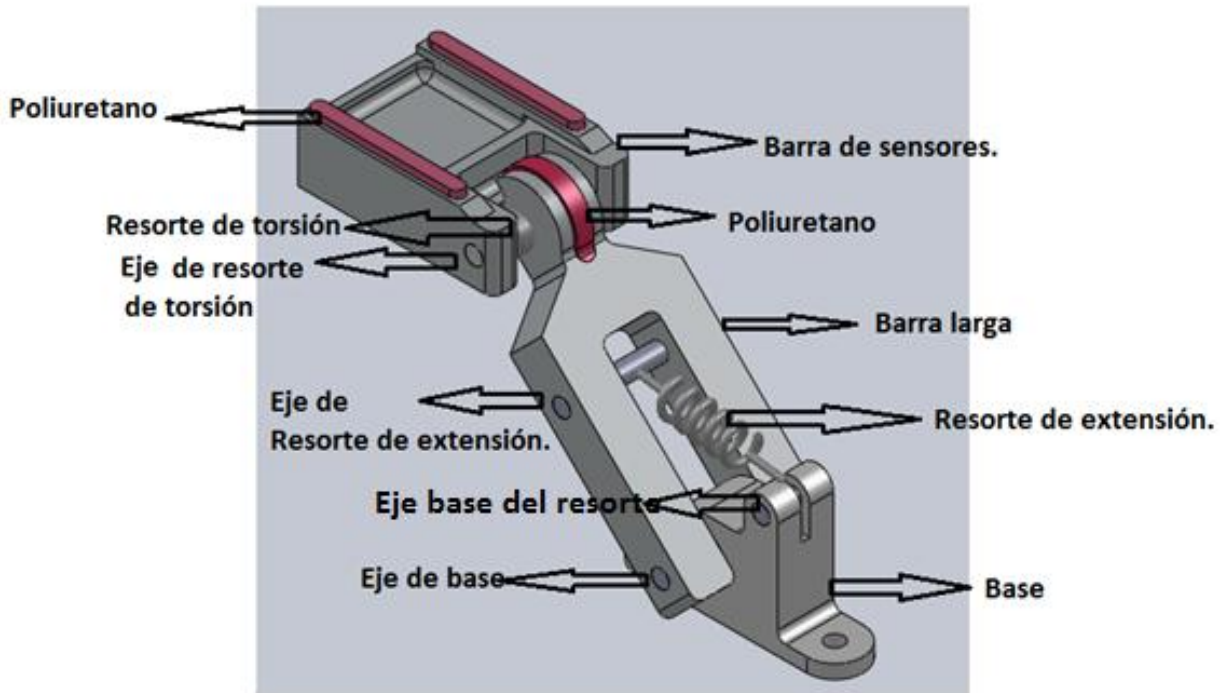
Fuente: Autores.

### 1.3.5 Descripción de la solución propuesta

#### 1.3.5.1 Componentes

- La solución consta de los siguientes componentes:
- Una barra larga.
- Una barra de sensores.
- Un resorte doble de torsión.
- Un resorte de extensión.
- Un soporte o base del brazo articulado.
- Tres laminas de poliuretano de puntos de contacto.
- Ejes.

**FIGURA 5. PARTES SOLUCION PROPUESTA.**



Fuente: Autores

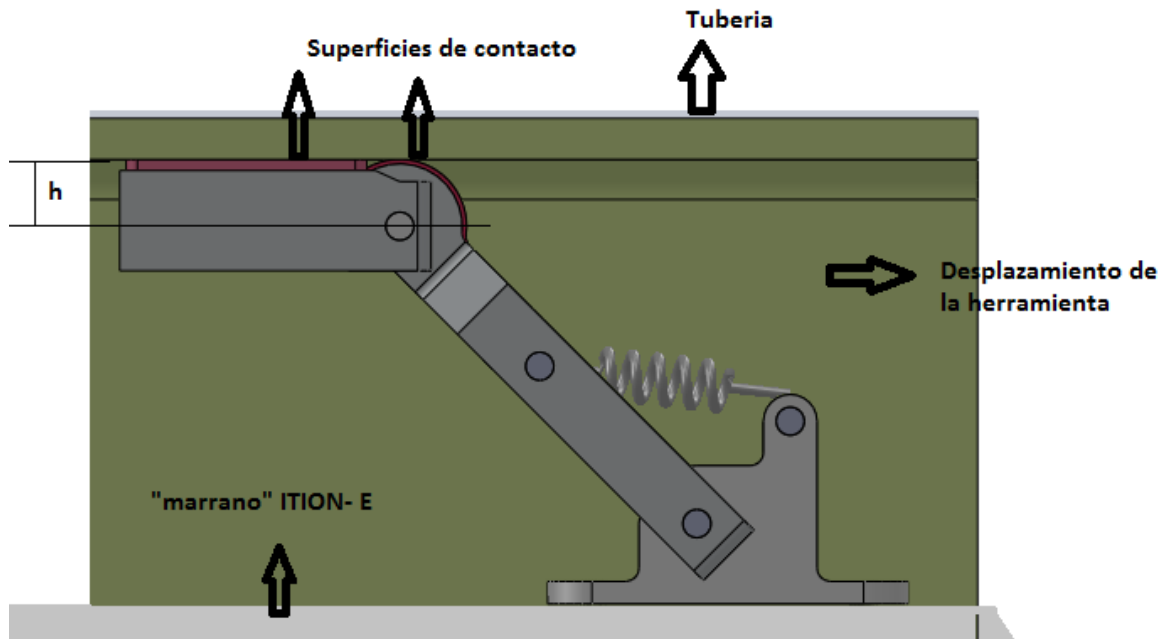
### **1.3.5.2 Funcionamiento.**

El mecanismo, tiene tres partes fundamentales que son la barra de sensores, la barra larga y base del mecanismo. La barra larga está articulada en su parte inferior a la base la cual le da una rotación en el eje de la base y articulada en la parte superior a la barra de sensores gracias a un eje y un resorte de torsión.

La base está anclada al cuerpo del “marrano”, la barra de sensores está en contacto con la tubería gracias a la acción que hace el resorte de extensión y paralela con la misma gracias a la acción del resorte de torsión. Las superficies de contacto del brazo se dan por medio del poliuretano ubicado tanto en la barra larga, como en la barra de los sensores. En este prototipo la altura (h) del poliuretano en la barra larga y en la barra de los sensores es la misma puesto que

las pruebas se realizarán simulando la tubería como una superficie plana garantizando el contacto de las superficies con la tubería.

**FIGURA 6. BRAZO ARTICULADO EN LA TUBERÍA**

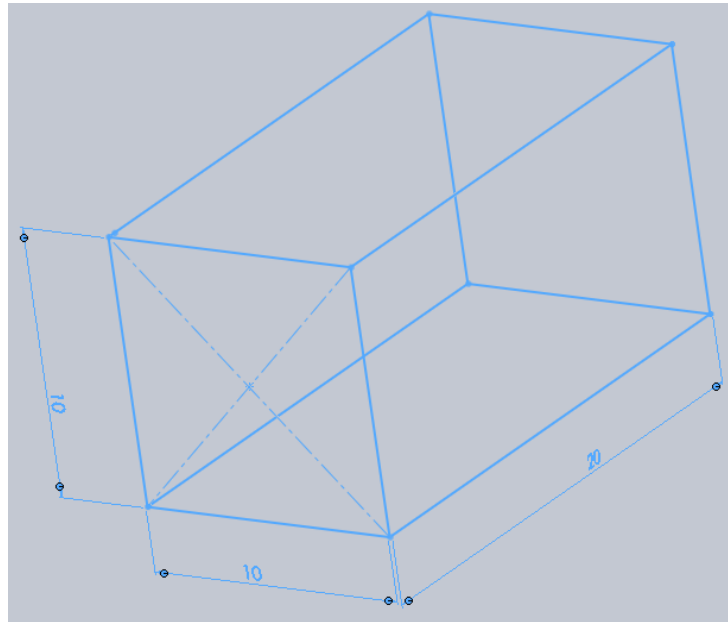


Fuente: Autores.

#### **1.4 DISEÑO DEL BRAZO ARTICULADO.**

Como primer requerimiento de la CIC proporciona un espacio de trabajo de 10 cm de ancho por 10 cm de alto por 20 cm de largo. En ese espacio es donde el mecanismo va a operar sin tener en cuenta ningún tipo de defecto.

**FIGURA 7. ÁREA DE TRABAJO.**



Fuente: Autores

Teniendo en cuenta requerimientos importantes como lo son el área de trabajo y la paralelidad de los sensores se procederá al dimensionamiento de nuestro brazo articulado.

Nuestro brazo articulado consta de 3 partes principales las cuales son:

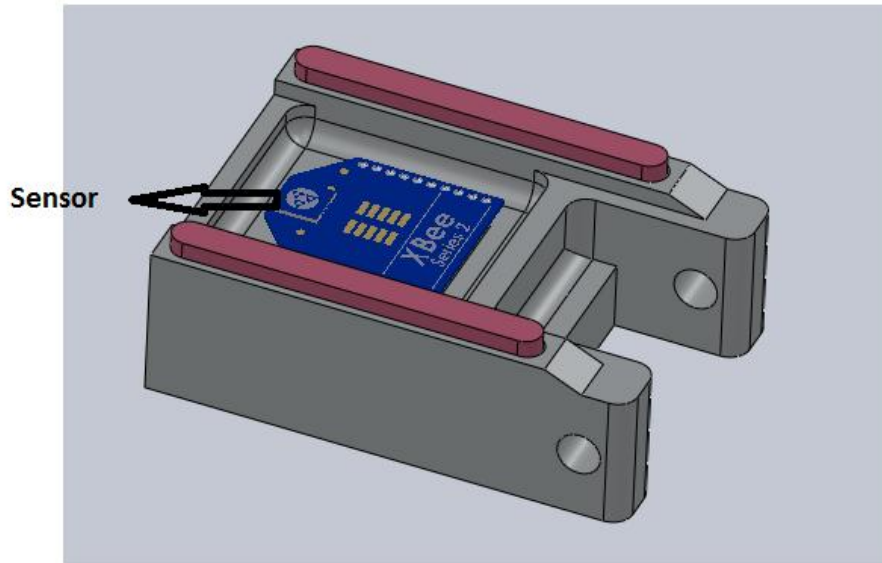
- Barra de sensores.
- Barra larga.\_.,
- Base.
- Resortes

#### **1.4.1 Barra de sensores.**

La barra de sensores fue diseñada con el propósito de mantener, orientar y proteger los sensores de efecto hall que tendrán aproximadamente las siguientes dimensiones. 20 cm x 15 cm x 0,3 cm. La superficie de contacto de la barra y la

tubería se da por medio de poliuretano en dos superficies de contacto. Sus dimensiones son especificadas en el anexo A

### FIGURA 8 BARRA DE SENSORES.



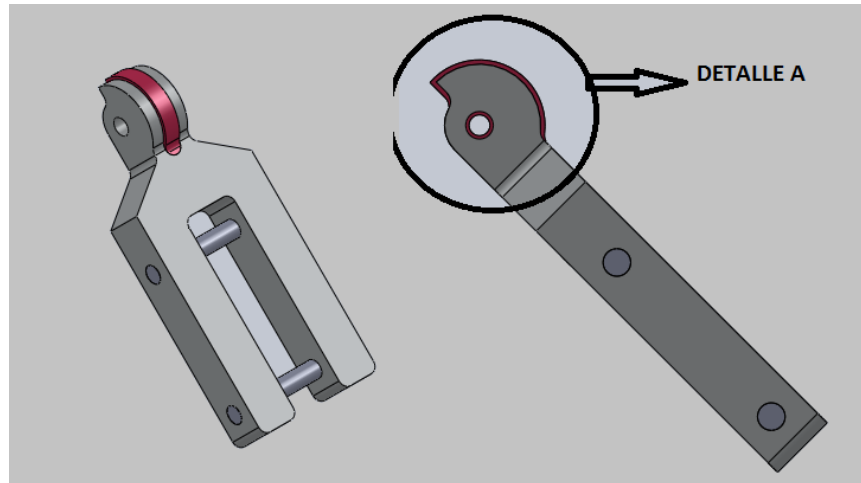
Fuente: Autores

#### 1.4.2 Barra larga

La barra larga fue diseñada con el fin de mantener los la barra de los sensores y como tal los sensores lo mas cerca posible de la tubería. La superficie de contacto de la barra y la tubería se da por medio de una superficie de poliuretano mostrada en la figura 9 en el detalle A, la altura que sobresale el poliuretano de la estructura de la barra larga es especificada en el Anexo A .

Gracias a la configuración del mecanismo y especialmente de esta pieza, el impacto producido al pasar por una soldadura, es recibido en su totalidad por la barra larga, más específicamente por el poliuretano sobrepuesto en dicha barra.

**FIGURA 9 BARRA LARGA**

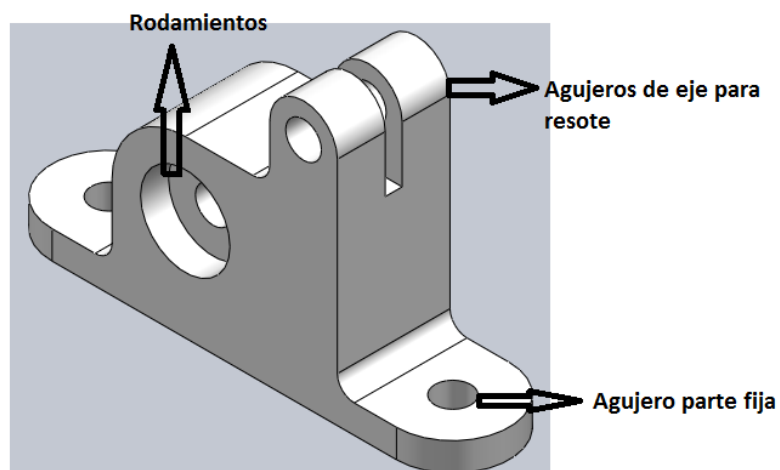


Fuente: Autores

### 1.4.3 Base

Da soporte a todo el mecanismo, también nos sirve como pivoteo de la barra larga, la base. En el eje donde pivotea el mecanismo tiene incrustados un par de rodamientos. La base nos sirve para fijar el mecanismo al marrano. La base está especificada en el anexo A.

**FIGURA 10. BASE**

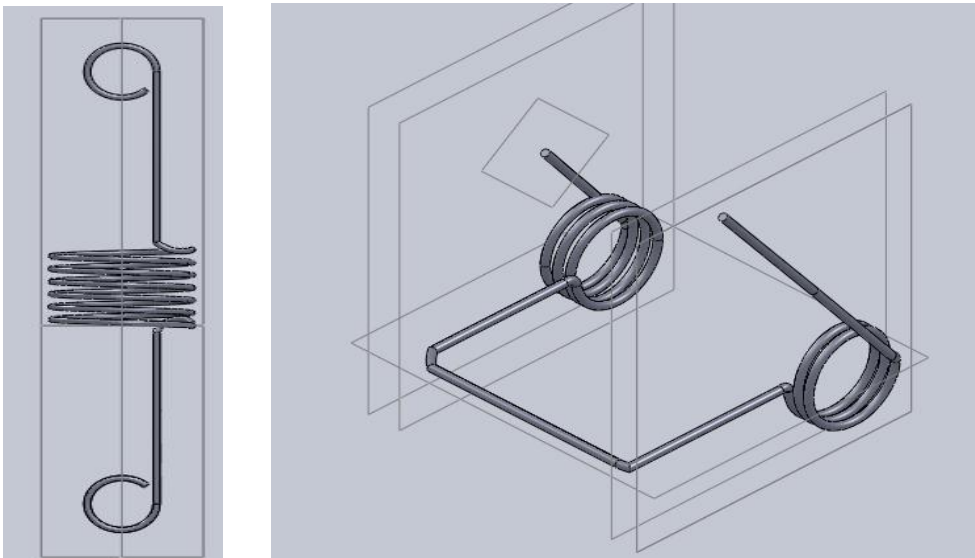


Fuente: Autores

#### 1.4.4 Resortes

Se van a utilizar resortes de dos clases, como lo muestra la figura 11, un resorte doble de torsión y un resorte de extensión. La función del resorte de extensiones mantener el brazo lo mas cercano a la tubería y la función del resorte de torsión es de mantener la barra de sensores paralela con la tubería. El diseño de estos resortes lo veremos en el capítulo 4.

**FIGURA 11 RESORTE DE EXTENSIÓN Y DOBLE DE TORSIÓN**



Fuente: Autores

#### 1.4.5 Materiales de construcción.

Para la construcción del prototipo (barra de sensores, barra larga y base) se empleó Duraluminio (Alumold 500 ) de alta resistencia aleado al Zinc, gracias a su bajo peso, su excelente maquinabilidad y sus propiedades mecánicas, las propiedades técnicas del duraluminio se encontraran en el anexo C.

Las propiedades del poliuretano las encontraremos en el anexo D.

## 2. PIGGING

### 2.1 DEFINICIÓN GENERAL

“PIG” es el término más ampliamente difundido para referirse a cualquier dispositivo que se inserta en una tubería y viaja libremente a través de ella impulsado por el producto que fluye en la misma cumpliendo funciones de limpieza, separación de productos o diagnóstico del estado de físico de la tubería. El término se originó en Estados Unidos pero no hay una explicación satisfactoria de por qué se escogió aunque sea el más aceptado. De igual forma se conoce como “PIGGING” a la práctica de correr un PIG a través de una tubería. PIG traduce 'MARRANO' en español, y en Latinoamérica es común referirse a los PIG como 'marrano'. También existen otros nombres usados en español como 'TACOS', 'DIABLOS' o 'RASPADORES'.

### 2.2 HISTORIA

Aunque no hay registros que respalden cuando se uso por primera vez un PIG, se cree que fue alrededor de 1870[1], pocos años después de que se implementaran las tuberías para el transporte de hidrocarburos. Los datos de cómo fue ideado, construido o que materiales fueron usados para este PIG se desconocen pero la teoría más aceptada es que eran fardos de heno amarrados con correas de cuero y alambre.

La siguiente etapa en el desarrollo de los PIG es el PIG de espuma o POLLY PIG. El primer POLLY PIG reconocido y con patente está registrado en 1954 en Wheaton Estados Unidos y fue usado en la industria de los lácteos cumpliendo funciones de limpieza [2]. Era un cilindro de espuma con una lámina de goma en uno de sus extremos que proveía el sello necesario para el desplazamiento y

limpieza en la tubería. Aunque funcionaba bien para tuberías cortas y con baja suciedad, tenía tendencia a dañarse y no fue ampliamente usado en la industria. Partiendo de estos primeros y primitivos PIG's se desarrollaron nuevos diseños y aplicaciones y hoy en día el PIGGING es una práctica común en el sector hidrocarburos.

### **2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS PIG'S SEGÚN LA PIPELINE PRODUCTS AND SERVICES ASSOCIATION (PPSA).**

La PPSA es una asociación de comercio internacional al servicio de la industria del PIGGING. Fue fundada en 1990 por Jim Cordell y ahora cuenta con más de 100 miembros en más de 20 países, representando a la industria de limpieza con PIG's en todo el mundo.

La Asociación está totalmente financiada por sus miembros a través de sus cuotas de suscripción anuales. Sus objetivos son: "Promover el conocimiento del PIGGING y de sus productos y servicios, proporcionando un canal de comunicación entre los propios miembros, y con los usuarios y otras partes interesadas".

Según la PPSA hay tres razones fundamentales para usar un PIG:

- Para separar productos que fluyen al mismo tiempo en una tubería.
- Para limpieza.
- Para realizar una inspección.

Los PIG'S que cumplen una función específica o que pueden cumplir varias en una sola corrida. Según la PPSA estos pueden dividirse en 3 categorías principales:

- PIG's Utilitarios que realizan funciones de limpieza, separación de productos o drenaje.

- In Line Inspection Tools (ILI) que proveen información del estado de la tubería.
- PIG's de gel que se utilizan en conjunto con los Utilitarios para mejorar las condiciones de las tareas de limpieza, separación o drenaje.

### 2.3.1 PIG's Utilitarios

Los PIG's utilitarios tienen varias formas y pueden ser construidos en varios materiales. Se pueden subdividir en varias categorías dependiendo de su forma, materiales con que están contruidos y las funciones que desempeñan. Cada empresa tiene sus propios diseños lo que hace más difícil la clasificación de los productos disponibles en el mercado, pero se puede hablar de tres clases de PIG's utilitarios de acuerdo a la función que desempeñan.

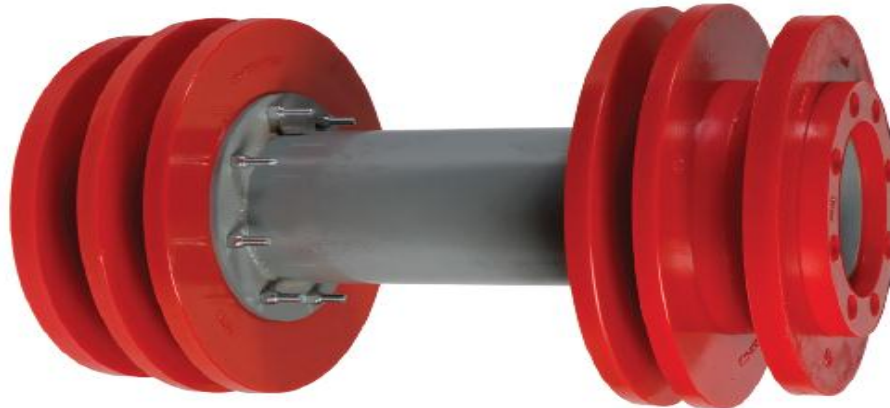
PIG's de separación o drenaje: Pueden ser bastantes sencillos como las esferas y los cilindros de espuma de la figura 11 o pueden ser como el de la figura 12, el cual presenta el diseño mas convencional del mercado con un cuerpo metálico con copas de poliuretano que forman en sello con la tubería y generan el diferencial de presión que impulsa al PIG.

**FIGURA 12. PIG'S DE SEPARACIÓN O DRENAJE**



Fuente: T.D WILLIAMSON

**FIGURA 13. PIG DE DISCOS DE POLIURETANO.**



■ **BiDirectionAll Pig**

Fuente:T.D. Williamson

PIG's de Limpieza: Podrían definirse como PIG's de separación y drenaje con elementos adicionales que les permiten remover los residuos de las paredes y transportarlos hasta su salida de la tubería. Estos accesorios van desde cepillos de acero hasta imanes permanentes. En la figura 14 se observan tres PIG's de limpieza con cepillos de acero.

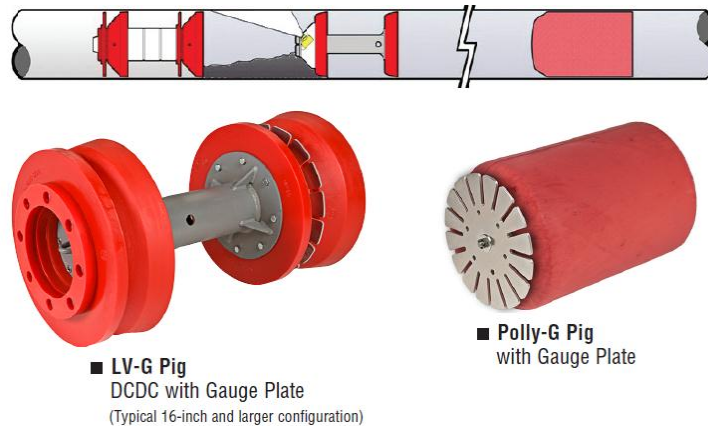
**FIGURA 14. PIGS DE LIMPIEZA CON CEPILLOS DE ACERO.**



Fuente:T.D. Williamson

PIG's utilitarios especiales: como su nombre lo indica cumplen funciones especiales. Dos ejemplos de estos son los PIG's con placas flexibles para detección de obstrucciones y el PIG inyector de recubrimiento anticorrosión.

### FIGURA 15 PIG'S ESPECIALES



Fuente:T.D. Williamson

### 2.3.2 ILI's

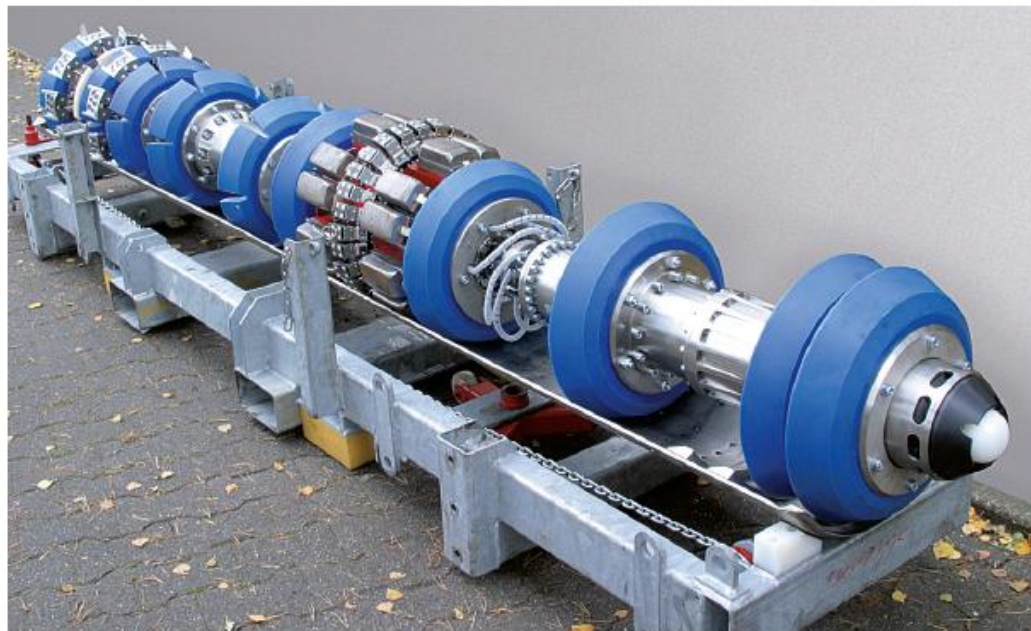
Las ILI's son PIG's con elementos electrónicos (o electromecánicos) que se utilizan para recolectar datos del estado de la línea de transporte. Las técnicas específicas que usan así como los sensores y demás elementos que las componen son desarrollo interno de las empresas y no se encuentra información específica acerca de este tipo de herramientas. De acuerdo a los datos que recolectan podríamos clasificarlas en tres grupos principales que son:

Geométricas: también llamadas KALIPERS, dan información acerca de las abolladuras y cambio de la geometría base (ovalidad) que se pueden presentar en la línea.

Detección de pérdida de espesor: existen varias técnicas para la determinación de la pérdida de espesor que pueden implementarse en las ILI's de este tipo, pero el objetivo de todas es detectar y monitorear la corrosión en líneas de transporte.

Inerciales: por lo general se usan en conjunto con otro tipo de ILI. Los datos que recolectan sirven para reconstruir la altimetría y planimetría de la línea así como referenciar los datos recolectados por las otras ILI interconectadas.

**FIGURA 16. ILI PARA DETECCIÓN DE PÉRDIDA DE ESPESOR POR TÉCNICA MIXTA MFL-UT (MAGNETIC-FLUX-LEAKAGE Y ULTRA SONIDO).**

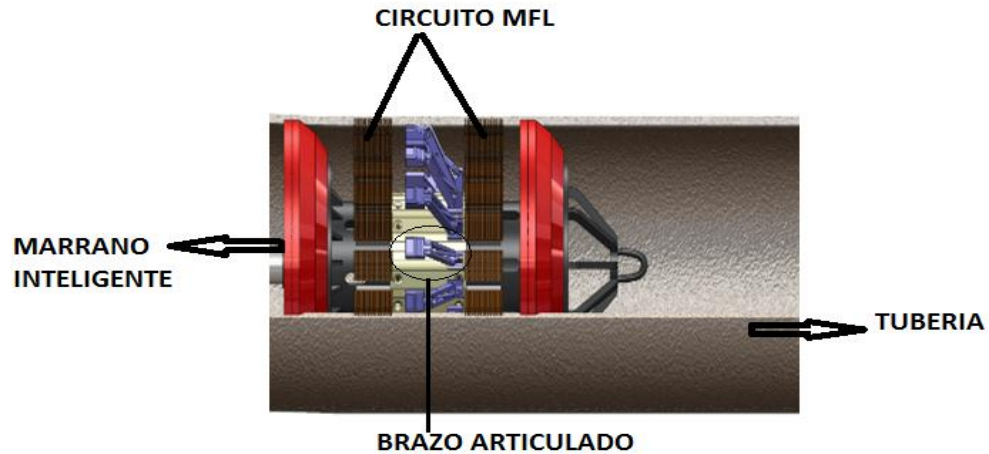


**RoCorr-MFL/UT 16"**

Fuente: **Rosen Inspection Technologies**

## 2.4 HERRAMIENTAS ILI PARA DETECCIÓN DE VARIACIONES EN EL ESPESOR DE TUBERÍAS DE HIDROCARBUROS POR TÉCNICA MFL.

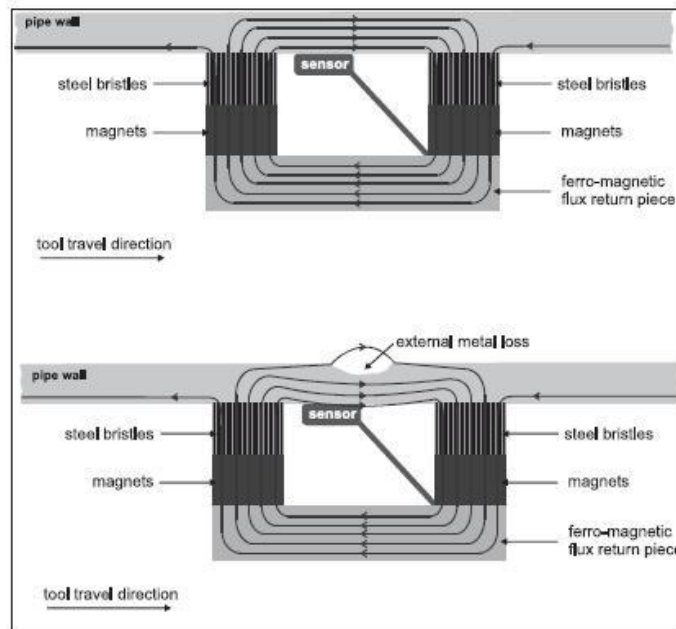
FIGURA 17 MARRANO INTELIGENTE ITION-E



Fuente: **CIC**.

Cuando se habla de herramientas ILI para detección de espesor por técnica MFL nos volvemos a encontrar con gran número de diseños y disposiciones de la herramienta. Pero el funcionamiento es esencialmente el mismo. Para el caso de ITION-E (Figura 17) se estaría hablando de una herramienta MFL longitudinal con circuito magnético con cepillos, como se ve en la representación esquemática de la figura 18. Como se observa en la parte superior de la figura 18 el circuito está compuesto por un par de magnetos permanentes de gran potencia, unos cepillos de acero y una estructura de apoyo de características ferro magnéticas que se conoce como yugo. Al estar en contacto los cepillos con la tubería el circuito se cierra y el flujo magnético satura la pared de la tubería.

**FIGURA 18. CIRCUITO MAGNÉTICO CON CEPILLOS**



Fuente: magnetic\_flux\_leakage\_technology

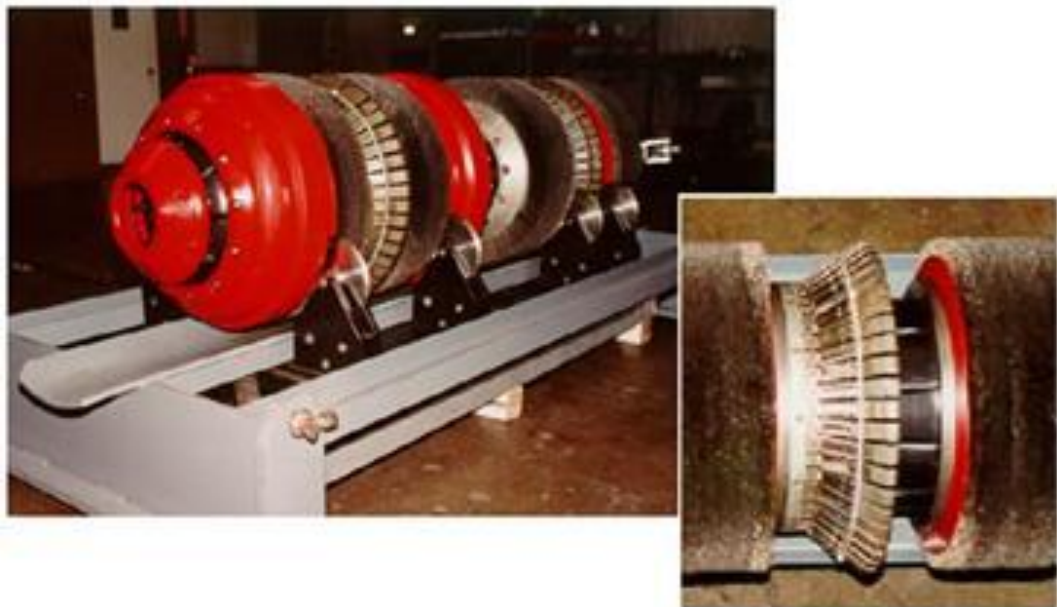
Esta saturación magnética debe garantizarse para cada tubería que se vaya a analizar ya que es fundamental que la tubería este muy cercana a su saturación magnética para que las líneas de campo magnético se fuguen de la pared de la tubería en presencia de una anomalía como se ve en la parte inferior de la grafica18. La técnica MFL se basa en medir la intensidad del campo fugado de la tubería para determinar el valor del espesor en ese punto ya que este es inversamente proporcional a la magnitud del campo fugado. Para realizar estas mediciones se pueden usar diferentes sensores pero los más difundidos son los sensores de efecto Hall.

Los sensores de efecto Hall son componentes electrónicos por los cuales se hace fluir una corriente. Cuando se presenta un campo magnético perpendicular a la corriente que fluye por el sensor este genera un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y la corriente. Por lo tanto al leer este

voltaje se puede determinar la magnitud del campo magnético si se conoce de antemano la corriente.

Si se refiere de nuevo a la figura 18 se observa que estos sensores se encuentran ubicados entre los dos magnetos. La posición exacta de los sensores depende de diversos factores de operación de la herramienta en general y del circuito magnético en específico como son la velocidad de desplazamiento y la distancia entre los magnetos. Para efectos prácticos se puede considerar que los sensores se encuentran centrados con respecto a los magnetos. También se observa que están en contacto directo con la tubería. Esto sería ideal ya que se detectarían fugas pequeñas lo que daría una mejor resolución a la herramienta. Pero esto no es posible ya que la herramienta se encuentra en movimiento y la fricción dañaría los sensores. La distancia que se debe dejar entre los sensores y la tubería depende del diseño y de la resolución esperada.

**FIGURA 19. PIG MFL**



Fuente: PIPEWAY INC

## **2.5 REQUERIMIENTOS PARA EL LANZAMIENTO DE ILI'S.**

Existen diversos factores que pueden causar daños o atascamientos de las ILI's como son la presencia de abolladuras y suciedad. Las ILI's son equipos bastante costosos por lo que se debe evitar daños a las mismas, pero la razón fundamental para evitar el atascamiento de una ILI es que estas herramientas tienen equipos electrónicos que funcionan con baterías y permanecer atascados o sufrir daños durante la corrida pone en riesgo la integridad de la línea. Para prevenir el atascamiento o daño de estas herramientas se debe seguir un protocolo de limpieza e inspección previa al lanzamiento de la ILI para garantizar, en la medida de lo posible, que la herramienta puede cumplir su función sin poner en riesgo la integridad propia ni la de la línea. Para la mayoría de los fabricantes los defectos internos que se puedan encontrar en la línea no deben ser mayores al 10% del diámetro de la tubería. Esta tolerancia del 10% también será utilizada para el protocolo de lanzamiento de la herramienta ITION-E de la CIC.

### **3. SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO A LOS IMPACTOS USANDO SIMULINK.**

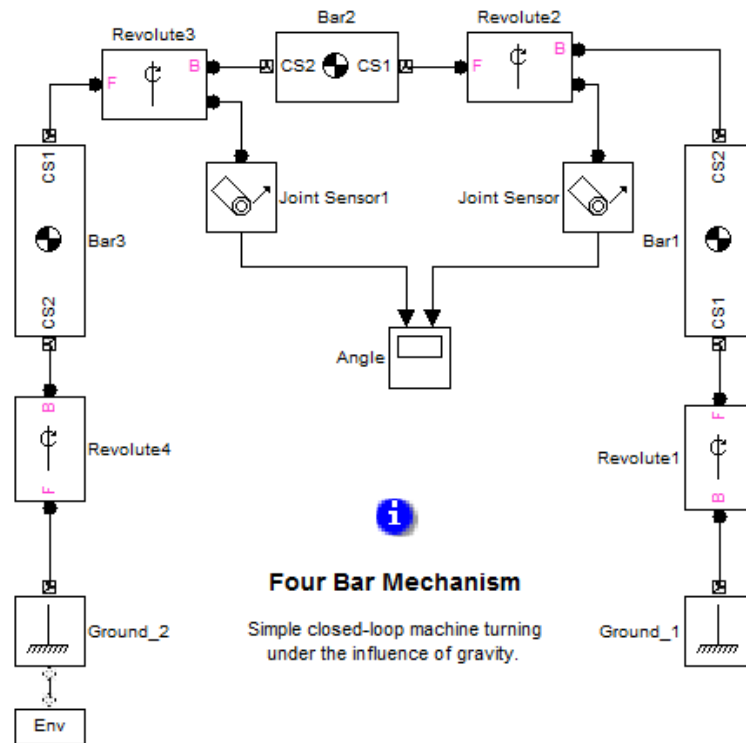
Simulink es un entorno de programación gráfica que hace parte de MatLab. En Simulink se pueden diseñar, simular, implementar y probar diferentes tipos de sistemas variantes en el tiempo. Esto se logra por medio de las diversas bibliotecas de bloques que existen en Simulink y que pueden ser interconectadas entre ellas. Más específicamente, la biblioteca SimMechanics nos permite simular los movimientos de mecanismos compuestos por varios cuerpos rígidos usando dinámica Newtoniana clásica, fuerzas y torques.

Lo que se busca con esta simulación es determinar cuánto le toma al mecanismo estabilizarse de nuevo a su posición de trabajo después de impactar con un defecto presente en la tubería. Se evaluarán diferentes constantes de los resortes del sistema de recuperación del brazo articulado, así como dos tamaños posibles de los defectos que se pueden encontrar en la tubería. Esto con el fin de encontrar las constantes de los resortes que permitan una estabilización rápida del sistema tal que los valores obtenidos por los sensores de efecto hall sean fiables durante la mayor parte de la operación de ITION-E.

#### **3.1 DINÁMICA DEL CUERPO RÍGIDO EN SIMMECHANICS**

La mayor ventaja de SimMechanics radica en la facilidad de implementar las cadenas cinemáticas entre las partes que componen un mecanismo como la interacción entre bloques de cuerpos y bloques de uniones. Para explicar esto se va a usar un modelo que viene incluido como demo en SimMechanics, es el modelo de un mecanismo de cuatro barras que se mueve debido a la gravedad.

**FIGURA 20. MECANISMO DE CUATRO BARRAS BAJO LA INFLUENCIA DE LA GRAVEDAD**



Fuente: The MathWorks Inc.

Todo modelo en SimMechanics debe tener un al menos un bloque ENV y un bloque GROUND. El bloque ENV contiene todos los parámetros del entorno de simulación y como la mayoría de los bloques en Simulink sus parámetros pueden ser modificados para cumplir con los requerimientos del programador. Los bloques GROUND sirven como puntos fijos de referencia para el mecanismo respecto al entorno. En el caso del modelo de la figura 20 tenemos dos bloques GROUND que representan los puntos donde las barras 1 y 3 se unen con la base (la cual sería la barra 4 del mecanismo aunque no esta representada).

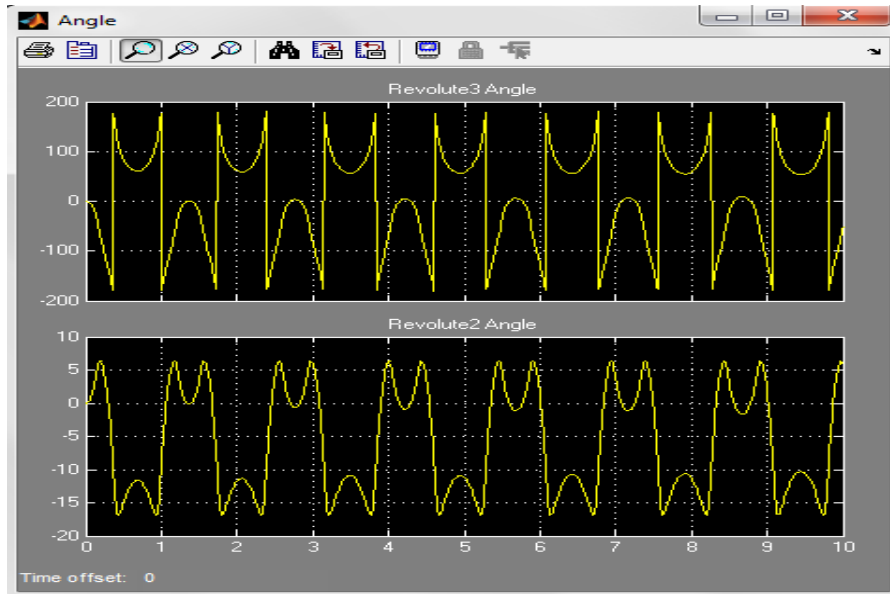
Los bloques BODY se usan para representar las diferentes partes del mecanismo y se consideran rígidos. Es indispensable agregar parámetros de masa, centro de masa e inercia respecto al centro de masa para cada bloque de acuerdo a su

orientación inicial. Las unidades de los parámetros son escogidas por el programador. Se pueden agregar tantos puntos como sean necesarios para definir la geometría, relacionar un cuerpo con otro o sensar y actuar fuerzas sobre los cuerpos.

Los cuerpos se relacionan entre si por medio de bloques JOINT los cuales brindan las restricciones cinemáticas del mecanismo. En el modelo de la figura 20 todos los JOINT son de tipo articulación respecto a un eje. Es decir que los puntos de los dos cuerpos unidos por este tipo de articulación puede rotar uno respecto al otro en el eje seleccionado pero no pueden rotar en ningún otro eje ni tener un desplazamiento relativo entre ellos.

Con esto queda definido en mecanismo a simular y sus parámetros de simulación. Cuando se inicia la simulación la gravedad hace que las barras se muevan y la interacción entre ellas genera fuerzas en las uniones (JOINT) tal que se cumplan las restricciones cinemáticas impuestas al modelo. Todos los parámetros dinámicos como la posición, velocidad, aceleración y fuerzas de reacción pueden ser sensados y representados gráficamente o guardados en el entorno de MatLab para su posterior análisis. Para el mecanismo de cuatro barras representado en la figura 20 se tienen bloques de censado en dos de sus articulaciones para leer el ángulo entre las barras durante la simulación y representarlas en la gráfica que se ve en la figura 21.

**FIGURA 21 ÁNGULOS ENTRE LAS BARRAS 1-2 2-3**

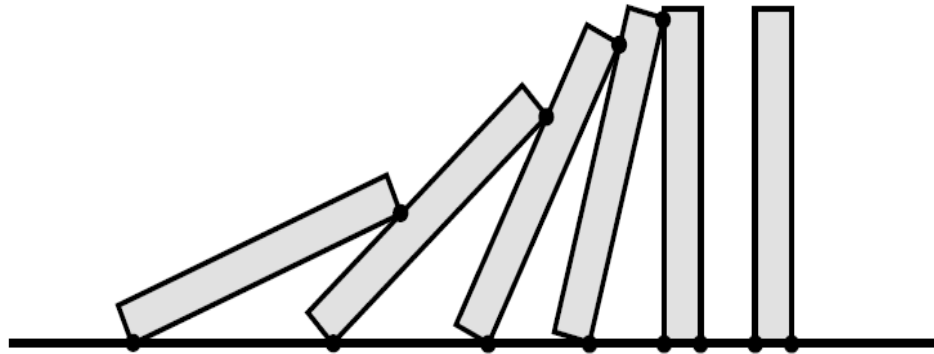


Fuente: The MathWorks Inc.

### **3.2 FUERZAS DE CONTACTO NO-PENETRANTES**

Se pueden definir las fuerzas de contacto no-penetrantes como la consecuencia de interacciones temporales entre dos cuerpos que no están unidos permanentemente pero se encuentran con el otro durante el curso de sus movimientos particulares [3]. Este contacto temporal general una restricción no-penetrante entre los dos cuerpos que se puede considerar fundamentalmente como una desigualdad que involucra la aceleración de los cuerpos tal que tienda a separarlos. Un ejemplo de esto es la fila de fichas de dominó de la figura 22.

**FIGURA 22 FUERZAS DE CONTACTO NO-PENETRANTES**



Fuente: *Impulse-based Dynamic Simulation of Rigid Body Systems*, Brian Mirtich, 1996

Para el sistema de dominó no existen restricciones permanentes al movimiento entre los cuerpos, pero se generan restricciones temporales no-penetrantes en los puntos de contacto entre los dominó. Por estas razones la simulación de fuerzas no-penetrantes no puede hacerse usando los principios de la dinámica del cuerpo rígido [4]. Uno de los métodos de simulación más usado por su fácil implementación es el PENALTY FORCE METHOD.

### **3.3 PENALTY FORCE METHOD**

El Penalty Force Method es una metodología de simulación computacional donde las fuerzas de contacto se simulan 'insertando' resortes virtuales entre los dos cuerpos en contacto. La técnica original proponía usar constantes de resortes diferentes cuando los cuerpos se estaban acercando o alejando tal que la energía del resorte fuera menor durante la separación y así simular la pérdida de energía durante una colisión [5]. El uso de constantes de resorte diferentes significaba que debía detectarse no solo el contacto sino también el cambio en la dirección del desplazamiento en una colisión. Esto se traducía en la necesidad de complejos algoritmos para la detección de colisiones y el uso de  $\Delta t$  muy pequeños durante la simulación. Esto se solucionó planteando un sistema de resorte-amortiguador

(también conocido como *Harmonic Penalty* [6]) tal que ajustando la constante de amortiguación se pudiera simular la pérdida de energía.

### 3.3.1 Función de penalización en problemas de optimización matemática

El Penalty Force Method (PFM) para la simulación de contactos entre cuerpos rígidos se basa en un método numérico para la solución de problemas de optimización matemática con restricciones [7]. En ambos casos, el método convierte un problema con restricciones en un problema no-restrictivo donde se penaliza la desviación de la restricción original, es decir, se plantea un problema tal que se trate de satisfacer la restricción, pero esta no es forzada a cumplirse.

En optimización matemática, un problema típico de igualdad-restrictiva [8] sería:

$$\text{minimizar } f_{(z)} \text{ tal que } g_{(z)} = 0 \quad [\text{ec1}]$$

Esto se puede convertir en un problema no-restrictivo con penalización si se plantea de la siguiente forma:

$$\text{minimizar } f_{(z)} + K * g_{(z)}^2 \text{ cuando } K \rightarrow \infty \quad [\text{ec2}]$$

El término  $K * g_{(z)}^2$  es llamado *función de penalización*. La idea es que mientras K se hace más grande, las posibles soluciones de z que minimizan la ecuación 2 deben hacer que  $g_{(z)}^2$  sea más pequeño. En el límite cuando K tiende a infinito, la solución de la ecuación 2 debe satisfacer que  $g_{(z)}^2 = 0$ , mientras minimiza  $f_{(z)}$ . El método de solución para encontrar z que satisfaga la restricción es resolver la ecuación para valores creciente de K hasta que la serie de soluciones converge (dentro de la tolerancia numérica) a un límite.

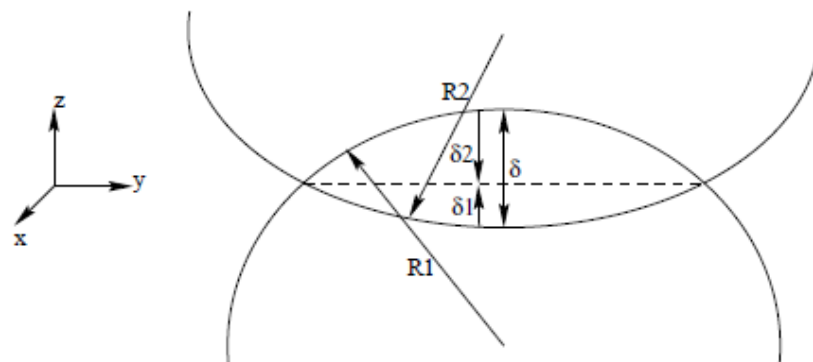
### 3.3.2 Simulación de colisiones entre cuerpos rígidos implementando el PFM basado en un sistema de resorte-amortiguador.

El análisis de la colisión entre el mecanismo brazo articulado y los defectos de la tubería se basaran en la *teoría Hertziana del contacto elástico no adhesivo* y las ecuaciones para el impacto excéntrico entre cuerpos rígidos.

La teoría de Heinrich Rudolf Hertz se refiere a dos cuerpos elásticos que entran en contacto en un punto. Hertz hizo cuatro supuestos básicos en la formulación de su teoría:

- Pequeñas deformaciones de la superficie (desplazamientos dentro del límite de elasticidad).
- Las dos superficies de contacto son continuas y no se ajustan.
- La región de contacto es mucho menor que los radio de curvatura local de las superficies.
- No existe fricción entre las superficies.

**FIGURA 23. ESQUEMÁTICO DE LA SITUACIÓN DESCRITA POR LA TEORÍA HERTZIANA DEL CONTACTO**

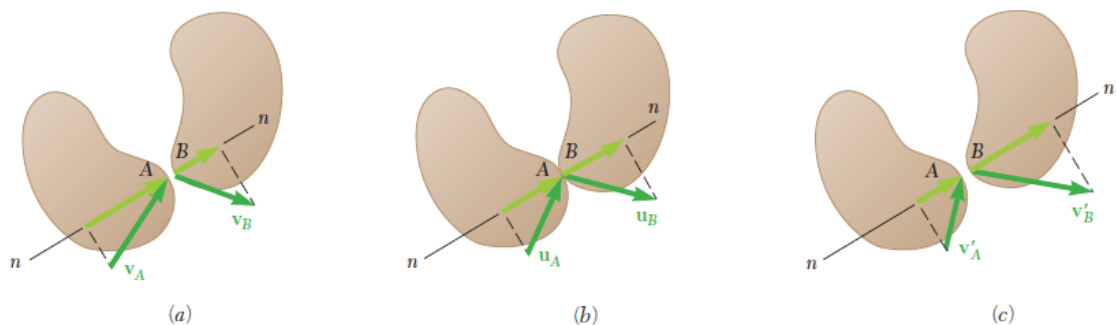


Fuente: Contact Mechanics using Green's Functions for Interactive Simulated Environments, C Ullrich, University of Waterloo.

Las fuerzas de contacto que se desarrollan según la teoría Hertziana dependen de la energía de deformación de los materiales en contacto así como de la geometría de las superficies después de su  $\delta_i$  de deformación. Aunque la teoría Hertziana tiene más de 100 años de haber sido desarrollada, es un buen punto de partida para entender la mecánica del contacto entre los cuerpos. En un análisis de cuerpo rígido no pueden considerarse deformación, por lo que la teoría Hertziana no es aplicable de forma directa. Pero para nuestro caso, el  $\delta$  de deformación se considera análogo a la penetración permitida por el PFM para dos cuerpos rígidos que experimentan un choque elástico.

Un choque elástico es aquel en el que no existe intercambio de masa entre los cuerpos ni tampoco se sufren deformaciones permanentes. Considerando el caso de dos cuerpos como se ve en la figura 24, cuyas en los puntos de contacto A y B antes del impacto son  $V_a$  y  $V_b$ .

**FIGURA 24 IMPACTO EXCÉNTRICO DE DOS CUERPOS RÍGIDOS**



Fuente: VECTOR MECHANICS FOR ENGINEERS: STATICS & DYNAMICS, NINTH EDITION, Beer-Johnston, mc graw hill

La línea marcada con  $n$  indica la dirección normal del impacto y es perpendicular a la línea tangente a las dos superficies en el punto de contacto. En (a) se observa los cuerpos antes del choque con sus velocidades respectivas o la componente en dirección  $n$  de sus velocidades. Cuando los cuerpos entran en contacto de

'deforman' hasta que la su velocidad relativa en dirección  $n$  es cero como se observa en (b). Después de esto viene el periodo de restitución al final del cual los puntos A y B tendrán velocidades denotadas por  $V'_a$  y  $V'_b$ .

Si se asume que no existe fricción entre los cuerpos, las fuerzas que se ejercen el uno al otro tienden a separarlos y actúan en la dirección normal del impacto. Si se recuerda que la fórmula para el impulso es:

$$Imp_{1 \rightarrow 2} = \int_1^2 F dt \quad [Ecu3]$$

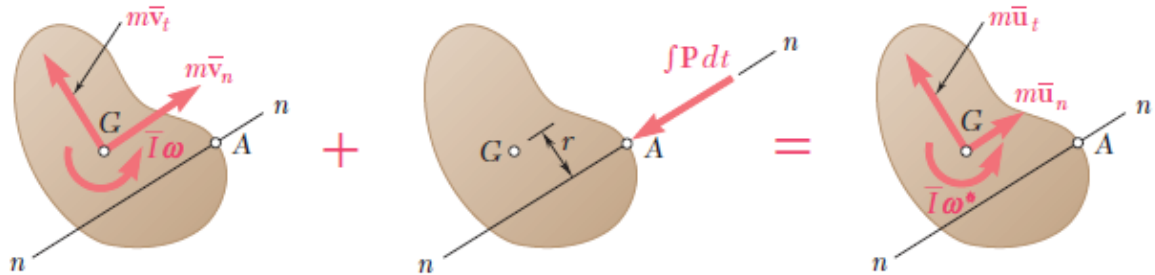
Y si se denota la magnitud del impulso ejercido por las fuerzas durante la etapa de deformación como  $\int P dt$  y el impulso durante la fase de restitución como  $\int R dt$  podemos definir el coeficiente de restitución como:

$$e = \frac{\int R dt}{\int P dt} \quad [Ecu4]$$

El coeficiente de restitución  $e$  puede tener valores de 0 a 1. Cuando se considera un choque perfectamente elástico sin pérdida de energía se dice que  $e=1$  ya que el impulso ejercido durante la etapa de deformación es igual al impulso ejercido durante la etapa de restitución. El coeficiente de restitución depende de los materiales de los cuerpos que están involucrados en el choque.

Ahora si se supone que los cuerpos involucrados en el choque tienen movimiento libre en el plano se asume un punto cualquiera como el centro de masa del cuerpo A, se tendría que los tres diagramas de momentum e impulso del cuerpo durante la etapa de deformación serían los que se ven en la figura 25.

**FIGURA 25 : DIAGRAMA DE MOMENTUN E IMPULSOS DEL CUERPO A DURANTE UNA LA ETAPA DE DEFORMACIÓN.**



Fuente: VECTOR MECHANICS FOR ENGINEERS: STATICS & DYNAMICS, NINTH EDITION, Beer-Johnston, mc graw hill

Si aplicamos el teorema del impulso y la cantidad de movimiento respecto a la dirección normal del impacto  $n$  obtenemos:

$$m\bar{V}_n - \int P dt = m\bar{U}_n \quad [\text{Ecu5}]$$

Si se realiza lo mismo pero respecto al punto G se tendría:

$$\bar{I}\omega - r \int P dt = \bar{I}\omega^* \quad [\text{Ecu6}]$$

Donde  $r$  representa la línea perpendicular entre G y la línea que representa la dirección normal del impacto  $n$ . Si se realiza lo mismo para la etapa de restitución se tendría:

$$m\bar{U}_n - \int R dt = m\bar{V}'_n \quad [\text{Ecu7}]$$

$$\bar{I}\omega^* - r \int R dt = \bar{I}\omega' \quad [\text{Ecu8}]$$

Donde  $\bar{V}'_n$  y  $\omega'$  representan la velocidad del centro de masa y la velocidad angular del cuerpo después del impacto. Si se combinan la Ecu5 con la Ecu7 y la Ecu6 con la Ecu8 y se sustituye la Ecu4 en las dos ecuaciones que resultaron de las combinaciones descritas anteriormente se tiene:

$$e = \frac{\bar{U}_n - \bar{V}'_n}{\bar{V}_n - \bar{U}_n} \quad \text{Y} \quad e = \frac{\omega^* - \omega'}{\omega - \omega^*} \quad [\text{Ecu8}]$$

Si se multiplica el denominador y el numerador de la segunda expresión por  $r$  y sabiendo que  $e$  es igual para ambas ecuaciones podemos asegurar que la si sumamos los denominadores y numeradores de las dos expresiones se sigue obteniendo el mismo cociente, es decir que la fracción sigue siendo igual a  $e$ .

$$e = \frac{\bar{U}_n + r\omega^* - (\bar{V}'_n + r\omega')}{\bar{V}_n + r\omega - (\bar{U}_n + r\omega^*)} \quad [\text{Ecu9}]$$

Si se observa que  $\bar{V}_n + r\omega$  representa la componente  $(V_A)_n$  que es la componente de la  $V_A$  en la dirección normal  $n$ . de igual manera se puede deducir que  $\bar{U}_n + r\omega^*$  y  $\bar{V}'_n + r\omega'$  son  $(U_A)_n$  y  $(V'_A)_n$  por lo que Ecu9 queda:

$$e = \frac{(U_A)_n - (V'_A)_n}{(V_A)_n - (U_A)_n} \quad [\text{Ecu10}]$$

Si se hace el análisis anterior para el cuerpo B se tendría:

$$e = \frac{(V'_B)_n - (U_B)_n}{(U_B)_n - (V_B)_n} \quad [\text{Ecu11}]$$

Y como  $e$  es igual para ambos cuerpos y  $(U_A)_n = (U_B)_n$  la relación entre las velocidades en dirección normal  $n$  antes y después del impacto queda:

$$(V'_B)_n - (V'_A)_n = e[(V_A)_n - (V_B)_n] \quad [\text{Ecu12}]$$

Pero las ecuaciones para impactos excéntricos descritas anteriormente sirven para calcular los estados cinemáticos antes y después del impacto, por lo que la ventana de tiempo entre las etapas de deformación y restitución se ignora, esto no

es aceptable en una simulación en tiempo real. Para obtener una simulación en tiempo real sin discontinuidad es necesario simular los fenómenos físicos que ocurren durante las etapas de deformación y restitución, pero bajo el esquema Hertziano esto solo es posible para la colisión entre dos cuerpos esféricos [9]. Es aquí donde entra PFM basado en un sistema resorte-amortiguador.

Si se utiliza el esquemático del modelo Hertziano (Figura 23) pero en lugar de 'deformar' los cuerpos en contacto se hace que estos se traslapen, se tendría que  $\delta$  sería la interpenetración entre los cuerpos. Así que el sistema resorte-amortiguador debe mantener esta penetración en un rango razonable. La fuerza ejercida por un sistema resorte-amortiguador sería la descrita por la ecuación:

$$F = K\delta + b\dot{\delta} \quad [\text{Ecu13}]$$

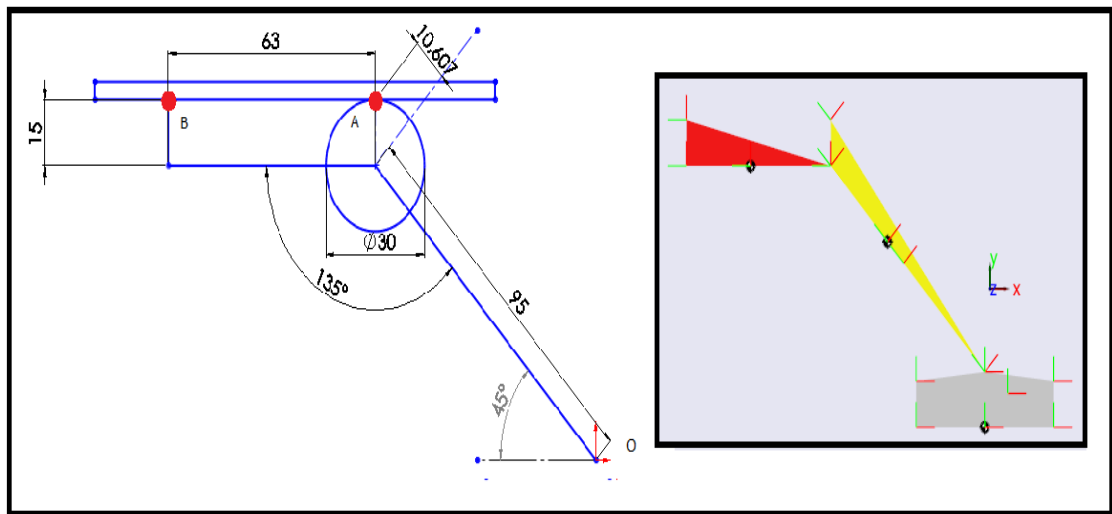
Como existe un cambio de dirección durante un impacto, la ecuación anterior dará una fuerza mayor en un sentido que en el otro. Los valores de las constantes  $k$  y  $b$  deben ajustarse tal que se cumpla la relación de velocidades de la ecuación 12. Para ajustar estas constantes se debe primero simular el modelo sin amortiguación ( $b=0$ ) para diferentes valores de  $k$  hasta que se obtenga una penetración pequeña. Después se ajustará el valor de  $b$  para que se cumpla la ecuación 12. Hay que recordar que el PFM no es un modelo exacto, y que los valores de fuerza de la ecuación 13 no necesariamente corresponden a los que se desarrollan durante una colisión real. Por último, hay que implementar una restricción tal que el sistema resorte-amortiguador solo 'exista' cuando haya penetración entre los cuerpos. Esto se logra por medio de la condición:

$$f = \begin{cases} f(\delta, \dot{\delta}) & \text{si } \delta \geq 0 \\ f = 0 & \text{para cualquier otro caso} \end{cases} \quad [\text{Ecu14}]$$

### 3.4 MODELO DESARROLLADO EN SIMULINK PARA LA COLISIÓN ENTRE EL MECANISMO BRAZO ARTICULADO Y LA PARED DE LA TUBERÍA.

El objetivo de la simulación planteada es determinar el tiempo que le toma al mecanismo estabilizarse a su posición de trabajo después de impactar con un defecto presente en la tubería. En la figura 26 se observa un esquemático del brazo en su posición de trabajo y su representación en el simulador.

**FIGURA 26 ESQUEMÁTICO DEL BRAZO Y REPRESENTACIÓN EN SIMMECHANICS**

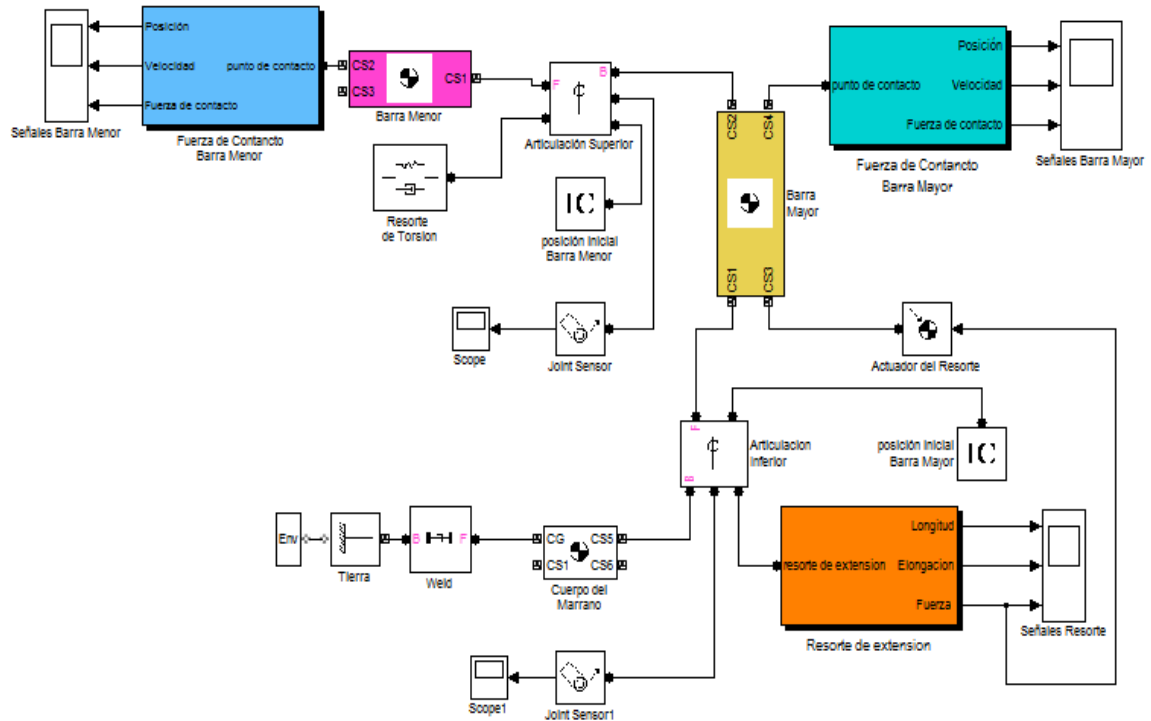


Fuente: Autores.

Las medidas se encuentran en milímetros. Los puntos A y B representan los puntos de contacto del mecanismo con la tubería. A es el punto de contacto de la barra mayor con la pared de la tubería. Se escoge B como punto de contacto entre la barra de sensores y la pared de la tubería, ya que es el punto más alejado del eje del resorte de torsión puede considerarse como crítico. Aunque en una situación real es la ILI la que se desplaza dentro de la tubería, en el banco de pruebas el mecanismo brazo articulado no se desplaza. Por esta razón en el simulador también se asumirá que el mecanismo no se desplaza. No se considera

fricción entre las partes y la gravedad actúa en dirección -Y. La ventana principal del modelo desarrollado en Simulink se observa en la figura 27.

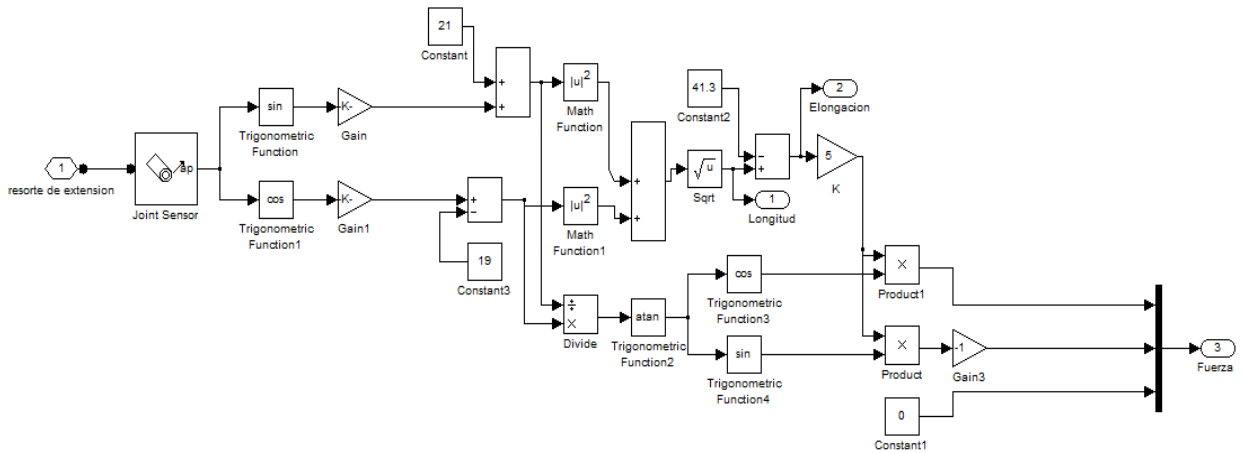
**FIGURA 27 VENTANA PRINCIPAL DEL MODELO EN SIMULINK**



Fuente: Autores

Los bloques que representan las Barra Mayor y la Barra de sensores se programan de acuerdo al esquemático de la figura 26 y las propiedades calculadas para el modelo en Solidworks. El resorte de torsión es simulado con un bloque incluido en la librería SimMechanics que se llama '*Joint Spring and Damper*'. La librería también incluye un bloque que simula resortes longitudinales, pero están limitados a trabajar en un solo eje coordinado. Por esta razón se desarrollo un modelo (figura 28) del resorte de extensión que actúa sobre la Barra Mayor y se agrupo en el bloque que se llama 'Resorte de extensión' en el modelo propuesto.

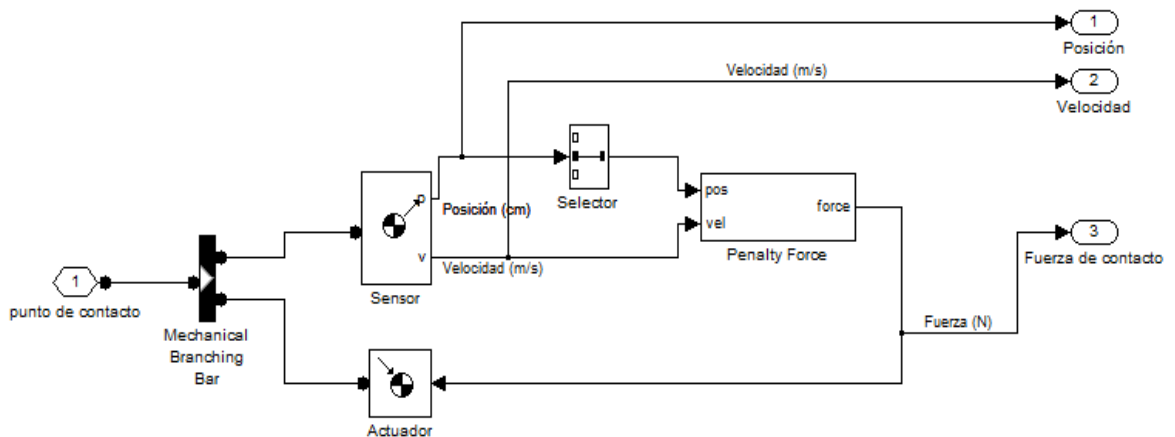
**FIGURA 28. DIAGRAMA CONTENIDO EN EL BLOQUE 'RESORTE DE EXTENSIÓN'**



Fuente: Autores

Las fuerzas de impacto se simularon bajo el Penalty Force Method descrito en el capítulo 3.3. Y están agrupadas en los bloques 'Fuerzo de Contacto Barra Mayor' y 'Fuerza de Contacto Barra de sensores'. Los modelos contenidos en los bloques anteriormente mencionados son iguales para los dos. Si se abre cualquiera de estos bloques se encontrará con la ventana del simulador que se ve en la figura 29.

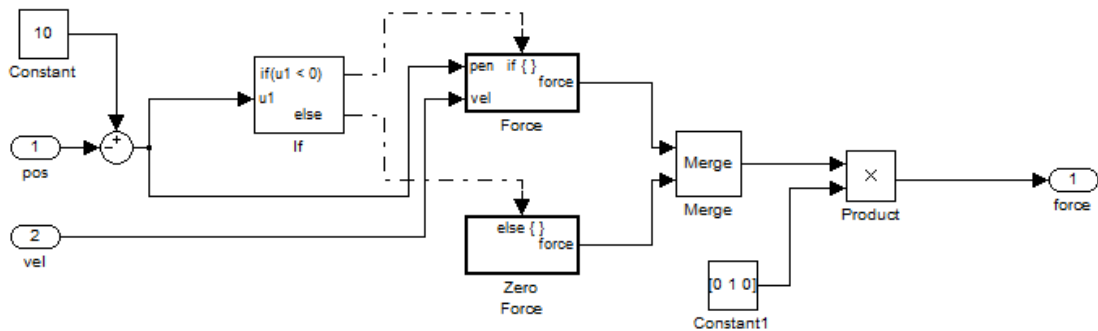
**FIGURA 29. DIAGRAMA CONTENIDO EN 'FUERZA DE CONTACTO BARRA MAYOR'**



Fuente: Autores

En este bloque se sensan la posición y velocidad del punto de contacto y se actúa la fuerza correspondiente. Para poder calcular la fuerza se ingresan la velocidad y la componente Y de la posición al siguiente bloque llamado 'Penalty Force'.

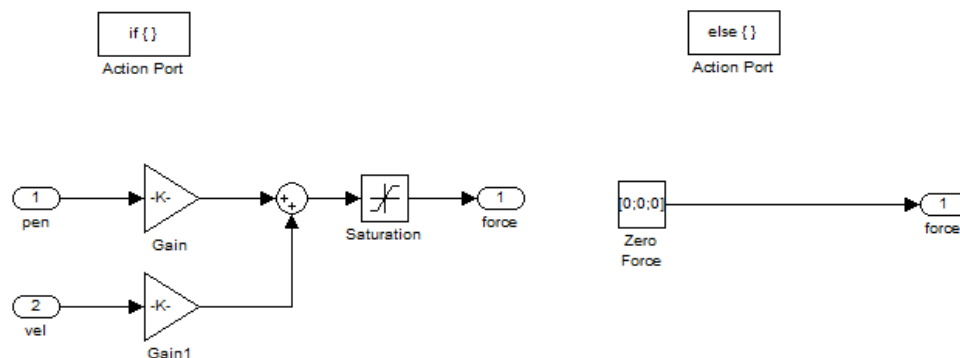
**FIGURA 30. DIAGRAMA CONTENIDO EN 'PENALTY FORCE'**



Fuente: Autores

En este bloque se calcula la penetración restando la posición Y sensada para el punto A a la altura en la que se presenta la colisión. Este resultado se compara con el condicional de la ecuación 14 y si es cierto se entra al bloque 'Force'. Si el condicional no se cumple se entra al bloque 'Zero Forcé'.

**FIGURA 31 DIAGRAMAS CONTENIDOS EN EL BLOQUE 'FORCÉ'(IZQUIERDA) Y EN EL BLOQUE 'ZERO FORCÉ'(DERECHA).**



Fuente: Autores

En el bloque 'Forcé' se encuentran los bloques que contienen las constantes  $K$  y  $b$  usadas para la simulación. El bloque 'Zero Forcé' devuelve un valor cero para la fuerza para asegurar que no se imprima ninguna fuerza cuando no existe penetración.

El modelo se diseñó para simular lo que sucede después del impacto con un defecto presente en la tubería. Es decir que  $t=0$  corresponde al final del periodo de restitución del impacto inicial. El modelo se diseñó de esta manera por que el PFM, aunque es bastante usado para simulaciones dinámicas, tiene dos grandes inconvenientes. Uno es que las constantes necesarias para que en la simulación la penetración sea pequeña y las velocidades cumplan la ecuación 12 hacen que el sistema resorte-amortiguador sea bastante rígido, por lo que cuando se tienen interacciones entre varios cuerpos, o en varias direcciones, el sistema puede entrar en inestabilidad y salirse de los rangos impuestos por las restricciones asociadas a los resortes virtuales. La otra tiene que ver con el  $\Delta t$  con el que avanza la simulación. El  $\Delta t$  debe ser suficientemente pequeño para que se puedan detectar todas las penetraciones, entonces cuando se tiene interacción entre varios cuerpos se tiene que hacer el  $\Delta t$  todavía mas pequeño para asegurar que se puede detectar todas las penetraciones. Y si a esto se le suma el tiempo que requiere el procesador para realizar los cálculos necesarios, la consecuencia sería una simulación bastante lenta [10]. Por estas razones se debe tratar de mantener los modelos bastante sencillos.

### **3.5 CÁLCULOS Y RESULTADOS USADOS DURANTE LA SIMULACIÓN**

Se van a simular dos situaciones puntuales. La primera es el impacto con un cordón de soldadura estándar que se va a considerar tiene un radio constante de 5mm. La segunda situación es el impacto con el defecto de mayor tamaño que podría encontrarse, que según lo descrito en el capítulo 2.5, es del 10% del

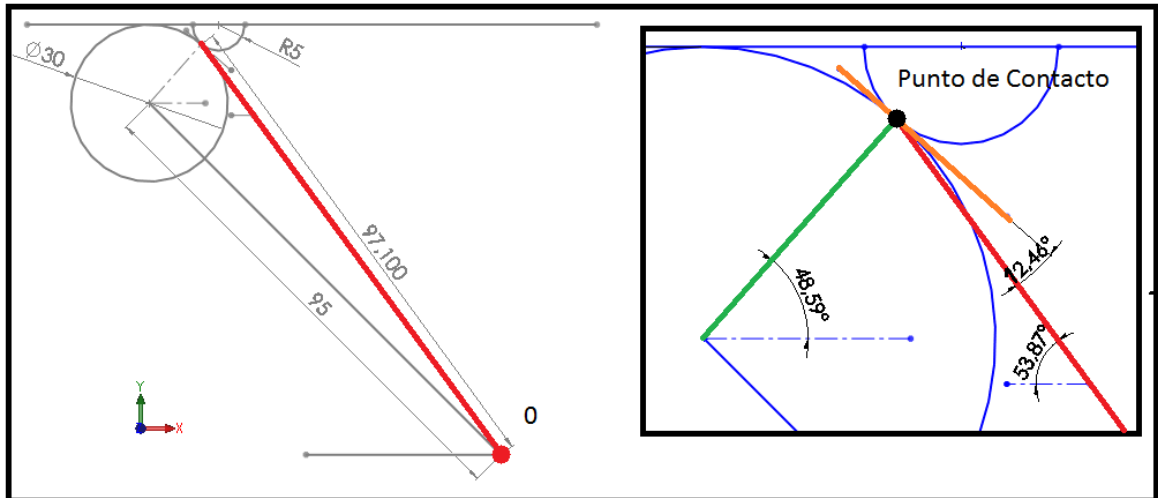
diámetro nominal de la tubería, es decir que para una tubería Casing de 20" el mayor defecto es de aproximadamente 25mm.

### 3.5.1 Impacto con un cordón de soldadura de 5mm

La razón por la cual se escogió este escenario de simulación es que las soldaduras son el 'defecto' más común con el que se va a encontrar el mecanismo brazo articulado. Así que es importante conocer cuanto tiempo transcurre desde el impacto hasta la estabilización ya que en este lapso de tiempo los sensores no van a estar ubicados de manera adecuada y sus lecturas no serán idóneas.

Es necesario ingresar los valores iniciales a la simulación. Para esto se supondrá que el defecto impacta únicamente con la Barra Mayor como se ve en la figura 32.

**FIGURA 32. IMPACTO CON UN CORDÓN DE SOLDADURA DE 5MM**



Fuente: Autores

La velocidad normal ITION-E es de 3m/s. luego la  $V_0$  en el punto de contacto es de 3m/s en dirección X. Ahora la componente en dirección normal (línea naranja en la figura 32) sería:

$$V_{oN} = V_o \cos 48.59 \quad [\text{Ecu15}]$$

Y como la masa de la tubería es varias veces superior a la masa del mecanismo brazo articulado se puede suponer que la velocidad de la tubería es cero en todo momento. Luego la ecuación 12 quedaría:

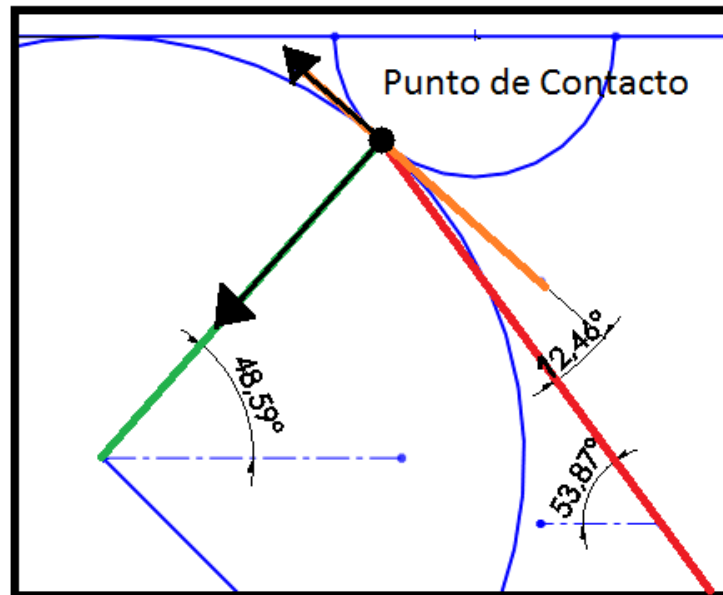
$$-V_{fN} = eV_{oN} \quad [\text{Ecu 16}]$$

El coeficiente de restitución entre el poliuretano y el acero es de 0.65 . Por lo que se tiene  $V_{fN} \cong 1.3 \text{ m/s}$ . Como el cuerpo esta restringido a rotar respecto a O la velocidad en dirección radial (línea roja) debe ser cero, por lo tanto:

$$V_{ft} \cos 12.46 = V_{fN} \sin 12.46 \quad [\text{Ecu 17}]$$

$V_{ft} = 0.3 \text{ m/s}$  en la dirección que indica la figura 33.

**FIGURA 33 VELOCIDAD EN EL PUNTO DE CONTACTO CON CORDÓN DE SOLDADURA 5 MM**



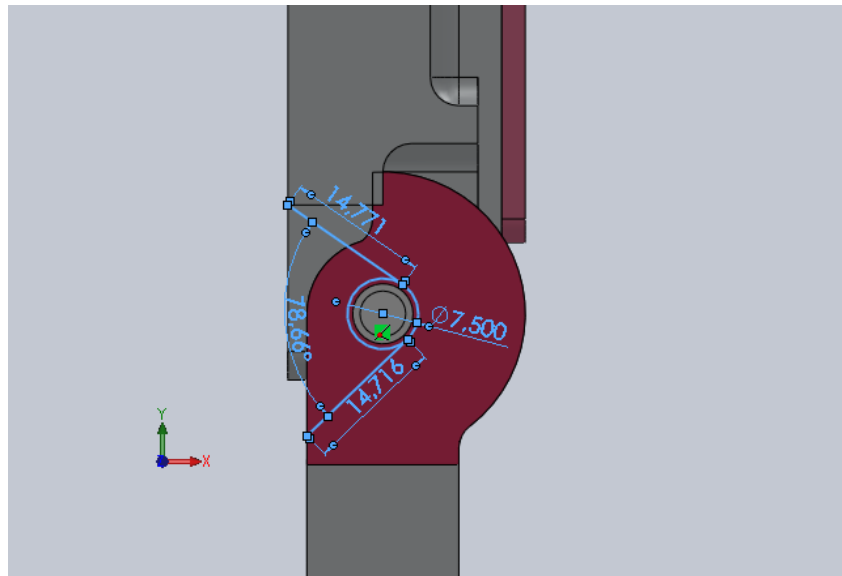
Fuente: Autores.

Entonces se tiene que  $\omega_f$  respecto a  $O$  para la Barra Mayor sería:

$$\omega_f = \frac{V_{fN} \cos 12.46 + V_{ft} \sin 12.46}{r} \quad [\text{Ecu 18}]$$

Donde  $r$  es el radio medio desde  $O$  hasta el punto de contacto y es igual a 0.0971m. Por lo tanto  $\omega_f \cong 13.75$  rad/seg. La velocidad angular que se calculó corresponde a la velocidad de la Barra Mayor justo después del impacto, lo que significa que es la velocidad angular inicial que se debe ingresar al simulador. Ahora hay que evaluar el comportamiento del mecanismo brazo articulado para diferentes constantes en el sistema de recuperación (resorte de extensión y resorte de doble de torsión). El resorte de torsión en la simulación se considera un resorte de torsión simple con un ángulo entre espiras de  $90^\circ$  por lo que al ensamblar el mecanismo se produce un desplazamiento angular inicial de  $19^\circ$  como se ve en la figura 34.

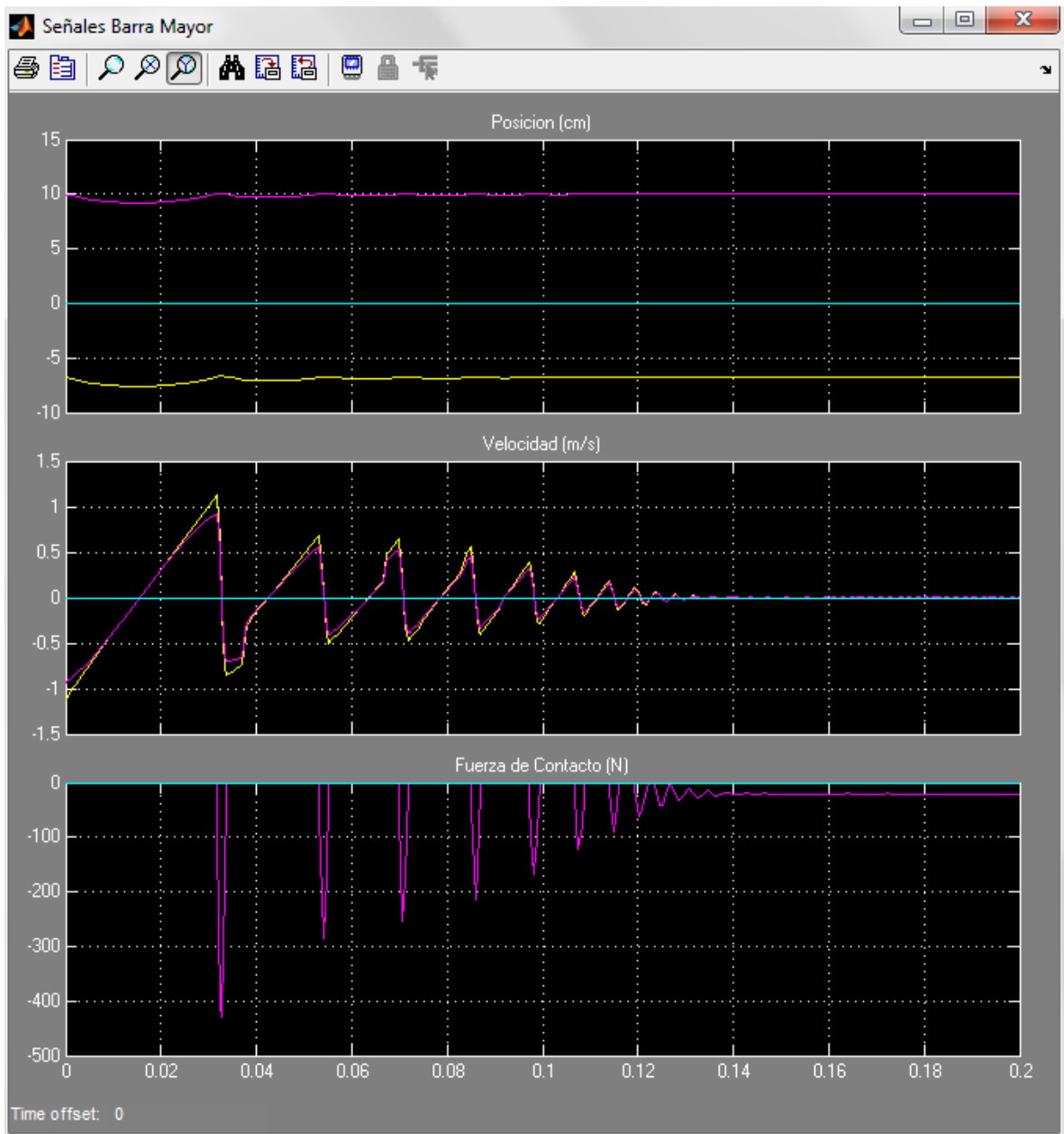
**FIGURA 34 ESQUEMÁTICO DEL RESORTE DE TORSIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DEL BRAZO ARTICULADO AL SER ENSAMBLADO**



Fuente: Autores

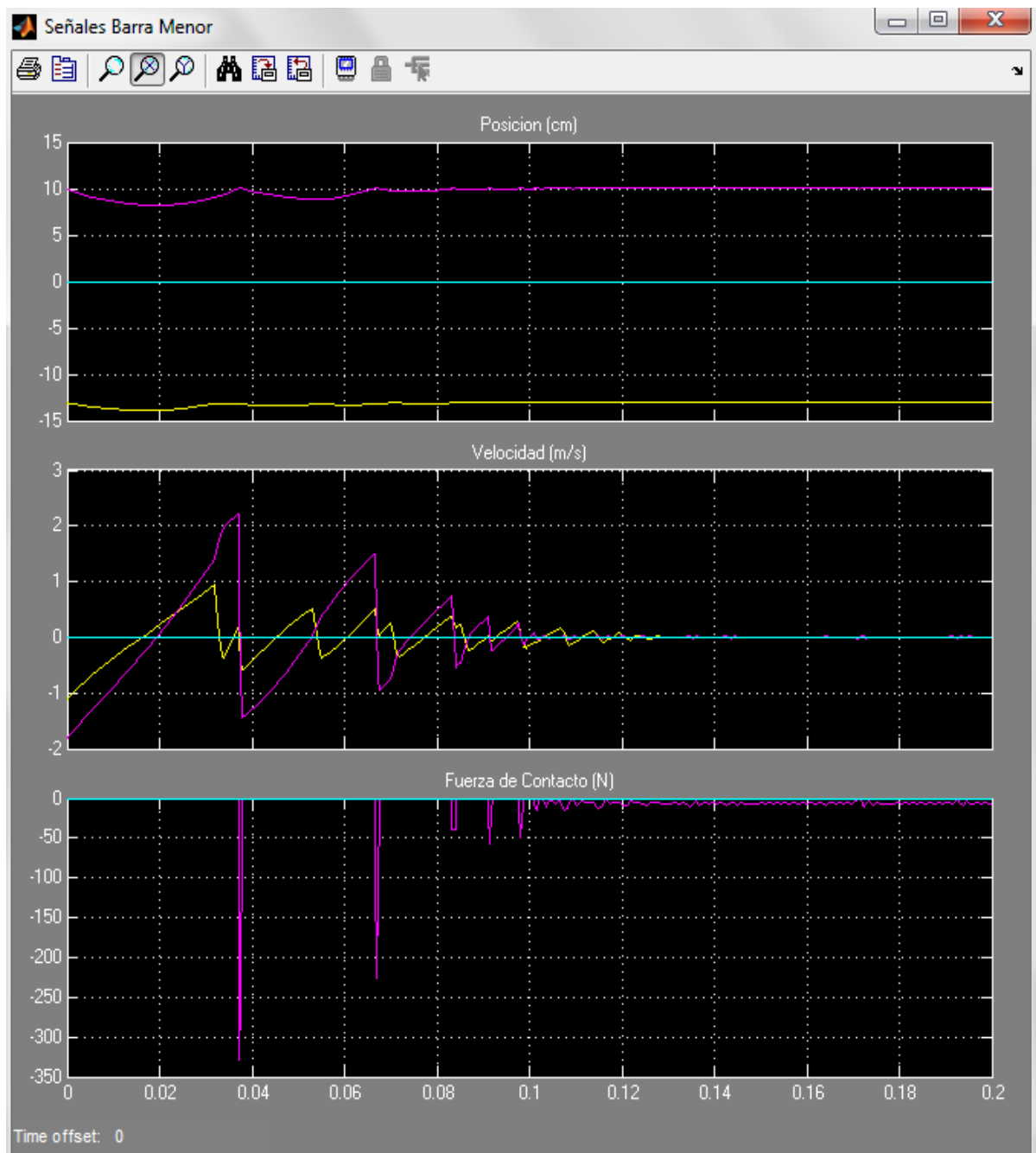
Al finalizar la simulación se obtienen las siguientes graficas de posición, velocidad y fuerza de contacto para los puntos de contacto de las dos barras usando  $k_e=4$  N/mm para el resorte de extensión y  $k_T=2.2$  N m/rev para el resorte de torsión. La selección de estas constantes se debe al análisis del comportamiento del mecanismo y a las posibilidades de diseñar los resortes que cumplieran con estas constantes y tuvieran el tamaño adecuado para acoplarse al mecanismo. Esto se explica en mas detalle en el capítulo 4. El simulador también realiza las gráficas de la posición angular de las dos barras durante la simulación, estas posiciones determinan las posiciones máximas y mínimas de los resortes y serán usadas en el diseño de los mismos. Las posiciones máximas y mínimas que se van a considerar para el diseño de los resortes se presentan cuando existe un impacto con un defecto de 25mm, lo cual se analiza en el capítulo 3.5.2.

**FIGURA 35 GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA MAYOR.**



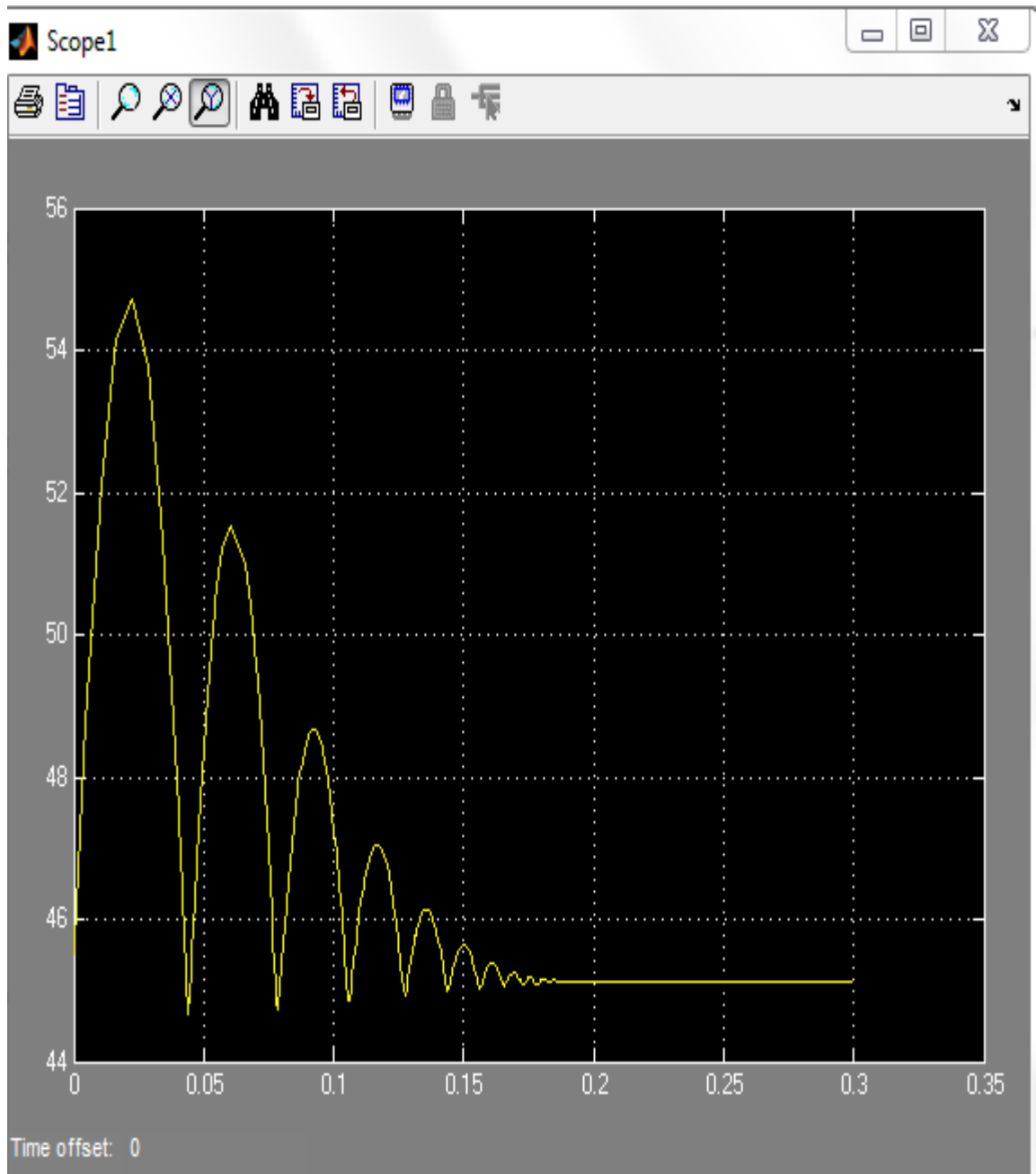
Fuente: Autores

**FIGURA 36. GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA DE SENSORES.**



Fuente: Autores

FIGURA 37 DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE LA BARRA MAYOR



Fuente: Autores

**FIGURA 38. DESPLAZAMIENTO ANGULAR DE LA BARRA DE SENSORES**



Fuente: Autores

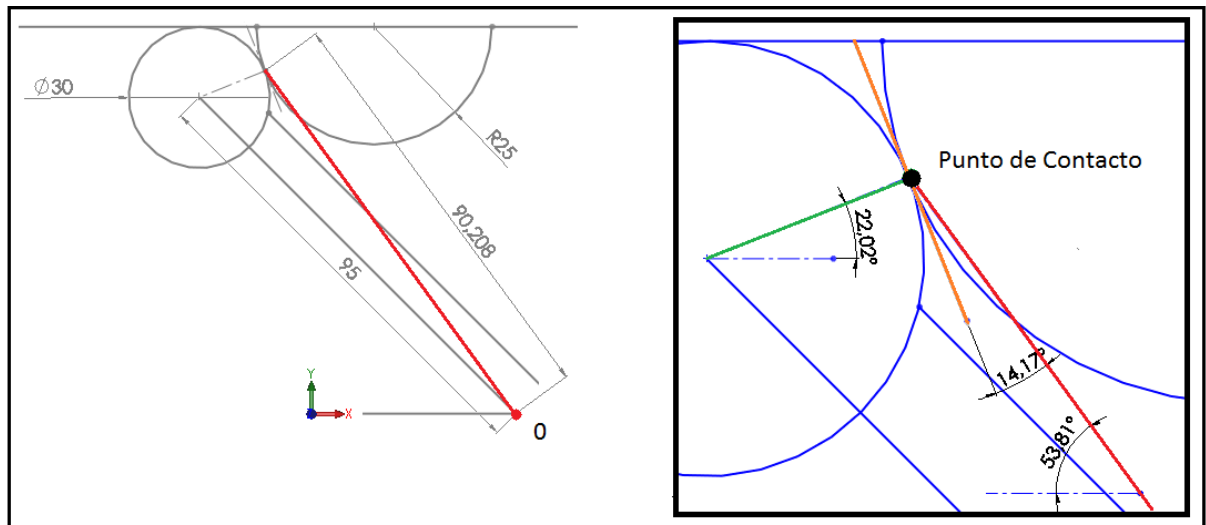
En las gráficas se puede observar que el comportamiento de las barras es el esperado. Las fuerzas de contacto (aunque no se puede asegurar que concuerdan con las reales) son consistentes con las fuerzas generadas durante un impacto. Así mismo, las gráficas de velocidad y posición tienen el comportamiento esperado.

De las gráficas de desplazamiento angular se tiene que el  $\Delta t$  de estabilización es aproximadamente 0.18 s.

### 3.5.2 Impacto con un defecto de 25mm

Se analiza el impacto con este tipo de defecto ya que en teoría es el defecto más grande con el que se puede encontrar el mecanismo brazo articulado. Los resultados relevantes de la simulación en este caso tienen que ver con los desplazamientos angulares máximos de las barras para determinar si el brazo golpearía contra el cuerpo del marrano. Se procede al análisis planteado para el defecto de 5 mm pero en este caso para un defecto de 25 mm.

**FIGURA 39 DEFECTO 25MM**



Fuente: Autores

La velocidad normal ITION-E es de 3m/s, luego la  $V_0$  en el punto de contacto es de 3m/s en dirección X. Ahora la componente en dirección normal (línea naranja en la figura 39) sería:

$$V_{oN} = V_o \cos 22.02 \quad [\text{Ecu19}]$$

y como la masa de la tubería es varias veces superior a la masa del mecanismo brazo articulado puedes suponer que la velocidad de la tubería es cero en todo momento. Luego la ecuación 12 quedaría:

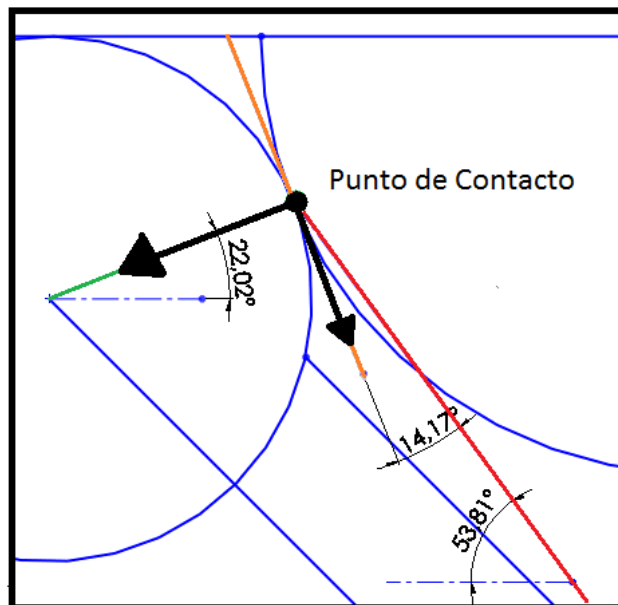
$$-V_{fN} = eV_{oN} \quad [\text{Ecu 20}]$$

El coeficiente de restitución entre el poliuretano y el acero es de 0.65 (ANEXO D). Por lo que se tiene  $V_{fN} \cong 1.81 \text{ m/s}$ . Como el cuerpo esta restringido a rotar respecto a O la velocidad en dirección radial (línea roja) debe ser cero, por lo tanto:

$$V_{ft} \cos 14.17 = V_{fN} \sin 14.17 \quad [\text{Ecu 21}]$$

$V_{ft} = 0.457 \text{ m/s}$  en la dirección que indica la figura 40.

**FIGURA 40 VELOCIDAD EN EL PUNTO DE CONTACTO CON CORDON DE SOLDADURA 25 MM**



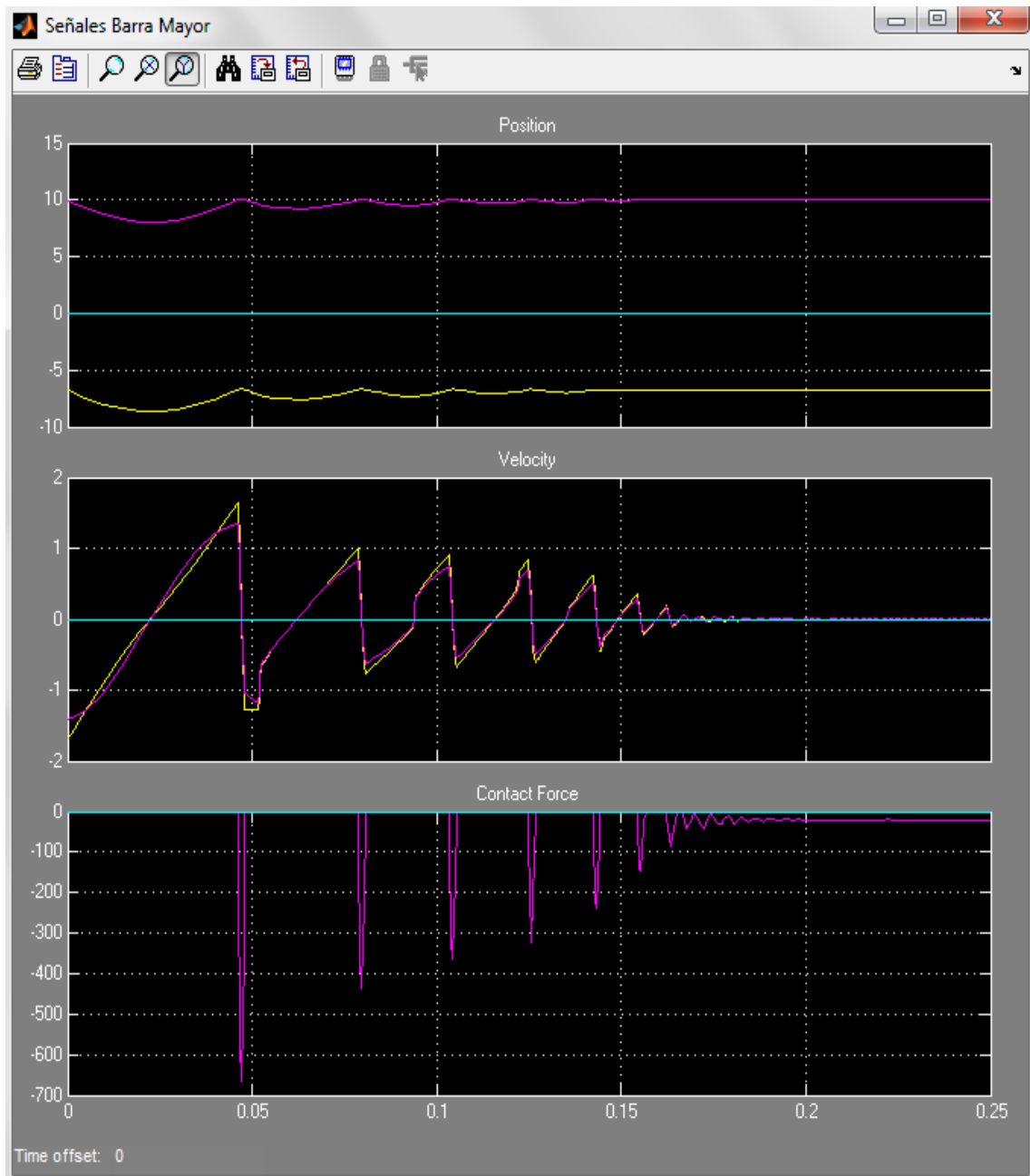
Fuente: Autores

Entonces tenemos que  $\omega_f$  respecto a O para la Barra Mayor sería:

$$\omega_f = \frac{V_{fN} \cos 14.17 + V_{ft} \sin 14.17}{r} \quad [\text{Ecu 18}]$$

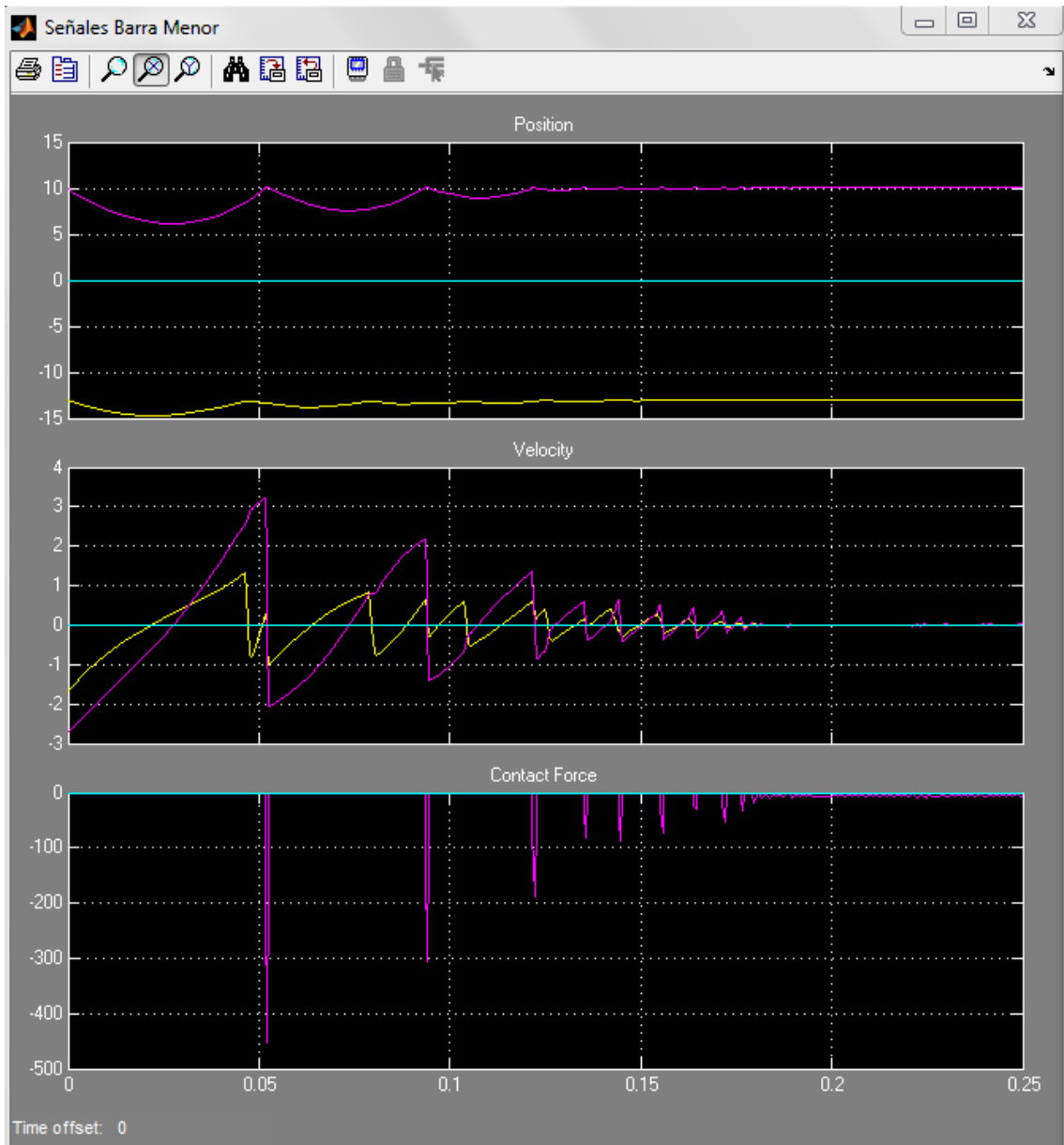
Donde  $r$  es el radio medio desde O hasta el punto de contacto y es igual a 0.090208m. Por lo tanto  $\omega_f \cong 20.7$  rad/seg, que es la velocidad inicial de la Barra mayor en la simulación. A continuación se presentan las gráficas obtenidas para las mismas constantes de resorte ( $k_e=4$  N/mm para el resorte de extensión y  $k_T=2.2$  Nm / Rev para el resorte de torsión) usadas en la simulación del impacto con el cordón de soldadura de 5mm.

**FIGURA 41 GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA MAYOR.**



Fuente: Autores

**FIGURA 42. GRÁFICAS POSICIÓN, VELOCIDAD Y FUERZA DE CONTACTO PARA LA BARRA DE SENSORES.**

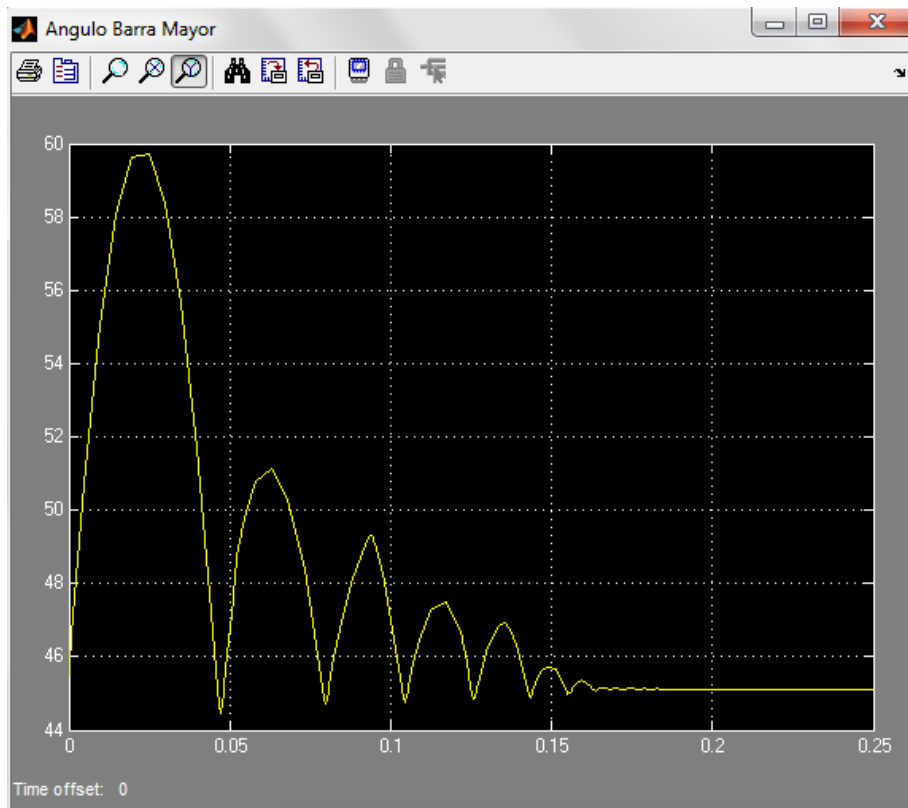


Fuente: Autores

En las gráficas se puede observar que el comportamiento de las barras es el esperado. Las fuerzas de contacto (aunque no se puede asegurar que concuerdan con las reales) son consistentes con las fuerzas generadas durante un impacto. Así mismo, las gráficas de velocidad y posición tienen el comportamiento esperado.

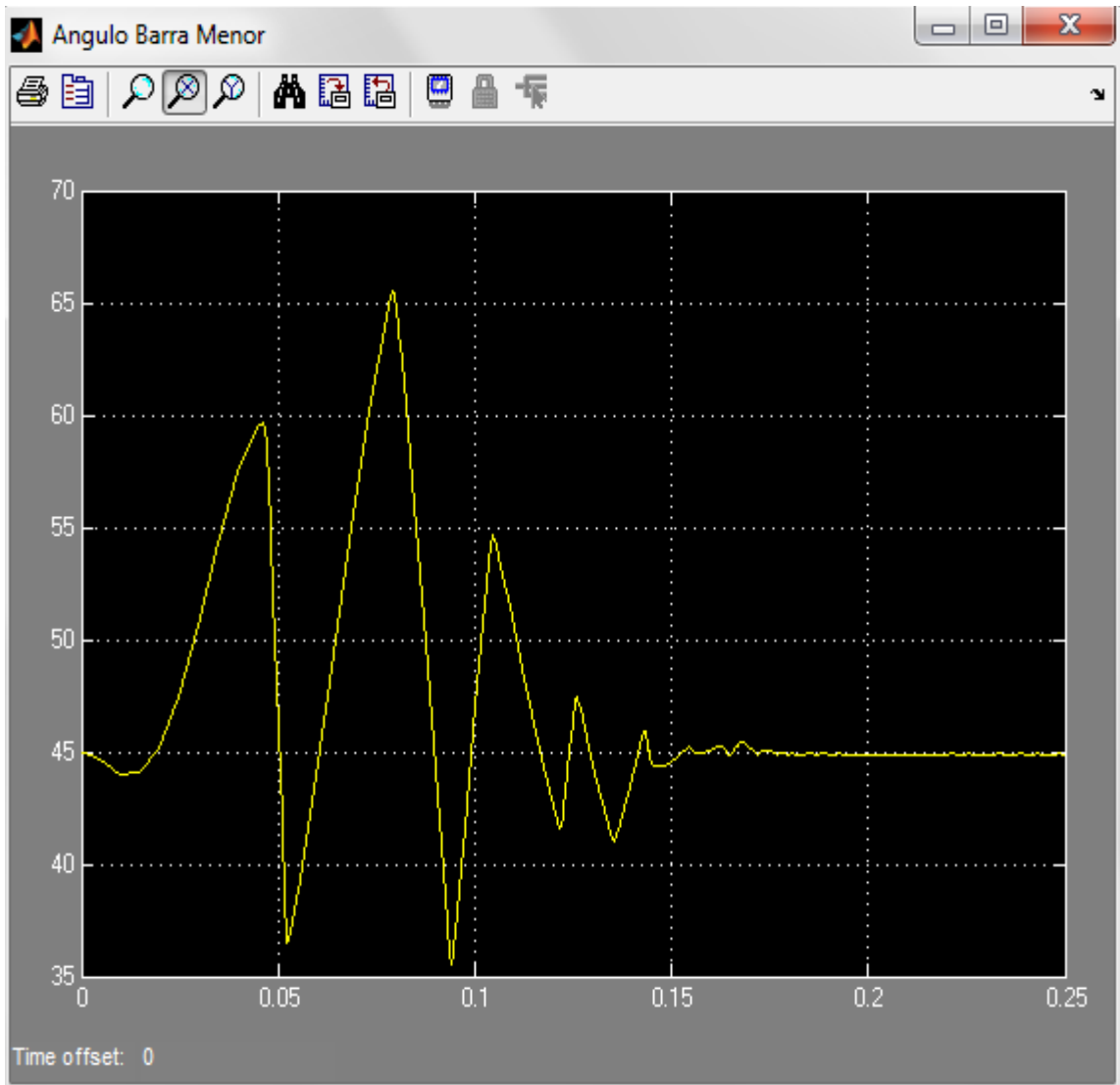
Las posiciones máximas y mínimas para las barras se pueden observar en las siguientes gráficas. El ángulo de la Barra Mayor se mide respecto al eje Y definido en la simulación mientras que el ángulo de la barra de sensores se mide respecto a la rotación de la Barra Mayor. Basados en la simulación se podría esperar que el mecanismo brazo articulado NO golpeará el cuerpo del marrano después de impactar el mayor defecto que se podría encontrar durante una inspección.

**FIGURA 43 DESPLAZAMIENTO ANGULAR BARRA MAYOR**



Fuente: Autores

FIGURA 44 DESPLAZAMIENTO ANGULAR BARRA DE SENSORES



Fuente: Autores

## 4. DISEÑO DE RESORTES.

El diseño de los resortes se efectuó en base a los resultados obtenidos en la simulación en *Simulink* (para el impacto con una soldadura estándar de 5mm) y en las metodologías para el diseño de resortes de torsión y extensión del capítulo 13 del libro *Diseño de Maquinas* de Robert L. Norton [7]. Los resortes se diseñan para vida infinita con cargas a fatiga.

### 4.1 RESORTE DE EXTENSIÓN

La constante seleccionada en base a la simulación fue de 4 KN-m. Las elongaciones máximas y mínimas obtenidas durante la simulación fueron de aproximadamente 22.5 y 18.5 mm respectivamente. De esto se puede decir que las cargas máximas y mínimas del resorte son de 90 y 74 N respectivamente. De las dimensiones definidas para el mecanismo brazo articulado se tiene que el diámetro de las espiras debe ser menor de 20 mm y que la longitud entre los ejes de donde se engancha el resorte es de 34.2 mm. Con base en la información anterior y tomando un calibre de alambre  $d=1.75\text{mm}$  se aplica el procedimiento del capítulo 13.5 del libro *Diseño de Maquinas* de Robert L. Norton.

Se calcula el valor del índice del resorte para  $D=15.75\text{mm}$  y  $d=1.75\text{mm}$

$$C = D/d = 17.5/(1.75) = 9$$

Se utiliza el valor C para determinar un valor apropiado para el esfuerzo inicial de las espiras  $\tau_i$  a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\tau_{i1} &= -4.231C^3 + 181.5C^2 - 3387C + 28640 \\ &= -4.231 * 9^3 + 181.5 * 9^2 - 3387 * 9 + 28640 = 9774.1 [psi] \\ \tau_{i2} &= -4.231C^3 + 181.5C^2 - 3387C + 28640\end{aligned}$$

$$\tau_{i2} = -4.231 * 9^3 + 181.5 * 9^2 - 3387 * 9 + 38404 - 09774 = 16699 \text{psi}$$

$$\tau_i = \frac{\tau_{i1} + \tau_{i2}}{2} = \frac{9774 + 16699}{2} = 13237 \text{psi} = 91.2637 \text{ [Mpa]}$$

Se encuentra el factor de cortante directo:

$$K_s = 1 + \frac{0.5}{9} = 1.0556 \text{psi}$$

Se utiliza el valor de  $\tau_i$  de la siguiente ecuación para determinar la fuerza de tensión inicial de la espira correspondiente a  $F_i$

$$F_i = \frac{\pi * d^3 * \tau_i}{8 * K_s * D} = \frac{\pi * 1.75^3 * 91,2667}{8 * 1.0556 * 15.75} = 11.55 \text{ N}$$

Se asegura, que esta fuerza es la fuerza aplicada requerida  $F_{min}$ , lo que en este caso es así. Cualquier fuerza aplicada inferior a  $F_i$  no causara deflexión sobre el resorte.

Se encuentra la fuerza media y alternante de la siguiente ecuación:

$$F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} = \frac{106 - 74}{2} = 8 \text{ N}$$

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} = \frac{106 + 74}{2} = 82 \text{ N}$$

Se usa el factor constante  $K_s$  y los valores supuestos anteriormente a fin de determinar el esfuerzo medio  $\tau_w$

$$\tau_m = K_s \frac{8 * F_m * D}{\pi * d^3} = 647.74 \text{Mpa}$$

Se encuentra el factor Wahl  $K_w$  y se calcula el esfuerzo cortante alternante  $\tau_a$  en la espira.

$$K_w = \frac{4 * C - 1}{24 * c - 4} + \frac{0,615}{C} = 1.1621$$

$$\tau_a = K_w \frac{8 * F_a * D}{\pi * d^3} = 69.5719 \text{ Mpa}$$

Se determina la resistencia máxima a la tensión en este material (Alambre estirado en frío) usando los valores de la tabla 3 (A y b) y la siguiente ecuación:

**TABLA 3. COEFICIENTES Y EXPONENTES PARA DETERMINAR  $S_{ut}$**

TABLA 13-4 Coeficientes y exponentes para la ecuación 13.3							
Fuente: Referencia 1							
ASTM #	Material	Rango		Exponente $b$	Coeficiente A		Factor de correlación
		mm	in		MPa	psi	
A227	Estirado en frío	0.5-16	0.020-0.625	-0.182 2	1 753.3	141 040	0.998
A228	Alambre de piano	0.3-6	0.010-0.250	-0.1625	2 153.5	184 649	0.9997
A229	Revenido en aceite	0.5-16	0.020-0.625	-0.183 3	1 831.2	146 780	0.999
A232	Cromo vanadio	0.5-12	0.020-0.500	-0.145 3	1 909.9	173 128	0.998
A401	Cromo silicio	0.8-11	0.031-0.437	-0.093 4	2 059.2	220 779	0.991

Fuente: Diseño de Máquinas, Norton, Robert L

$$S_{ut} = A * d^b = 1753.3 * 0,177^{-0.1822} = 1583.3 \text{ Mpa}$$

Después se determina la resistencia cortante máxima

$$S_{us} = 0.667S_{ut} = 1056.1 \text{ Mpa}$$

Y el límite elástico a la torsión para el cuerpo de las espiras de la tabla 4, suponiendo que no hay eliminación de asentamiento

**TABLA 4. LIMITES ELÁSTICOS A LA TORSIÓN MÁXIMOS  $S_y$  Y  $S_{ys}$  PARA RESORTES HELICOIDALES DE EXTENSIÓN EN APLICACIONES ESTÁTICAS**

**TABLA 13-10 Límites elásticos a la torsión máximos  $S_y$  y  $S_{ys}$  para resortes helicoidales de extensión en aplicaciones estáticas**  
Sin eliminación del asentamiento ni tratamiento térmico a baja temperatura aplicado Fuente: Referencia 1

Material	Porcentaje máximo de resistencia máxima a tensión		
	$S_{ys}$ a la torsión		$S_y$ a flexión
	Cuerpo	Extremo	Extremo
Acero al carbono patentado y estirado en frío	45%	40%	75%
Acero al carbono endurecido y revenido y de baja aleación	50	40	75
Acero inoxidable austenítico y aleaciones no ferrosas	35	30	55

Fuente: Diseño de Máquinas, Norton, Robert L

$$S_{ys} = 0.45S_{ut} = 712.5 \text{ Mpa}$$

Se tiene que para vida infinita a la fatiga la resistencia del alambre estirado en frío sin granallar es de:

$$S_{ew} = 310 \text{ Mpa}$$

Y esto se convierte a una resistencia a la fatiga totalmente alternante así:

$$S_{es} = 0.77 \frac{S_{ew}S_{us}}{S_{us} - 0.707 S_{ew}} = 276.57 \text{ Mpa}$$

Se calcula el factor de seguridad a la fatiga para las espiras a la torsión

$$N_{fs} = \frac{S_{es}(S_{us} - \tau_{\min})}{S_{es}(\tau_m - \tau_{\min}) + S_{us}\tau_a} = 1.43$$

El cual es adecuado para el prototipo.

Para obtener la tasa definida del resorte, el número de espiras activas deberán satisfacer a la ecuación:

$$K = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * N_a}$$
$$N_a = \frac{d^4 * G}{8 * D^3 * K} = 6$$

El número de espiras en el cuerpo y la longitud del cuerpo son:

$$N_t = N_a + 1 = 6 + 1 = 7$$

$$L_b = N_t * d = 12.35mm$$

## 4.2 RESORTE DE TORSIÓN DOBLE

La constante seleccionada en base a la simulación fue de 2.2 N-m/rev. Los desplazamientos angulares máximos y mínimos obtenidos durante la simulación fueron de aproximadamente 45° y 65° mm con una deformación inicial de 19°. De esto se puede decir que las cargas máximas y mínimas del resorte son de 0.4 y 0.51 N-m respectivamente. De las dimensiones definidas para el mecanismo brazo articulado se tiene que el diámetro de las espiras debe ser menor de 20 mm y que el diámetro del eje de donde se ubica el resorte es de 6 mm. Con base en la información anterior y tomando un calibre de alambre  $d=1.25mm$  aplicamos el procedimiento del capítulo 13.6 del libro *Diseño de Maquinas* de *Robert L. Norton*. Para el diseño se considerarán dos resortes idénticos trabajando en paralelo, por lo que el valor de las cargas se deberá dividir en dos.

Se calcula el valor del índice del resorte para  $D=9.25$  y  $d=1.25$

$$C = D/d = 7.4$$

Se determinan los momentos medio y alternantes:

$$M_m = \frac{M_{max} + M_{min}}{2} = \frac{0.255 + 0.2}{2} = 0.2275 \text{ N} - m$$

$$M_a = \frac{M_{max} - M_{min}}{2} = \frac{0.255 - 0.2}{2} = 0.0275 \text{ N} - m$$

Se calcula el factor de Wahl a la flexión para la superficie interior  $K_{bi}$

$$K_b = \frac{4 * C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} = 1.11$$

Y se utiliza para calcular el esfuerzo máximo a la compresión de la espira en la superficie interna.

$$\sigma_{imax} = K_{bi} \frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3} = 1476.16 \text{ Mpa}$$

Se encuentra el factor Wahl a flexión  $K_{bc}$  para la superficie exterior

$$K_{bo} = \frac{4 * C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 + 1)} = 0.847$$

Se calculan los esfuerzos máximo, mínimo, alternante y medio a la tensión en la espira en la superficie externa.

$$\sigma_{omin} = K_{ba} \frac{32 * M_{min}}{\pi * d^3} = 883 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{omax} = K_{bo} \frac{32 * M_{max}}{\pi * d^3} = 1120 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{omean} = \frac{\sigma_{omax} + \sigma_{omin}}{2} = 976.5 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{oalt} = \frac{\sigma_{omax} - \sigma_{omin}}{2} = 118.5 \text{ Mpa}$$

Se determina la resistencia máxima a la tensión de este material de alambre de piano a partir de la ecuación  $S_{ut}$  y de la tabla 3 y se utiliza para encontrar el límite elástico a la flexión del cuerpo de las espiras de la tabla 4, suponiendo que no hay eliminación de esfuerzos.

Se determina la resistencia máxima  $S_{us}$  para el material (alambre estirado en frío) de la tabla 3 y se encuentra el límite elástico a la flexión  $S_y$  del cuerpo de las espiras suponiendo que no hay eliminación de esfuerzos.

$$S_{ut} = A * d^b = 1583.3 \text{ Mpa}$$

$$S_y = 1.0 S_{ut} = 1583.3 \text{ Mpa}$$

Se calcula el límite de resistencia a la fatiga  $S_{ewb}$  a flexión para resortes sin granallar y se convierte a una resistencia a la fatiga por flexión totalmente alternante  $S_e$

$$S_{ewb} = \frac{310}{0,577} = 537.25 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 0.77 \frac{S_{ewb} S_{ut}}{S_{ut} - 0,707 S_{ewb}} = 4160.89 \text{ Mpa}$$

Se calcula el factor de seguridad a la fatiga para las espiras a flexión

$$N_{fs} = \frac{S_e (S_{ut} - \sigma_{omin})}{S_e (\sigma_{omin} - \sigma_{omin}) + S_{ut} \sigma_{oalt}} = 1.28$$

El factor de seguridad estático contra la fluencia es

$$N_{yb} = \frac{S_y}{\sigma_{imax}} = 1.41$$

Estos dos factores son aceptables.

Para obtener la tasa definida del resorte, el número de espiras activas deberán satisfacer la ecuación:

$$K = \frac{d^4 * E}{10.8 * D * N_a}$$

$$N_a = \frac{d^4 * E}{10.8 * D * K} = 4.5989 \approx 4.75$$

Los extremos contribuyen a las espiras activas de forma:

$$N_e = \frac{L_1 + L_2}{3 * \pi * D} = \frac{14.8 + 14.8}{3 * \pi * 9.25} = 0.33$$

Y el número de espiras de cuerpo en el resorte son:

$$N_b = N_a - N_e = 5.08 \approx 5$$

## 5 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR

### 5.1 FUERZAS EXPERIMENTADAS EN EL MECANISMO.

En esta sección se analizarán las fuerzas presentes en el mecanismo teniendo en cuenta dos estados de la herramienta, los cuales son:

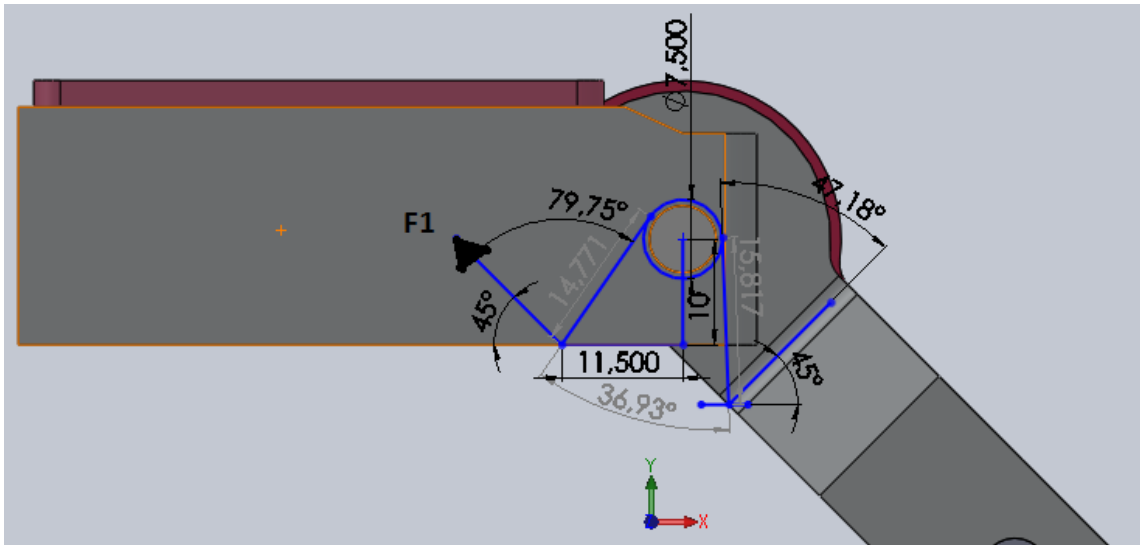
- Operación normal de trabajo.
- Paso por una soldadura.

#### 5.1.1 Fuerzas en operación normal de trabajo.

Se llama operación normal de trabajo cuando el brazo articulado avanza solo en contacto con la tubería en la siguiente posición.

##### 5.1.1.1 Barra de sensores en operación normal de trabajo

### FIGURA 45. FUERZAS BARRA DE SENSORES EN OPERACIÓN NORMAL DE TRABAJO



Fuente: Autores

$$K_{\theta} = 2.2 \frac{N m}{rev}$$

$K_{\theta}$  = constante del resorte de torsion

$$T = K_{\theta} * \theta$$

$\theta$  = angulo de giro desde la posición inicial.

El resorte no se encuentra en su posición inicial, está pre-cargado  $19^{\circ}$

$$\theta = 19^{\circ} + 45^{\circ} = 64^{\circ} = \frac{8}{45} rev$$

$$T = 2.2 * \frac{8}{45}$$

$$T = \frac{88}{225} N m = 0.391 N m$$

De la figura 43 se tiene que:

$$0.391 = 0,0115 * F1 \cos 45 + 0,010 * F1 \sin 45$$

$$F1 = 25.72 N$$

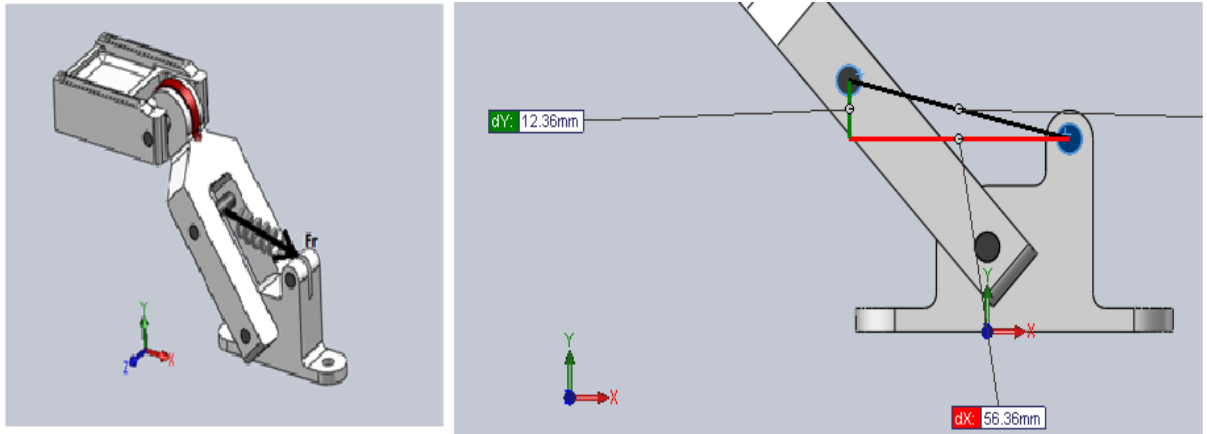
Entonces:

$$F1x = -18.19 N$$

$$F1y = 18.19 N$$

### 5.1.1.2 Barra larga en operación normal de trabajo

**FIGURA 46 FUERZAS BARRA LARGA EN OPERACIÓN NORMAL DE TRABAJO**



Fuente: Autores

$$Fr=K*X$$

Donde K es la constante del resorte que es igual  $K=4 \text{ N/m}$ , X es la elongación del resorte desde su longitud natural, hasta su longitud de trabajo, en nuestro caso es  $X=0,02348 \text{ m}$

$$Fr = 4 \text{ kN/m} * 0,02348 \text{ m}$$

$$Fr = 93.92 \text{ N}$$

En componentes x, y:

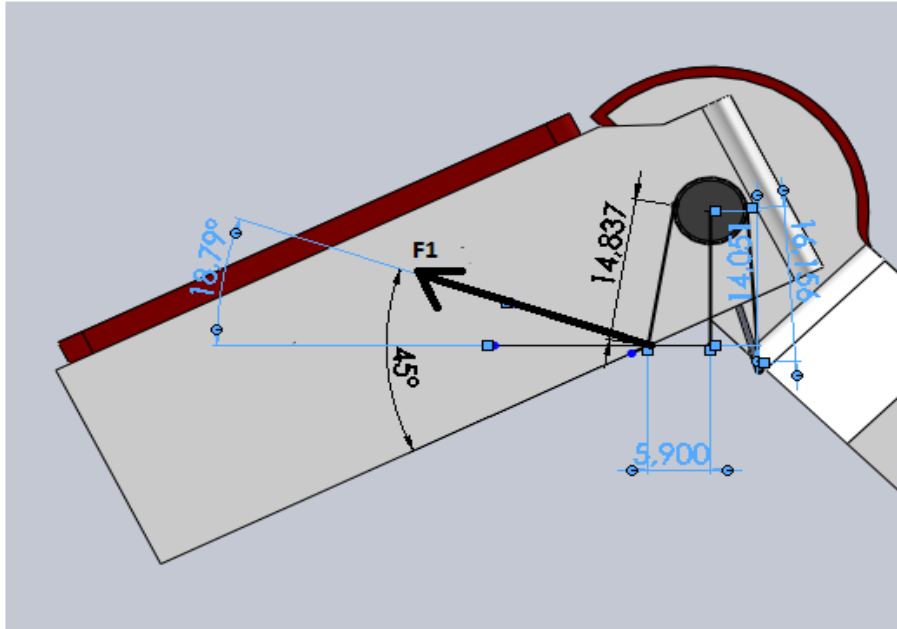
$$Fr= 91.73X - 20.11 Y \text{ (N)}$$

### 5.1.2 Fuerzas experimentadas en la pieza por el paso de una soldadura.

Estas fuerzas se presentan cuando el brazo articulado pasa por una soldadura.

### 5.1.2.1 Barra de sensores pasando por una soldadura

FIGURA 47 FUERZA BARRA DE SENSORES PASANDO POR UNA SOLDADURA.



Fuente: Autores

$$K_{\theta} = 2.2 \frac{N m}{rev}$$

$K_{\theta}$  = constante del resorte de torsion

$$T = K_{\theta} * \theta$$

$\theta$  = angulo de giro desde la posición inicial.

El resorte no se encuentra en su posición inicial, está pre-cargado 19 °

$$\theta = 19^{\circ} + 65^{\circ} = 84^{\circ} = \frac{7}{30} rev$$

$$T = 2.2 * \frac{7}{30}$$

$$T = 150 \text{ N m} = 0.513391 \text{ N m}$$

De la figura 45 se tiene que:

$$0.5133 = 0,01405 * F1 \cos 18.79 + 0,0059 * F1 \sin 18.79$$

$$F1 = 33.08 \text{ N}$$

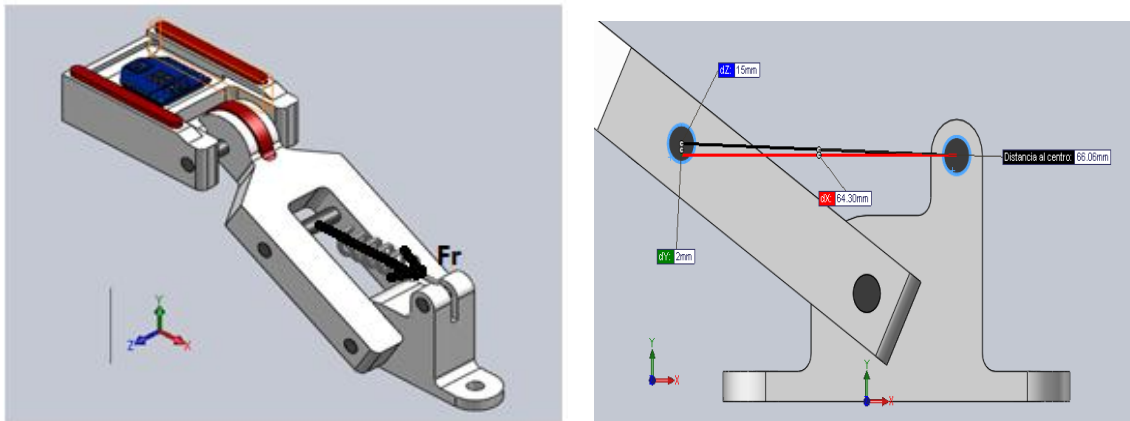
Entonces:

$$F1x = -32.006 \text{ N}$$

$$F1y = 10.89 \text{ N}$$

### 5.1.2.2 Barra larga pasando por una soldadura

**FIGURA 48 FUERZAS BARRA LARGA PASANDO POR UNA SOLDADURA**



Fuente: Autores

$$Fr = K * X$$

Donde K es la constante del resorte que es igual  $K=4 \text{ KN/m}$ , X es la elongación del resorte desde su longitud natural, hasta su longitud de trabajo, en este caso es  $X=0.03185\text{m}$

$$Fr = 4 \text{ kN/m} * 0,03185 \text{ m}$$

$$Fr = 127.36 \text{ N}$$

En componentes x, y:

$$F_r = 127.29 X - 0,0615 Y \text{ (N)}$$

## **5.2 ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR**

Ahora es importante en esta fase de diseño, determinar si los componentes son resistentes y lo suficientemente rígidos para el fin que son requeridos. Los materiales fueron escogidos bajo los requerimientos del cliente, ahora se definirán si cumplen con los requisitos mecánicos. Para este fin se utilizará la herramienta ANSYS v12.1.

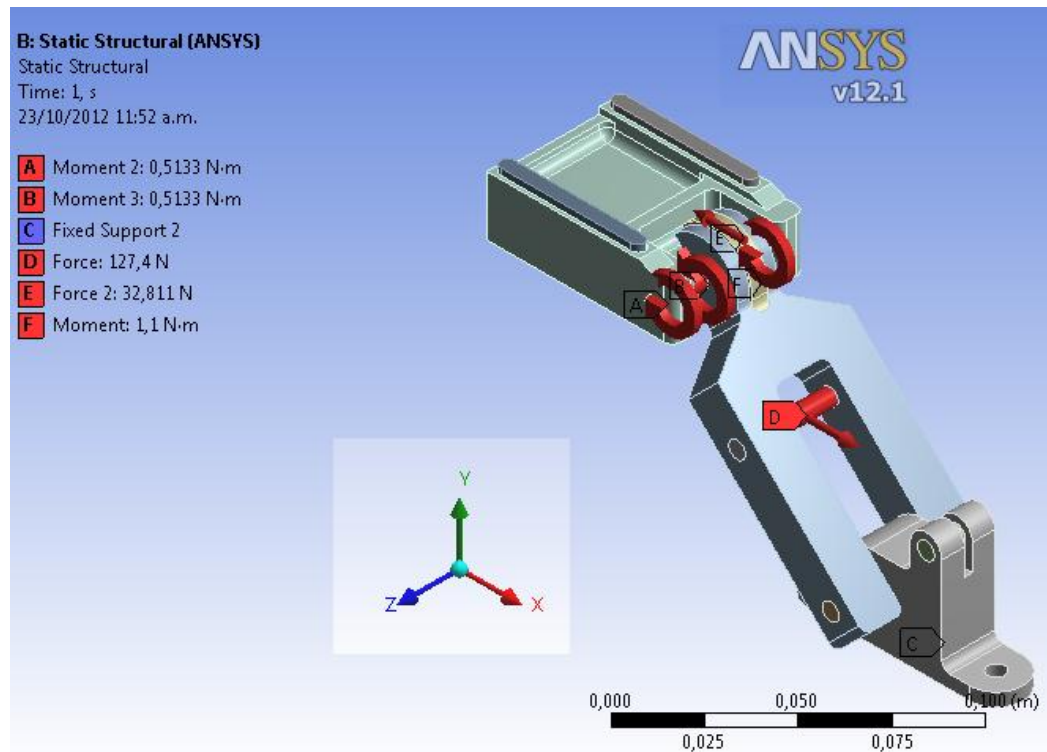
El estudio de los esfuerzos presentes en el mecanismo se da con las fuerzas encontradas anteriormente. Una fuerza en el resorte de extensión, un par de fuerza presente por el resorte de torsión.

El análisis del brazo se realizará cuando este pase por una soldadura (posición crítica del brazo) puesto que es aquí en donde se presentan las mayores fuerzas del mecanismo como lo obtuvimos anteriormente.

### **5.2.1 Análisis de del mecanismo pasando por una soldadura.**

Se toman las fuerzas obtenidas en el numeral 5.1.2 (Fuerzas presentes en la pieza por el paso de una soldadura.)

**FIGURA 49. FUERZAS EN EL MECANISMO POR EL PASO POR UNA SOLDADURA**



Fuente: Autores

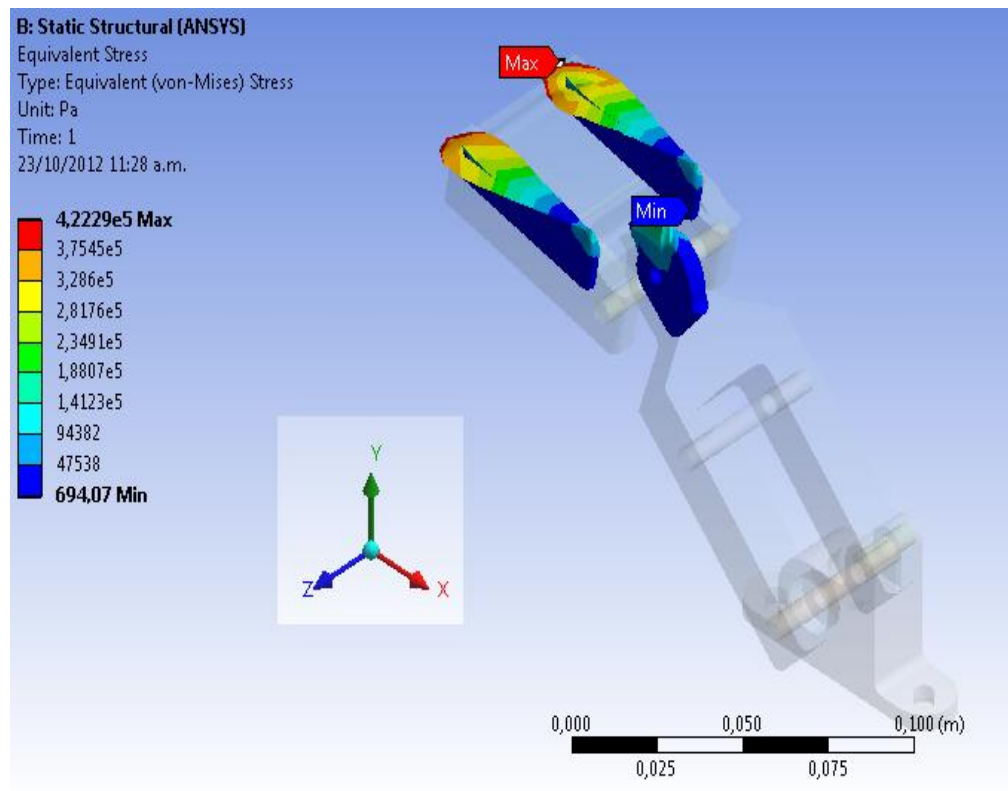
Se realiza un estudio de deformación, esfuerzos y factor de seguridad, con el fin de validar el diseño tanto en sus dimensiones como en sus materiales propuestos anteriormente.

Para una mayor facilidad de estudio se van a estudiar los materiales presentes en el brazo articulado en dos partes, en la primera el poliuretano y en la otra parte el duraluminio y los ejes en acero inoxidable.

### 5.2.1.1 Análisis del poliuretano.

Para validar el diseño del poliuretano presente en el mecanismo, se utiliza la herramienta computacional que arroja los resultados en la figura 50, figura 51 y figura 52.

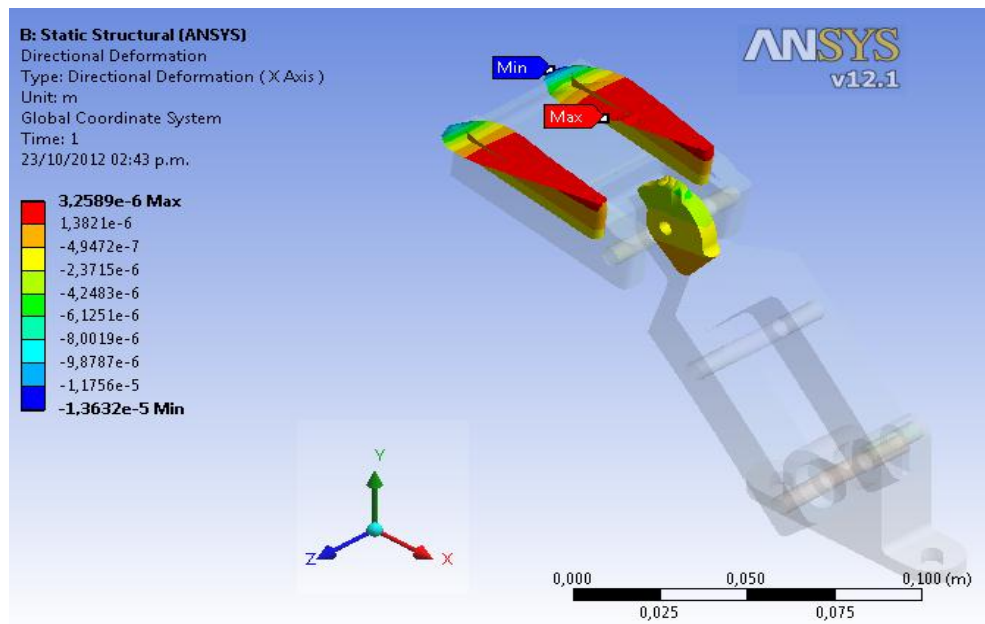
**FIGURA 50 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL POLIURETANO**



Fuente: Autores

Se observa que el esfuerzo máximo presente en es de  $0,18087 \text{ MPa}$  siendo menor a  $30 \text{ MPa}$ , el límite elástico.

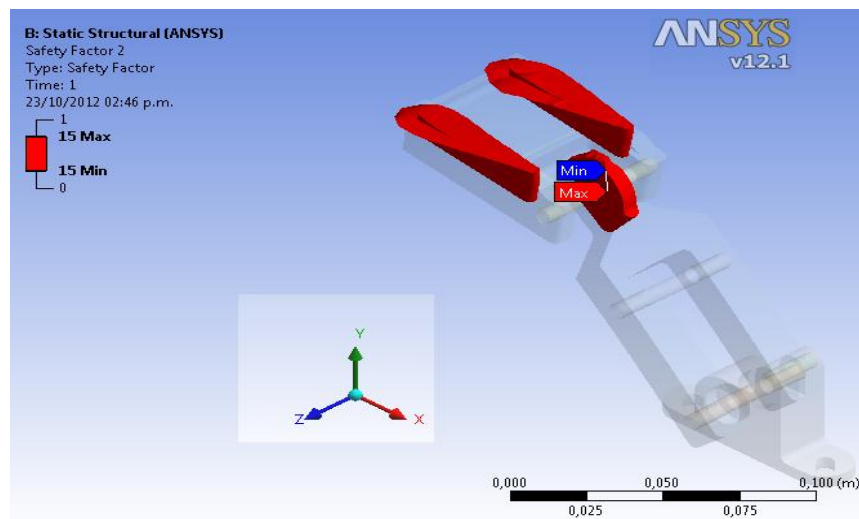
**FIGURA 51 DEFORMACIÓN DEL POLIURETANO**



Fuente: Autores

La deformación máxima presente en el poliuretano es de  $3,2589 \times 10^{-6}$  m

**FIGURA 52 FACTOR DE SEGURIDAD DEL POLIURETANO**



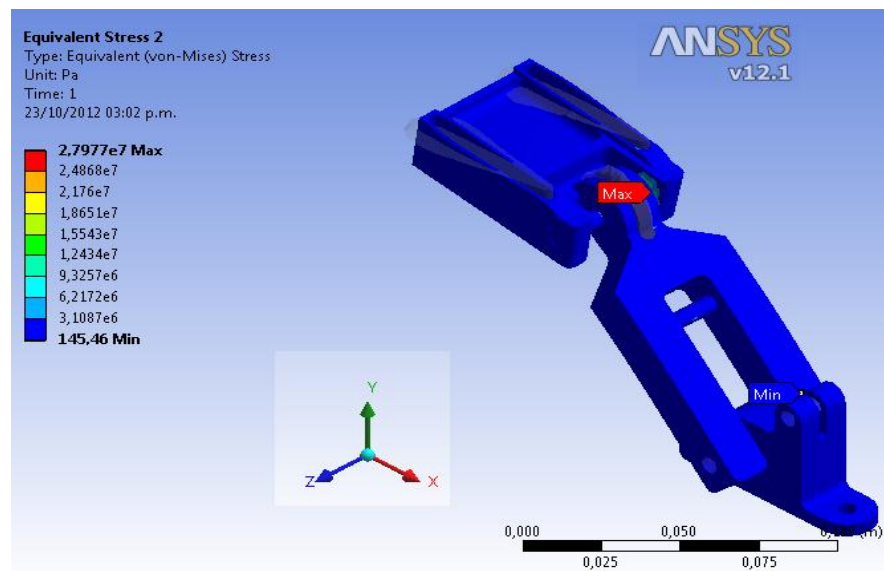
Fuente: Autores

Estos análisis arrojan un factor de seguridad mayor que 10 lo cual ratifica con mucha certeza el poliuretano es valido

### 5.2.1.2 Análisis del duraluminio y ejes de acero inoxidable

Para validar el diseño del duraluminio presente en el mecanismo, se utiliza la herramienta computacional que arroja los resultados en la figura 53, figura 54 y figura 55.

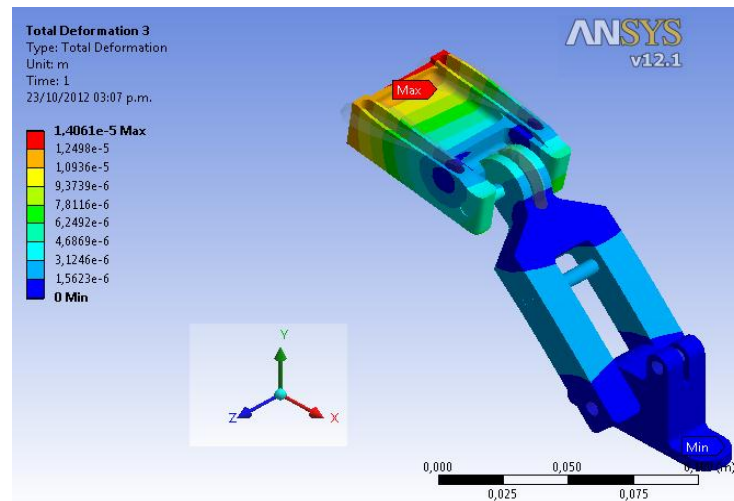
**FIGURA 53 ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN EL DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE**



Fuente: Autores

Se observa que el esfuerzo máximo presente en es de  $27,977 MPa$  siendo menor a  $500 MPa$ , el limite elástico.

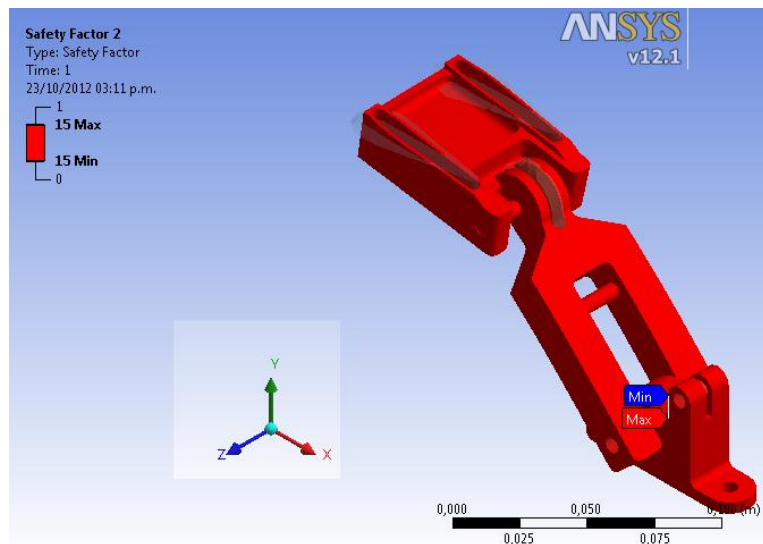
**FIGURA 54 DEFORMACIÓN DEL DURALUMINIO Y ACERO INOXIDABLE**



Fuente: Autores

La deformación máxima presente en la pieza es de  $1,401 \times 10^{-5}$  m

**FIGURA 55 FACTOR DE SEGURIDAD DEL ACERO INOXIDABLE Y EL POLIURETANO**



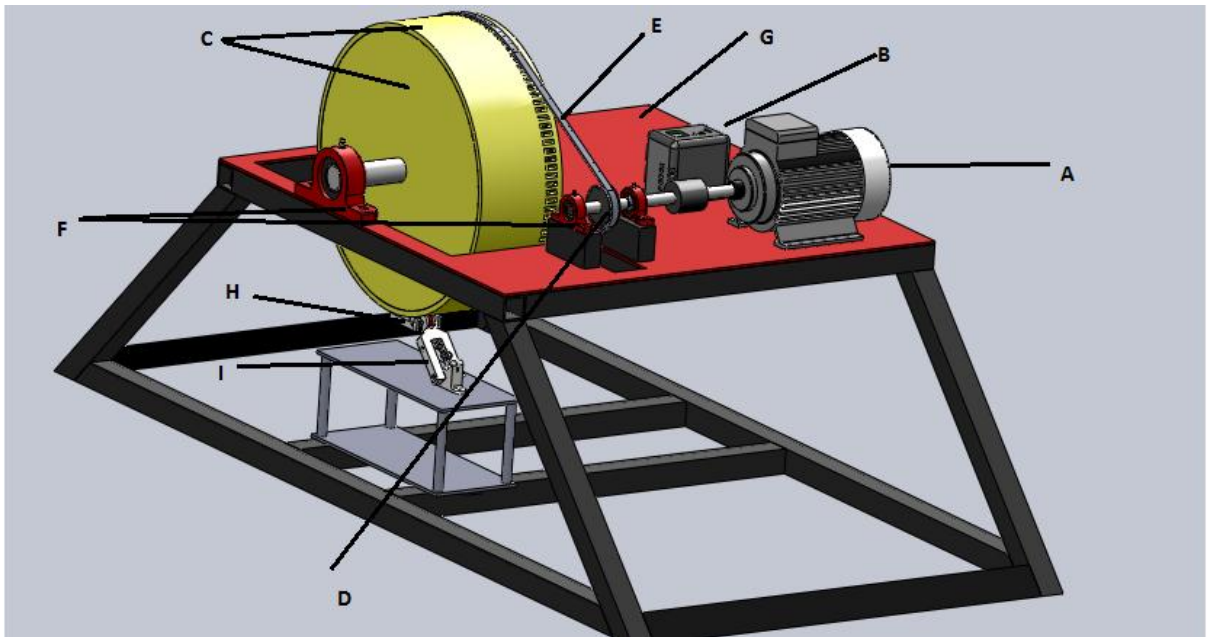
Fuente: Autores

Estos análisis arrojan un factor de seguridad mayor que 10 lo cual ratifica con mucha certeza tanto los materiales (Duraluminio y acero inoxidable) son validos.

## 6. PRUEBAS DE LABORATORIO

### 6.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

FIGURA 56 BANCO DE PRUEBAS



Fuente: Autores

El banco de pruebas esta compuesto por:

- A. Motor.
- B. Un variador de frecuencia.
- C. Tubería de 18 in con dos tapas.
- D. Piñón de arrastre.
- E. Correa sincrónica.
- F. Una mesa para la ubicación de todos los componentes.
- G. Brazo articulado.
- H. Imu 9 DOF (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro).
- I. Tarjeta Arduino UNO (microcontrolador ATmega 328).

Ver anexo B

### 6.1.1 Motor

En la figura 57, se observa el motor seleccionado para nuestro banco de pruebas, es un motor siemens que hace parte de los equipos de la (CIC).este motor nos ayuda a darle giro a la tubería.

**FIGURA 57. MOTOR SIEMENS**



Fuente: Autores

### 6.1.2 Variador de frecuencia.

Este variador de frecuencia muchas veces llamado variador de velocidad, es un sistema para el control de la velocidad rotacional del motor por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrado al motor. Los variadores de la frecuencia son también conocidos como drivers de frecuencia ajustable (AFD) o micro drivers o inversores. Dado que el voltaje es variado a la vez que la frecuencia.

**FIGURA 58. VARIADOR DE FRECUENCIA**



Fuente: Autores

### **6.1.3 Tubería con dos tapas.**

Esta parte del banco de pruebas es muy importante puesto que en ella se va a simular la pared interna de la tubería que va a estar en contacto con el brazo articulado. La cual consta de una tubería con un diámetro nominal de 18 in con un espesor de  $\frac{3}{4}$  in y longitud de 20 cm, se aplica un cordón de soldadura longitudinal en la parte externa de la tubería y así se simular una situación aproximada a la realidad del cordón presente en la tubería internamente. A esta rueda se le realiza un sistema dentado en la parte exterior, sincrónica con la correa de transmisión.

**FIGURA 59 TUBERÍA CON DOS TAPAS**



Fuente: Autores

#### **6.1.4 Piñón de arrastre.**

Es la rueda dentada más pequeña que esta acoplada al eje del piñón, tiene un sistema de dentado que va sincrónica con la de la correa de transmisión.

**FIGURA 60. PIÑÓN DE ARRASTRE**



Fuente: Autores

### **6.1.5 Correa sincrónica**

Correa sincrónica o correa de distribución, es una banda dentada la cual sirve para la transmisión de la energía mecánica entre un piñón de arrastre y otro arrastrado mediante un sistema dentado mutuo que posee tanto la correa como los piñones, impidiendo su deslizamiento mutuo. En nuestro caso la correa va acoplada desde el piñón de arrastre a la tubería, hay que tener en cuenta que a la tubería se le ha realizado un mecanizado el cual consiste en dentar su parte exterior sincrónicamente con la correa.

### **FIGURA 61 CORREA SINCRÓNICA**



Fuente: Autores

### **6.1.6 Mesa para la ubicación de todos los componentes**

La mesa de trabajo consta de una lámina de acero A 36 de 5 mm de espesor y perfiles cuadrados de 5 mm, se anexa planos

**FIGURA 62. MESA PARA LA UBICACIÓN DE TODOS LOS COMPONENTES**



Fuente: Autores

### **6.1.7 Brazo articulado.**

El brazo articulado se encuentra ubicado en la parte inferior del banco, su parte inferior está anclada a la parte inferior del banco y su barra de sensores va en contacto con la tubería.

**FIGURA 63 BRAZO ARTICULADO.**



Fuente: Autores

### 6.1.8 Imu 9 DOF (acelerómetro, giroscopio, magnetómetro).

Mini-Imu digital de 9 grados de libertad integrado por acelerómetro magnetómetro LSM303DLM y giróscopo L3G4200D en una sola board, cada variable medida tiene 3 grados de libertad obteniendo un total de nueve, la comunicación se hace por medio de una interfaz serial I2C por la cual se pueden obtener los datos medidos de Aceleración, medición de campo magnético y Rotación, además integra los reguladores necesarios para permitir una operación con rango de voltaje desde 2.6V a 5.5V [8],

La información técnica de los sensores las podemos encontrar EL ANEXO I

**FIGURA 64. IMU 9 DOF (ACELERÓMETRO, GIROSCOPIO, MAGNETÓMETRO).**

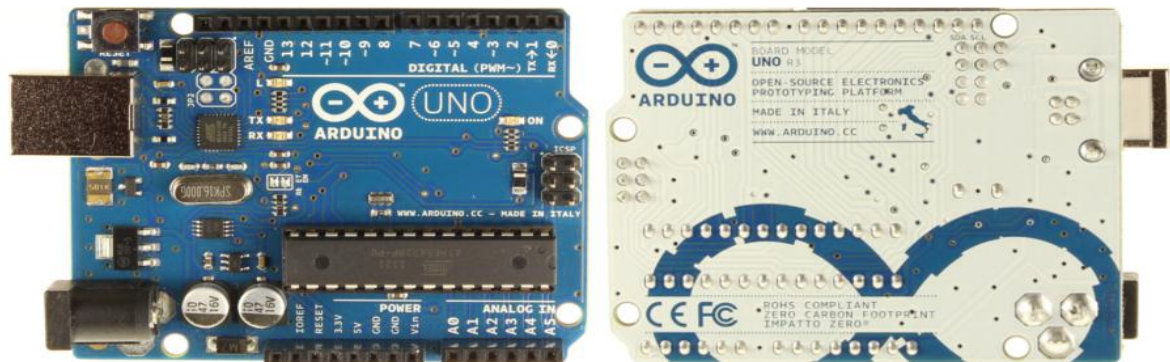


Fuente:<http://www.dynamoelectronics.com>

### 6.1.9 Tarjeta Arduino UNO (microcontrolador ATmega 328).

Arduino Uno es una placa electrónica basada en el ATmega328 (datasheet). Cuenta con 14 entradas / salidas digitales pines (de las cuales 6 se puede utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reset. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador, basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder con un adaptador de CA a CC o batería para empezar [9].

**FIGURA 65 TARJETA ARDUINO UNO (MICROCONTROLADOR ATMEGA 328)**

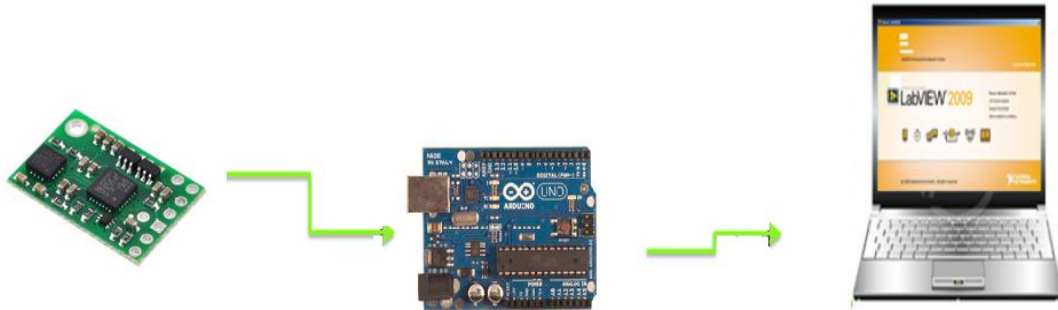


Fuente: <http://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

### 6.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El esquema del sistema de adquisición de los datos usado en las pruebas en laboratorio del mecanismo brazo articulado del marrano inteligente ITION-E se puede observar en la figura 66.

**FIGURA 66 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**



Fuente: Autores

La tarjeta de sensores *Pololu MiniIMU 9DOF* está equipada con dos módulos principales que son el sensor LSM303DLM (Acelerómetro de 3 ejes y Magnetómetro de 3 ejes) y el sensor L3G4200D (Giroscopio de 3 ejes). La comunicación de los sensores se realiza bajo protocolo I2C usando los pines de conexión de la tarjeta *Pololu MiniIMU 9DOF*. Las características principales de los sensores son:

### **6.2.1 Características del sensor LSM303DLM (acelerómetro 3 ejes y magnetómetro 3 ejes)**

- \*3 canales para detección de campo magnético.
- \*3 canales para detección de aceleración.
- $\pm 1.3$  a  $\pm 8.1$  gauss en escala de campo magnético.
- tres escalas dinámicas de aceleración ( $\pm 2$  g/ $\pm 4$  g/ $\pm 8$  g).
- Interfaz I2C.
- \*Detección de orientación en 6D.

### 6.2.2 Características del sensor L3G4200D (giroscopio de 3 ejes)

- \*3 canales para detección de velocidad angular.
- \*Tres escalas de velocidad angular 250/500/2000 grados por segundo.
- \*interfaz I2C y SPI.
- \*Filtros pasa altos y pasa bajos integrados.
- \*Alta resistencia a impactos.

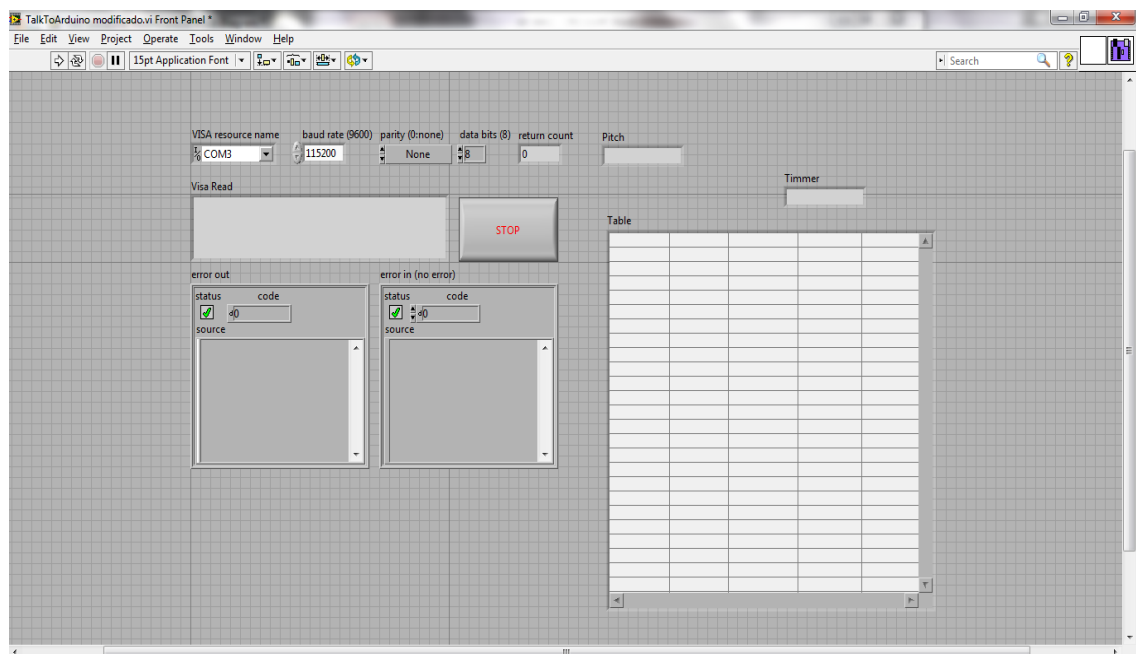
Para poder leer los datos de los sensores de la tarjeta *Pololu MiniIMU 9DOF* se utiliza la tarjeta *Arduino Uno* programada con el código *MinIMU-9-Arduino-AHRS* desarrollado por Kevin Chang (cofundador de *Pololu Robotics and Electronics*), el cual es distribuido de forma gratuita por *Pololu Robotics and Electronics* que es la empresa que fabrica y distribuye la tarjeta de medición inercial *Pololu MiniIMU 9DOF*. El código (que esta incluido en el anexo I) se puede descargar de forma gratuita de la página de internet <https://github.com/pololu/MinIMU-9-Arduino-AHRS> y esta sujeto a la *Licencia Pública General Reducida de GNU*, o más conocida por su nombre en [inglés](#) *GNU Lesser General Public License*, la cual permite el uso, reproducción, modificación o distribución total o parcial de todo software amparado por ella.

El código *MinIMU-9-Arduino-AHRS* permite la interfaz I2C entre la tarjeta *Arduino Uno* y la tarjeta de sensores *Pololu MiniIMU 9DOF* pudiendo obtener de esta manera las diferentes magnitudes censadas. El programa adicionalmente calcula los ángulos de Euler, los cuales constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos. Es decir, que este programa brinda información acerca de la rotación de los ejes propios de la tarjeta con referencia a los ejes globales del sistema. Como el brazo articulado está restringido a moverse en el plano X-Z, los valores de los ángulos *Yaw* y *Roll* (correspondientes al eje Z y X de la tarjeta) fueron restringidos en el programa.

Esto quiere decir que el programa es forzado a asumir que no existe ninguna rotación en estos ejes y a su vez esto hace que el programa sea más estable, ya que aunque el mecanismo esta restringido a moverse como se menciono anteriormente, los sensores son bastante sensibles y registran pequeñas variaciones que terminarían acumulando un gran error en el programa.

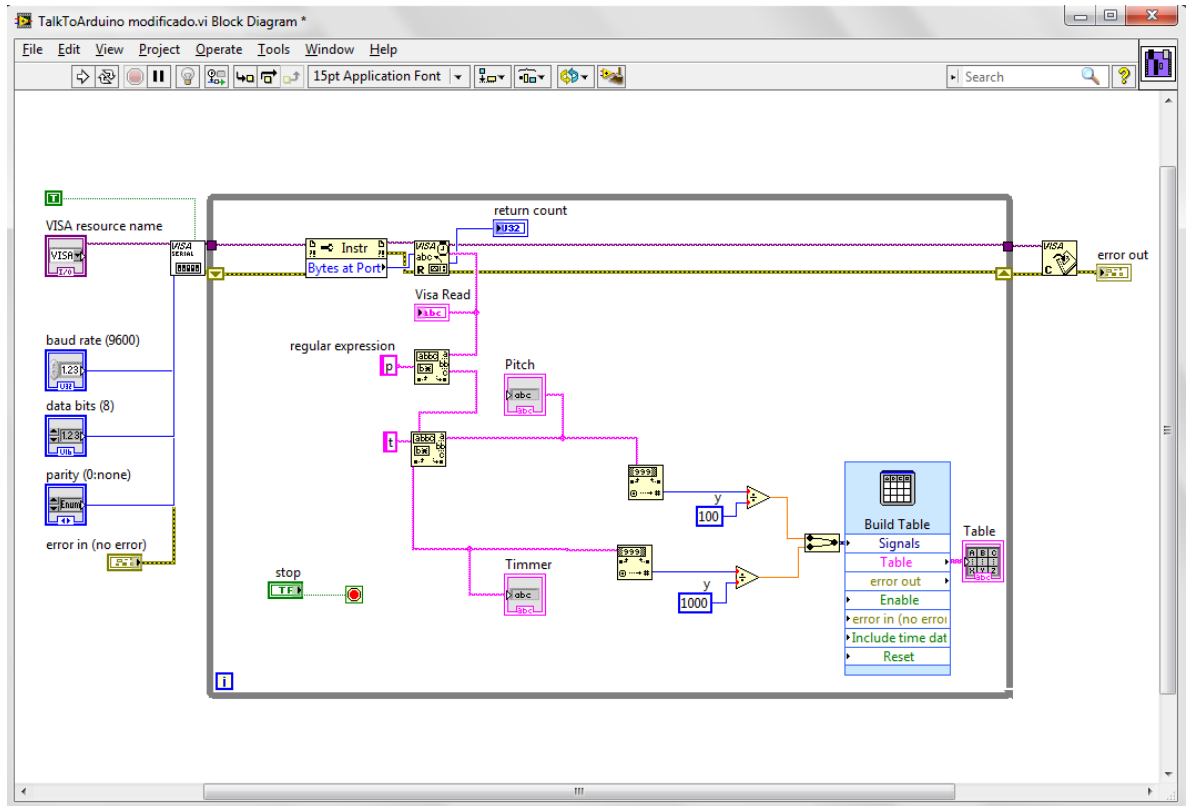
Para el registro de los datos calculados por el programa *MiniIMU-9-Arduino-AHRS* se utilizó el software de adquisición y procesamiento de datos por programación gráfica (o de bloques) *LabView* con una programación que permitía la comunicación a través del puerto USB (COM3) del computador con el puerto USB de la tarjeta *Arduino*. En la figura 67 se puede observar la ventana frontal del programa en *LabView* y en la figura 68 se observa la ventana de bloques del programa.

**FIGURA 67 VENTANA FRONTAL DEL PROGRAMA EN LABVIEW**



Fuente: Autores

**FIGURA 68 VENTANA DE BLOQUES DEL PROGRAMA.**



Fuente: Autores

Los bloques contenidos en el recuadro gris del diagrama de bloques (figura 68) son la parte de la programación que separa la cadena de datos que es leída en el puerto y los almacenan en la tabla que se observa en el panel frontal (figura 67). Los bloques a la izquierda del recuadro gris se usan para configurar el protocolo de comunicación del puerto. Los bloques a la derecha del recuadro gris detectan cuando el último carácter de la cadena fue leído y cierran la sesión del puerto, dejando el programa listo para recibir la siguiente línea. De esta forma se pueden registrar los datos obtenidos durante las pruebas y guardar las tablas obtenidas en *Excel*.

### **6.3 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS**

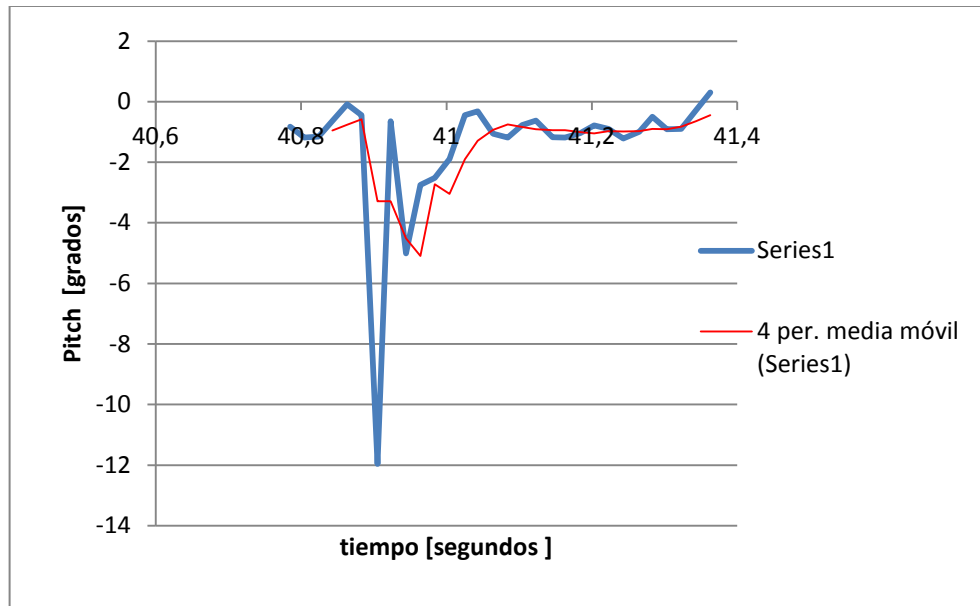
Las pruebas al comportamiento del mecanismo brazo articulado fueron llevadas a cabo en el banco de pruebas construido y dispuesto para esto en el taller de la CIC, donde se comprobó el correcto funcionamiento del brazo articulado y la recuperación del mismo al pasar por una soldadura.

Las prueba consiste en hacer girar la tubería del banco de pruebas mientras el mecanismo brazo articulado se encuentra en contacto directo con la misma. Las velocidades relativas del mecanismo brazo articulado respecto a la tubería fueron 1.5 m/s, 2,25 m/s y 3 m/s. Se realizaron tres tomas de 3 minutos para cada una de las velocidades relativas. En cada prueba realizada se hizo un seguimiento de los datos de interés como lo fueron el tiempo y el ángulo Pitch de la barra de sensores, llevando un registro numérico exportado a Excel para verificar el comportamiento mediante el análisis de las gráficas, el cual se presenta más adelante en este capítulo.

### **6.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS**

De los datos obtenidos en las pruebas se pueden identificar cinco tipos de gráficos que se presentan, en mayor o menor medida, en todas las pruebas individuales a las tres velocidades de muestreo. Estos gráficos se presentan a continuación.

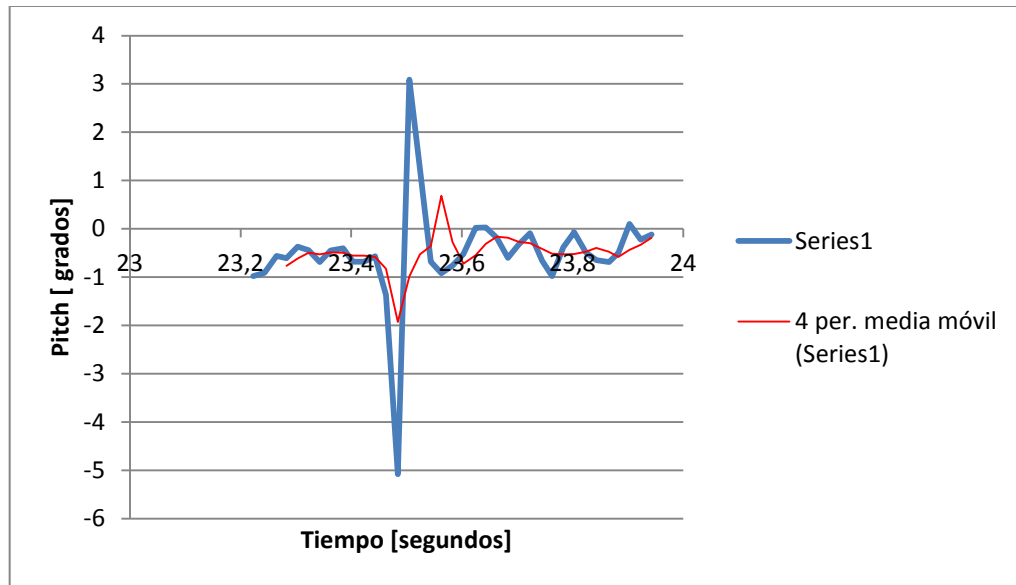
**FIGURA 69 GRAFICA TIPO 1**



Fuente: Autores

La gráfica tipo 1 (figura 69) es la gráfica que idealmente debería encontrarse ya que presenta un pico pronunciado cuando se presenta el impacto, luego un perfil oscilatorio durante la estabilización y finalmente un comportamiento inicial y final con tendencia estable y de características similares en su magnitud. Aunque este tipo de gráficas se presentan en todas las tomas a las tres velocidades de prueba, tienden a ser escasas a velocidades superiores, ya que el tiempo entre impactos es menor y por lo tanto el tiempo que tiene el sensor para realizar la corrección de su posición es insuficiente, lo cual genera una acumulación de error en las lecturas que desplaza las gráficas en la dirección del error.

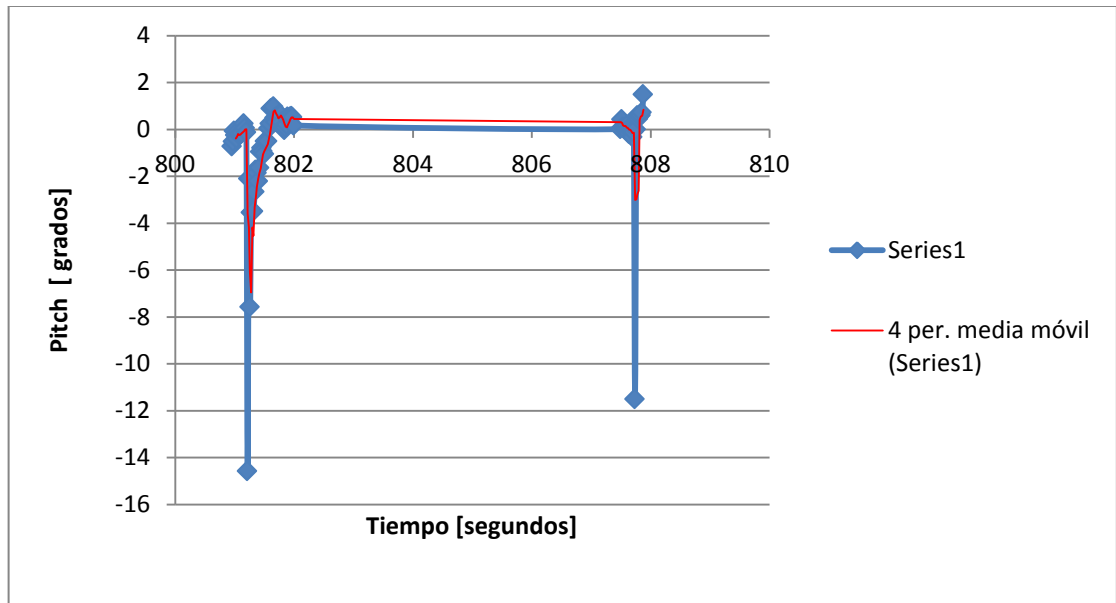
**FIGURA 70 GRAFICA TIPO 2**



Fuente: Autores

La gráfica tipo 2 (figura 70) presenta dos picos marcados en direcciones opuestas (Negativo y Positivo). Los valores positivos corresponden a una lectura errónea del sensor ya que es imposible que el brazo se desplace en esta dirección. Esto se puede atribuir a la forma en la que trabaja el programa *MinIMU-9-Arduino-AHRS* ya que al usar los datos de los acelerómetros para realizar la corrección de la orientación del sensor, es propenso a desviar el valor de la orientación real del sensor cuando experimenta una desaceleración fuerte al impactar con la pared de la tubería.

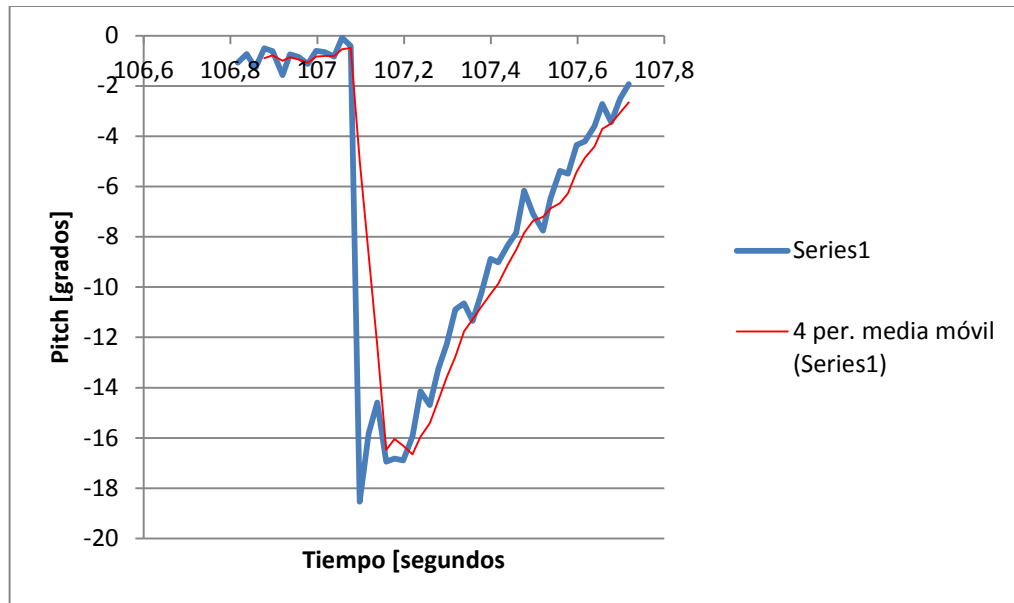
FIGURA 71. GRAFICA TIPO 3



Fuente: Autores

En la gráfica tipo 3 (figura 71) se observa una línea recta bastante marcada en la gráfica. Esto puede atribuirse a un error de comunicación entre el sensor y la tarjeta *Arduino Uno* o entre la tarjeta *Arduino Uno* y el programa de *LabView*. Este error de comunicación produce zonas muertas en los datos ya que durante un periodo determinado de tiempo no se pudieron registrar los valores de Angulo pitch y/o tiempo. Cabe resaltar que la variable del tiempo es calculada por el *Arduino Uno* de forma automática en un segundo plano del programa principal y por esta razón es que se presentan estas zonas muertas, por que como el *Arduino Uno* nunca dejo de calcular el tiempo de ejecución, al reanudarse la comunicación ya ha transcurrido un tiempo que fue registrado por el *Arduino Uno*.

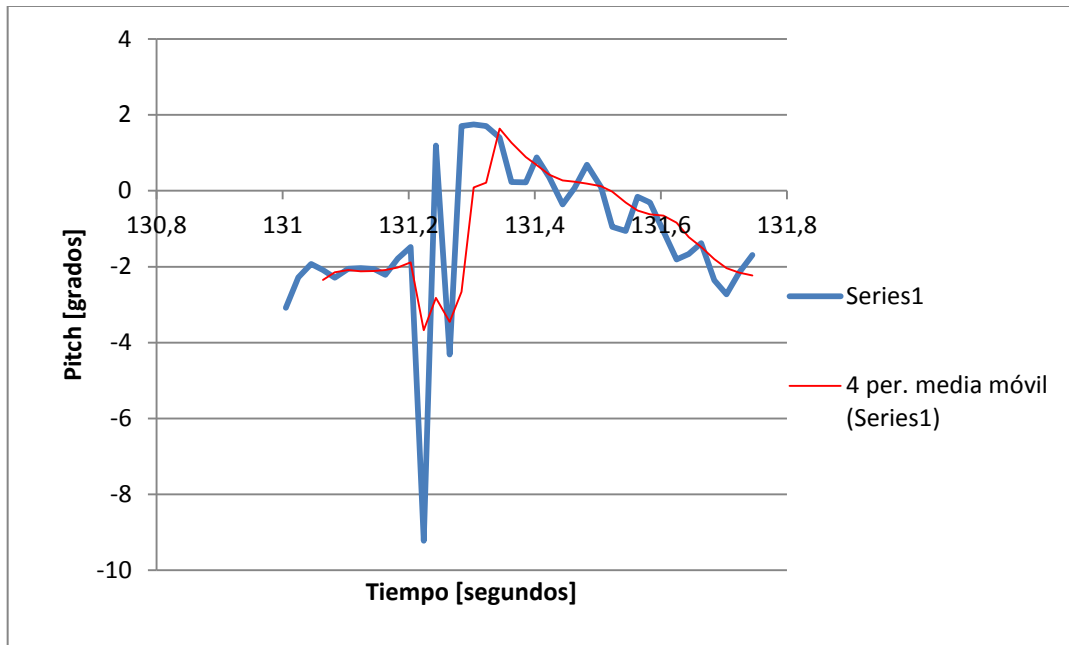
**FIGURA 72. GRAFICA TIPO 4**



Fuente: Autores

Otro tipo de gráfica encontrada es la que corresponde a la figura 72, en la que se observa el comportamiento inicial del impacto pero después el valor no desciende de forma rápida ni oscilatoria. Esto puede atribuirse a un error de cálculo en el programa *MinIMU-9-Arduino-AHRS* ya que aunque el sensor puede haber registrado todos los impactos, el programa corre en un ciclo de 50Hz y si los impactos ocurren de forma rápida puede que el programa solo registre los valores de los picos, lo que daría lugar a un comportamiento como el de la gráfica de la figura 70.

**FIGURA 73 GRAFICA TIPO 5**



Fuente: Autores

Por último tenemos la grafica de la figura 73, en la que se puede observar la acumulación del error que se presenta en las pruebas. Se observa que el inicio de la grafica esta cerca a un valor de -2, cuando sucede el impacto la gráfica presenta el comportamiento oscilatorio característico y tiende a cero. Pero después se observa que la gráfica tiende de nuevo a -2. Esto se puede atribuir al error acumulado en las mediciones del programa, el cual desplaza la posición estable del sensor y es por esto que las gráficas obtenidas hacia el final de la prueba tienden a discernir a las gráficas al inicio de la prueba en su valor de estabilización.

## 6.5 CONCLUSIONES DE LAS PRUEBAS

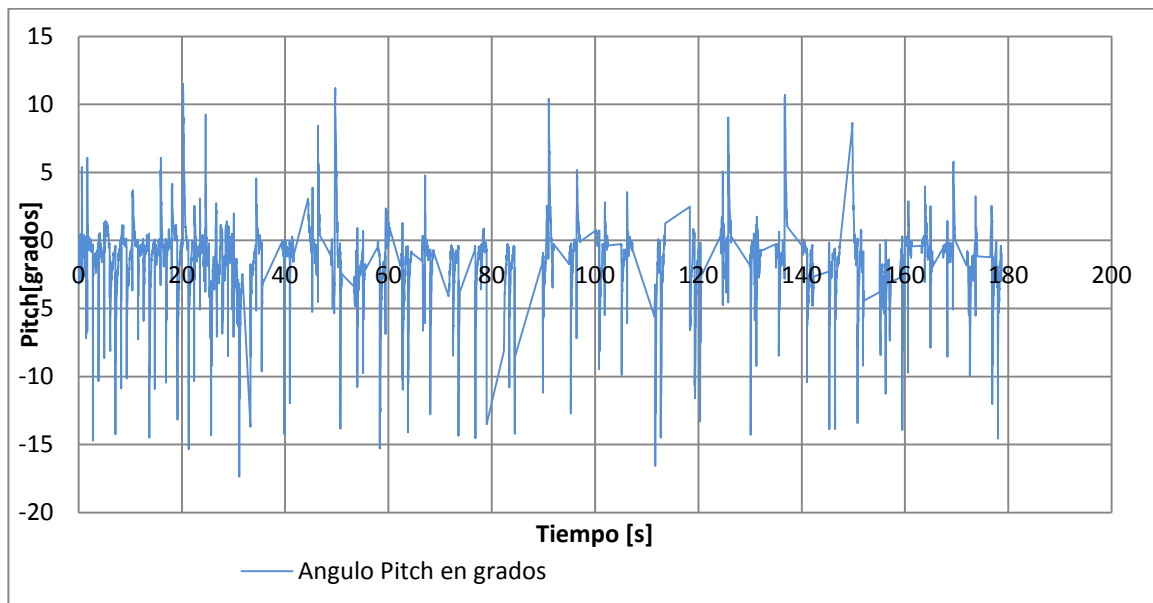
De manera general se puede concluir que aunque se pueden estimar tiempos de estabilización para todas las pruebas, las magnitudes de los ángulos máximos registrados pueden no coincidir con la magnitud real de los mismos. Esto debido a los diferentes errores de medición que se pudieron inferir de las gráficas analizadas.

A continuación se darán conclusiones específicas de las pruebas hechas a las diferentes velocidades (1.5 s/s, 2.25 m/s, 3 m/s).

### 6.5.1 Conclusiones Pruebas a 1,5 m/seg

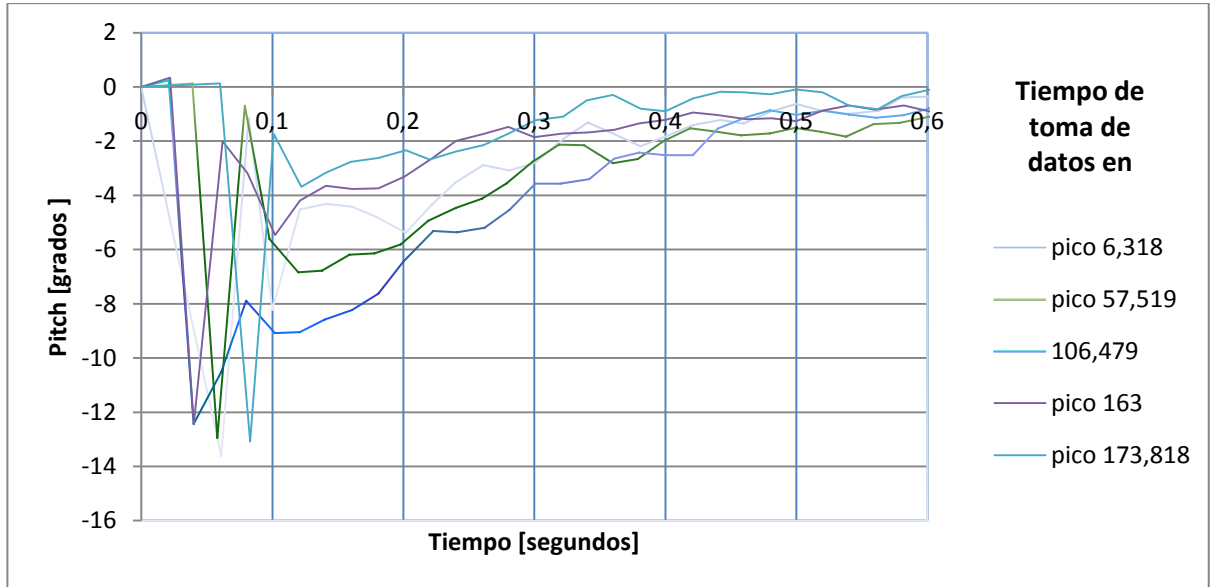
En la figura 74 observamos el comportamiento del brazo articulado durante la prueba realizada en el banco de pruebas.

**FIGURA 74.COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PRUEBA 1.5 M/S**



Fuente: Autores

**FIGURA 75. PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 1.5 M/S**



Fuente: Autores

En la figura 75 se presentan las gráficas de varios impactos producidos por el paso de la herramienta por una soldadura. Estos impactos fueron tomados en valores cercanos a 10, 50, 90, 130 y 170 segundos para todas las pruebas. Las series se nombran con el valor inicial del tiempo que corresponde a la gráfica original para cada una de las tomas.

Observando el comportamiento de las diferentes series y teniendo en cuenta las gráficas tipo mencionadas en la sección anterior podríamos decir que el valor del tiempo de asentamiento es de alrededor 0,2 segundos para esta primera toma, ya que alrededor de este valor todas las líneas adquieren un comportamiento similar.

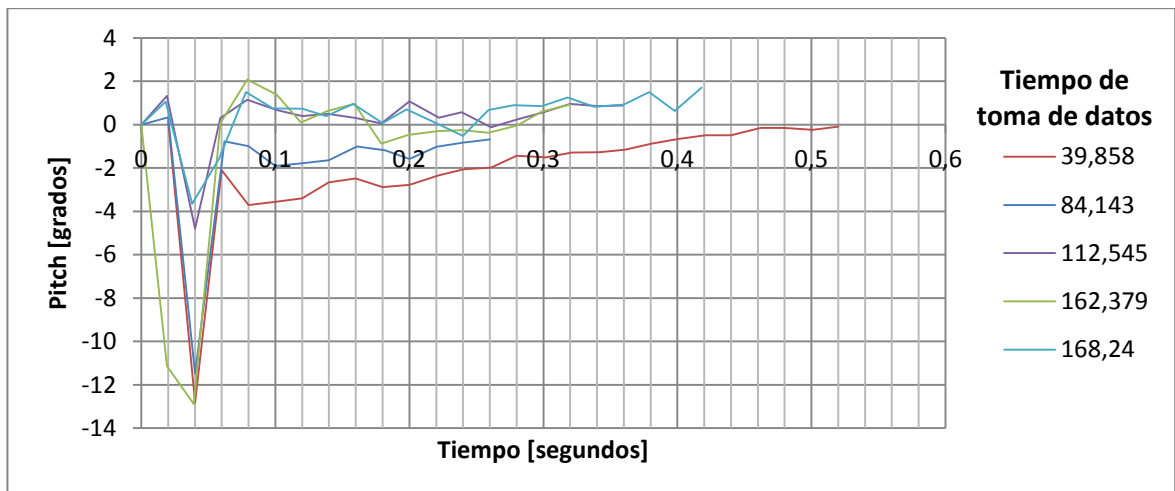
**FIGURA 76. SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 1.5 M/S**



Fuente: Autores

Para esta gráfica también se puede observar un tiempo de asentamiento de alrededor de 0,2 s.

**FIGURA 77 Tercera toma de comportamiento del brazo articulado a velocidad de 1.5 m/s**



Fuente: Autores

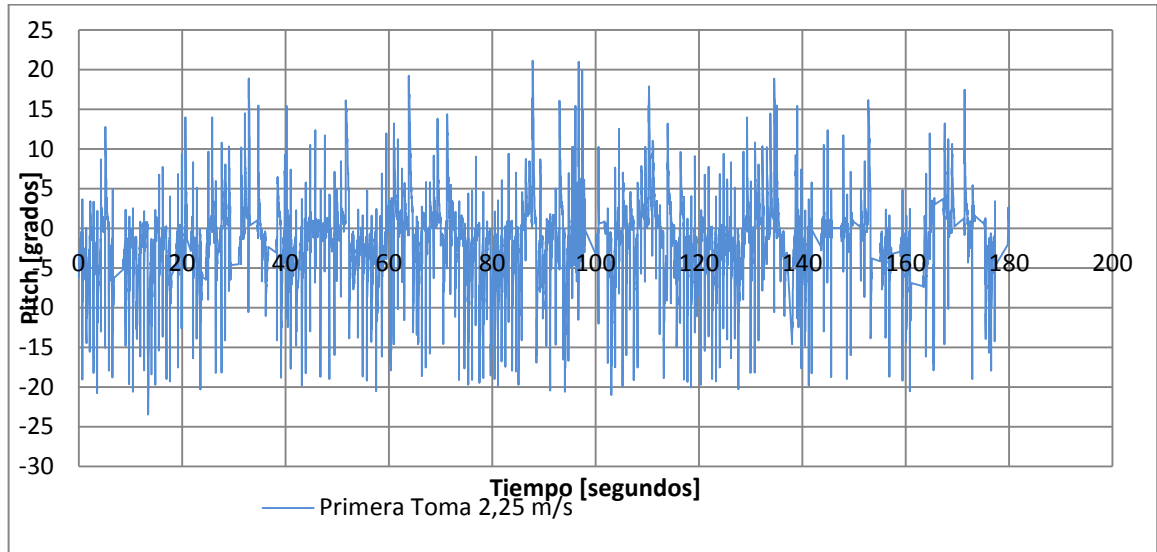
Observamos que la estabilización de esta gráfica se encuentra cercana a 0,15 segundos.

En conclusión de la prueba de 1.5 m/s se puede decir:

- Se presentan de manera menos frecuente valores positivos de gran magnitud.
- Se observó un comportamiento más estable en las gráficas de las pruebas a esta velocidad ya que al ser esta la velocidad mas baja tiene un lapso de tiempo mayor entre impactos lo que permitiría una corrección más adecuada del valor del Angulo por parte del programa *MinIMU-9-Arduino-AHRS*.
- Se observa que para la mayoría de las gráficas que coinciden con la grafica tipo 1, se presentan uno o dos picos antes de estabilizarse.
- Aunque la magnitud registrada puede no coincidir con la magnitud real se observa que el valor de desplazamiento máximo esta alrededor de  $-15^\circ$  durante toda la prueba.
- Se encuentran valores de estabilización cercanos a 0,15 y 0,2 segundos, por lo que se puede decir que el tiempo de estabilización es de alrededor de 0,18 s.

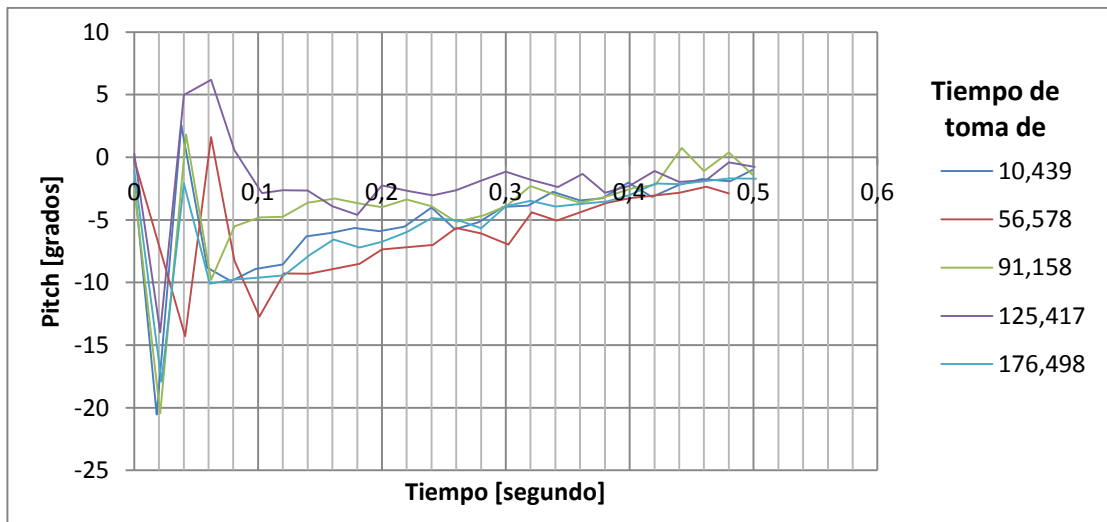
## 6.5.2 Conclusiones Pruebas a 2,25 m/seg

**FIGURA 78 COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PRUEBA DE 2,25 M/S**



Fuente: Autores

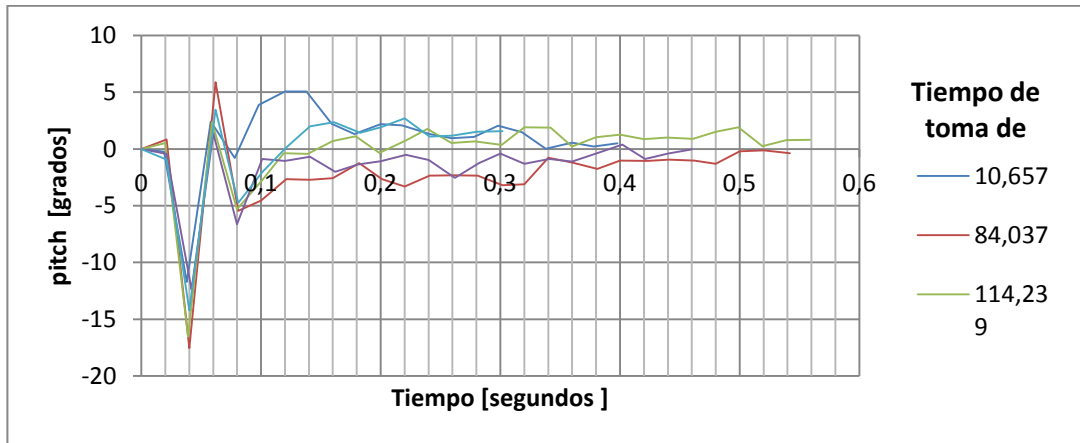
**FIGURA 79 PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 2,25 M/S**



Fuente: Autores

Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,25 segundos.

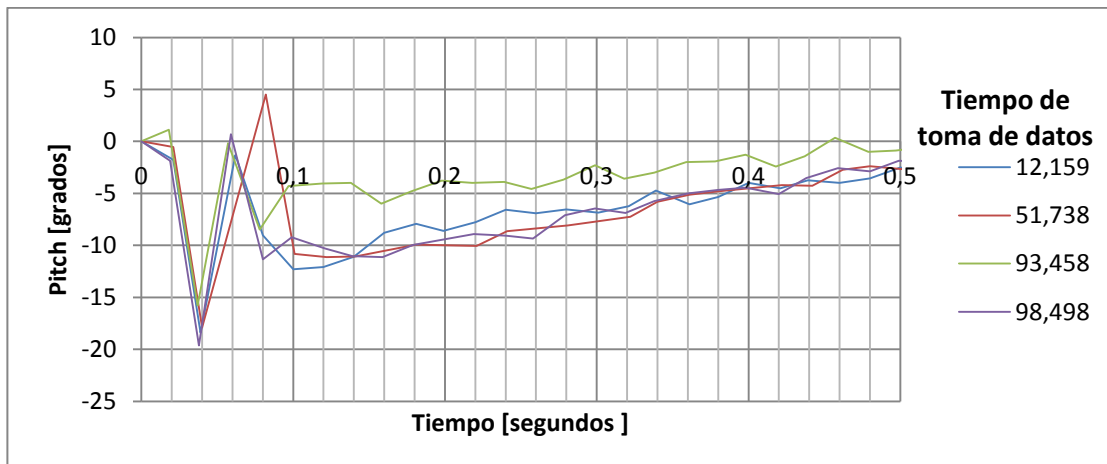
**FIGURA 80 SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 2,25 M/S**



Fuente: Autores

Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,18 segundos.

**FIGURA 81 Tercera toma de comportamiento del brazo articulado a velocidad de 2,25 m/s**



Fuente: Autores

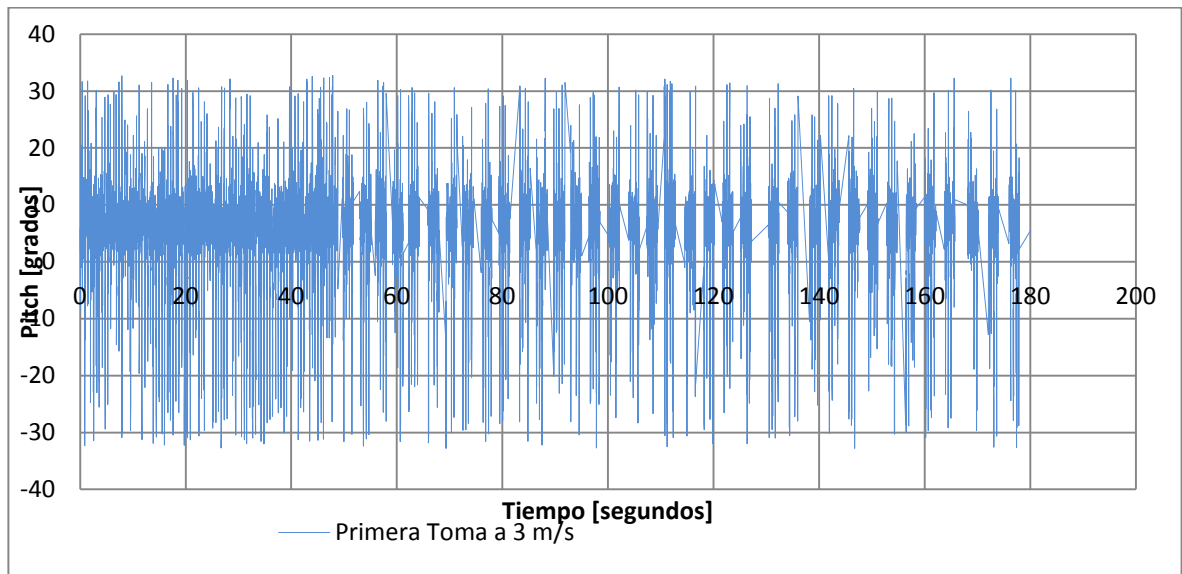
Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,25 segundos.

En conclusión de la prueba de 2.25 m/s se puede decir:

- Se presentan de manera más frecuente valores positivos de gran magnitud .
- Se observan menos tiempos muertos en los datos.
- Aunque la magnitud registrada puede no coincidir con la magnitud real, se observa que el valor de desplazamiento máximo esta alrededor de  $-20^\circ$  durante toda la prueba.
- Se observa que para la mayoría de las gráficas que coinciden con la gráfica tipo 1, se presentan de dos a tres picos antes de estabilizarse. Aunque la mayoría de las gráficas que exhiben este comportamiento también presentan picos de valores positivos como los descritos en las graficas tipo 2.
- Se encuentran valores de estabilización cercanos a 0,18 y 0,25 segundos respectivamente, se puede decir que el tiempo de estabilización es de alrededor de 0,23 s.

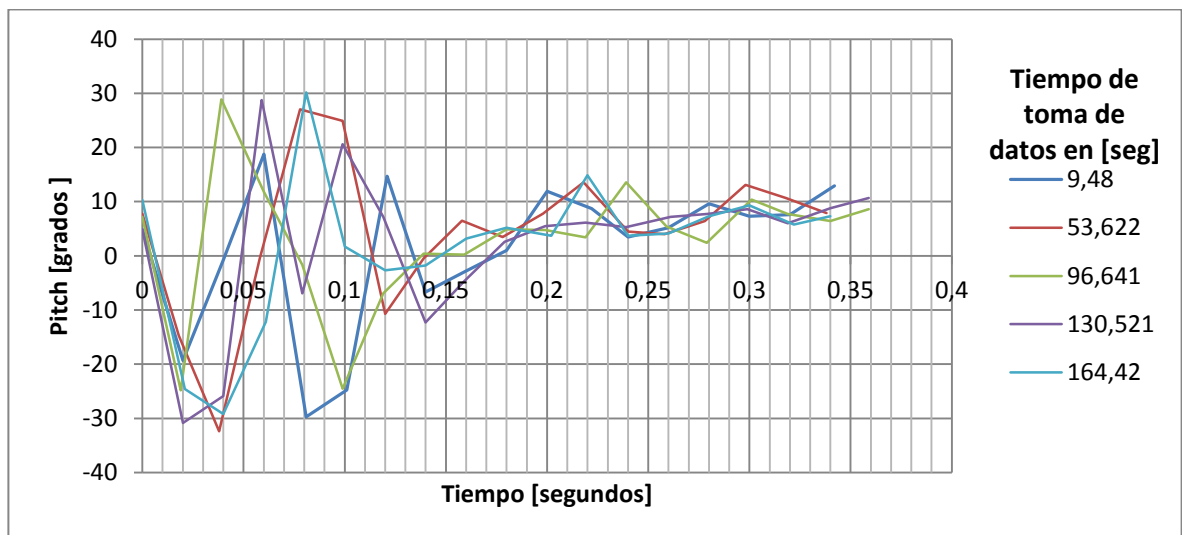
### 6.5.3 Conclusiones Pruebas a 3 m/seg

**FIGURA 82 COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO PARA LA PRIMERA TOMA A 3 M/S**



Fuente: Autores

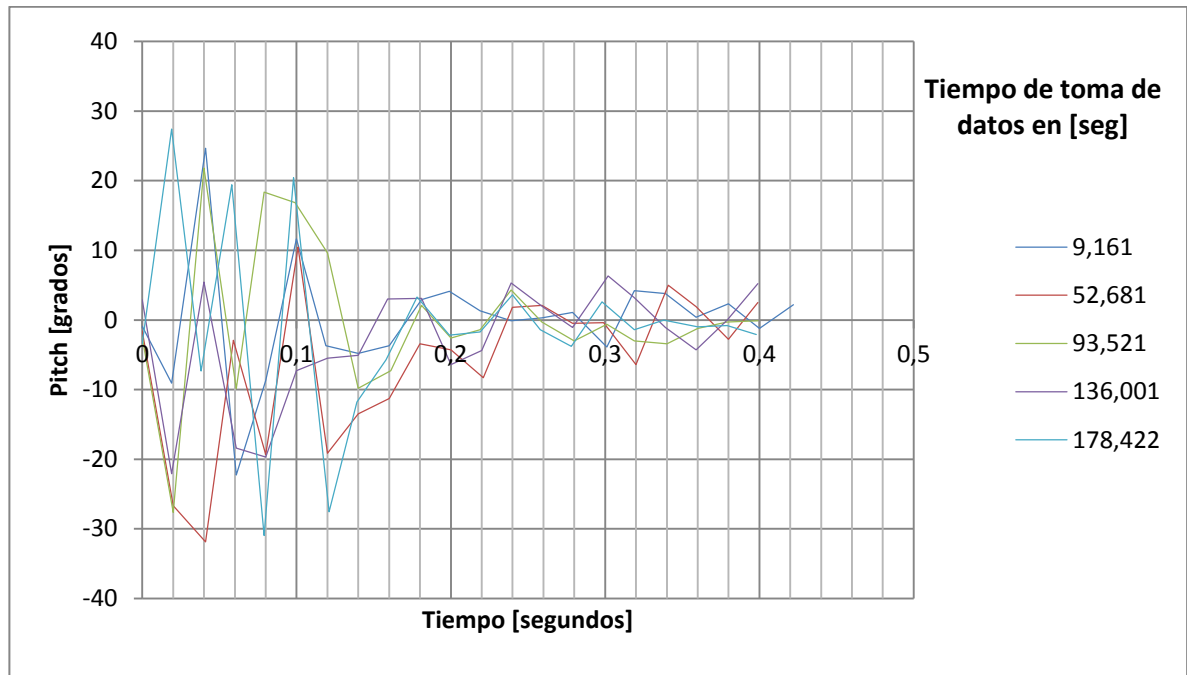
**FIGURA 83 PRIMERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S**



Fuente: Autores

Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,25 segundos.

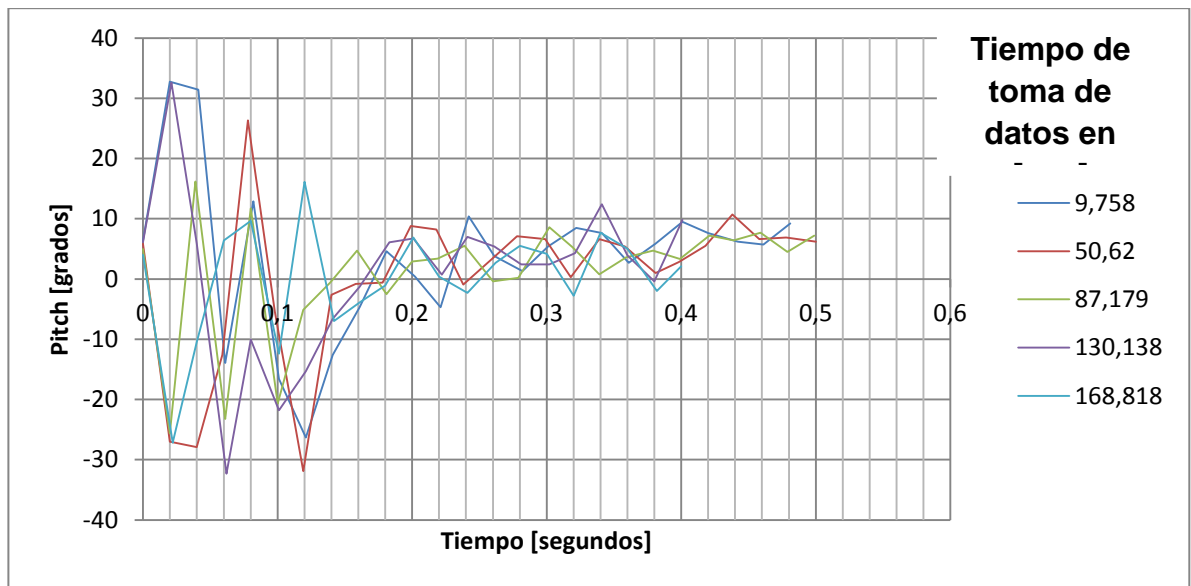
**FIGURA 84 SEGUNDA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S**



Fuente: Autores

Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,28 segundos.

**FIGURA 85 TERCERA TOMA DE COMPORTAMIENTO DEL BRAZO ARTICULADO A VELOCIDAD DE 3 M/S**



Fuente: Autores

Se observó que la estabilización de esta grafica se encuentra cercana a 0,3 segundos.

En conclusión de la prueba de 3 m/s se puede decir:

- Se presentan valores positivos de gran magnitud a lo largo de todas las gráficas.
- Se observan menos tiempos muertos en la primera parte de las gráficas (antes del segundo 50 de las pruebas).
- Aunque la magnitud registrada puede no coincidir con la magnitud real se observa que el valor del desplazamiento máximo esta alrededor de  $-30^\circ$  durante toda la prueba.

- Se encuentran pocas gráficas tipo 1. La mayoría de las gráficas presentan oscilaciones marcadas en entra valores negativos y positivos.
- Se encuentran valores de estabilización a 0.25, 0.28 y 0.3 segundos por lo cual se puede decir que el tiempo de estabilización es alrededor de 0,28 s. Lo cual es superior al tiempo obtenido en la simulación del capítulo 3 que fue de alrededor de 0,18 s.

## CONCLUSIONES

- Basados en el estudio del mecanismo y en las pruebas realizadas, se observó que este cumple con los requerimientos de distancia mínima y paralelidad a la pared de la tubería.
- Los puntos de contacto, que están hechos de poliuretano de alta densidad, sufren poco desgaste, como se evidenció al evaluar las superficies después de las pruebas realizadas.
- El aluminio es la opción más económica para la construcción de los mecanismos brazo articulado no solo por su precio sino también por presentar buenas características mecánicas, resistencia a la corrosión, fácil mecanizado y no ser ferromagnético
- El mecanismo se diseño de acuerdo a las dimensiones especificadas (20X10X10 cm) y sus medidas pueden ser modificadas fácilmente para acomodarse a otras dimensiones, lo que permite definir diferentes configuraciones de la herramienta ITION-E.
- Los puntos de contacto elevados probaron ser de vital importancia para el mecanismo no solo por funcionar como seguidores de la pared interna de la tubería sino también porque son, en la mayoría de los casos, la primera parte del mecanismo que impacta con obstáculos presentes en la tubería ayudando así a salvaguardar la integridad de los sensores ubicados en la barra menor.

- Usando resortes de constante 4 KN/m para el resorte de extensión y de 2.2 N-m/rev para el resorte de torsión, puede esperar tiempos de estabilización del mecanismo brazo articulado inferiores a 0.5 s, como se evidencio en las pruebas. Lo cual significaría una distancia máxima de alrededor de 1,5m de lecturas no estándar realizadas por los sensores, posterior al impacto con una soldadura.
- Los mecanismos pueden pasar obstáculos muchos mayores a los máximos esperados durante una corrida del marrano ITION-E sin que los mismos golpeen el cuerpo del marrano, lo que contribuye a reducir el riesgo de atascamiento de la herramienta.

## RECOMENDACIONES

- El diseño de los resortes del prototipo fue diseñado para alambre estirado en frío con un factor de seguridad relativamente bajo (1.4) debido a que el prototipo era para pruebas en laboratorio. Para los resortes que serían utilizados en el marrano ITION-E se recomienda usar como material alambre de piano, el cual presenta una mayor resistencia y resultaría en un factor de seguridad más alto el cual es imperativo en un dispositivo que trabaja en un entorno tan peligroso.
- De igual manera se recomienda que el resorte de extensión tenga orejas cerradas y que se realice un análisis de esfuerzos detallado en las mismas.
- Aunque de las pruebas se pudo inferir información acerca del tiempo de estabilización del mecanismo brazo articulado, estas no fueron concluyentes en la determinación de los desplazamientos a los que se ve sometido el mecanismo. Se recomienda realizar otro tipo de pruebas, como una prueba con cámaras de alta velocidad, las cuales puedan brindar mayor información acerca de lo que experimenta el brazo articulado durante un impacto real.
- Para el poliuretano que sería utilizado en el marrano ITION-E se recomienda usar un poliuretano más blando, puesto que el que se utilizó presentó fisuras por impacto después de las pruebas realizadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Jim Cordell, Pipeline PIGGING Handbook, 3ra edición, capítulo 14
- [2] , Brian Mirtich, PhD, Impulsebased Dynamic Simulation of Rigid Body Systems, Tesis 1996, capítulo 1.1.1
- [3]. , Mathew Moore ,Jane Wilhems, Collision Detection and Response for Computer Animation, Computer Graphics, Volume 22, Number 4, Agosto 1988
- [4]. C. Ulrich, Msc, Contact Mechanics using Green\_s Functions for Interactive Simulated environments, Tesis 1995, capítulo 2.4.3
- [5]. David Baraff, Non-penetrating Rigid Body Simulation, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, 1994
- [6]. Andrew Witkin Penalty Methods, , School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- [7]. . Robert L Norton, Diseño de Maquinas, Pretice Hall, 1999.
- [8] Dynamo electronics, IMU 9 DOF (Acelerómetro, Magnetómetro y giróscopo), disponible en : <http://www.dynamoelectronics.com/dynamo-tienda->

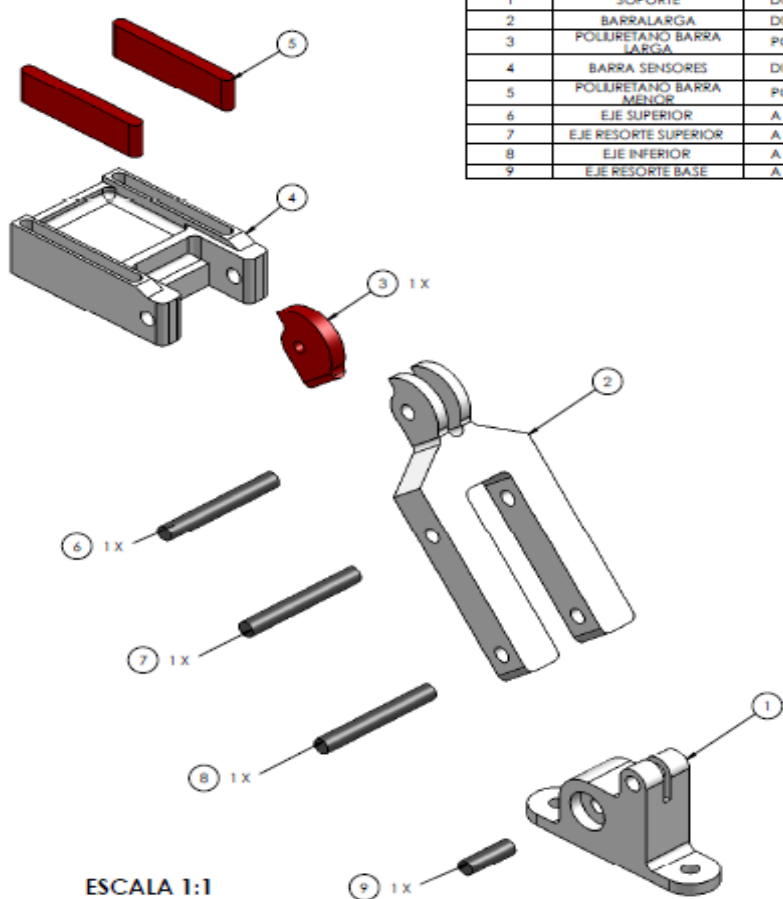
virtual.html?page=shop.product\_details&flypage=dynamo.tpl&product\_id=1004&category\_id=123

[9] Arduino, Arduino UNO, disponible en  
<http://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

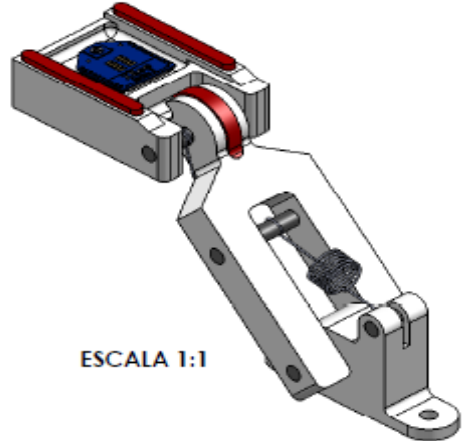
## **ANEXOS**

## ANEXO A DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO FLECTOR ARTICULADO


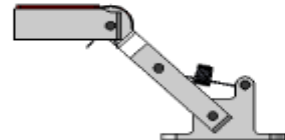
NUMERO	NOMBRE DE LA PIEZA	MATERIAL	NOTA
1	SOPORTE	DURALUMINIO	
2	BARRALARGA	DURALUMINIO	
3	POLIURETANO BARRA LARGA	POLIURETANO	
4	BARRA SENSORES	DURALUMINIO	
5	POLIURETANO BARRA MENOR	POLIURETANO	
6	EJE SUPERIOR	A INOXIDABLE	
7	EJE RESORTE SUPERIOR	A INOXIDABLE	
8	EJE INFERIOR	A INOXIDABLE	
9	EJE RESORTE BASE	A INOXIDABLE	



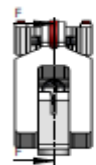
ESCALA 1:1



ESCALA 1:1

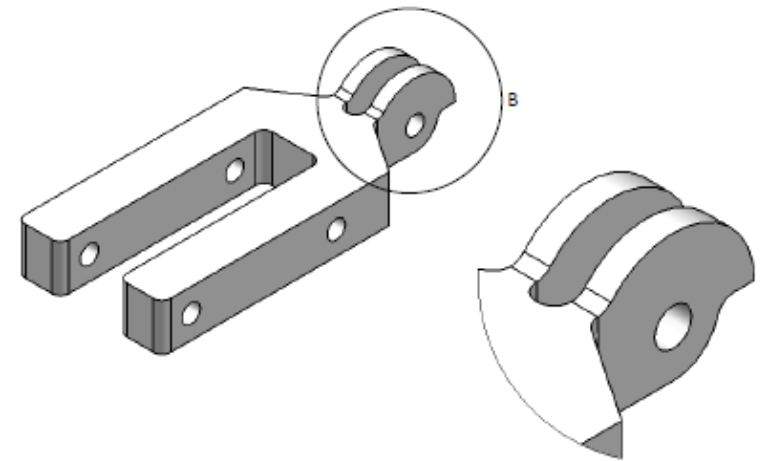
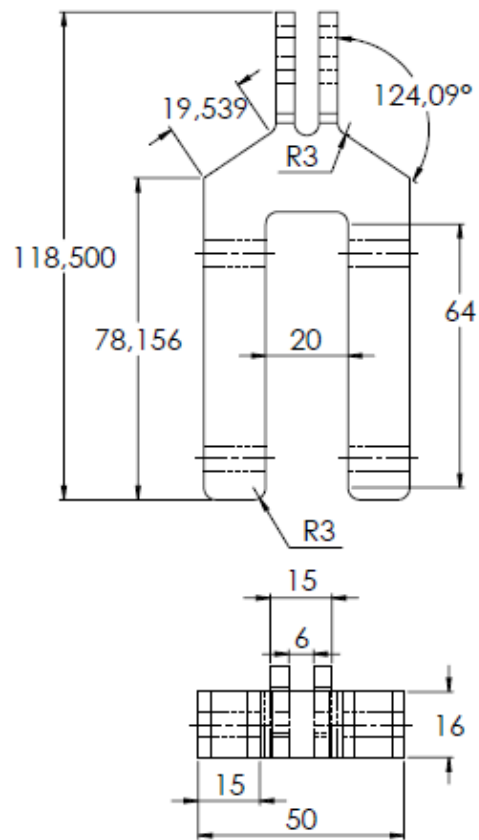



ESCALA 1:2

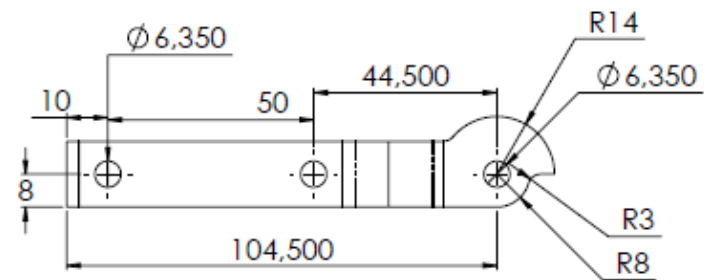


SECCIÓN F-F  
ESCALA 1:2

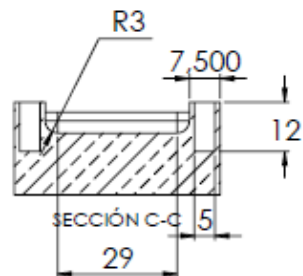
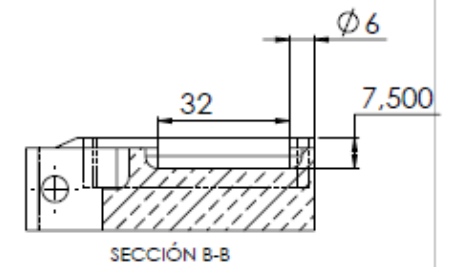
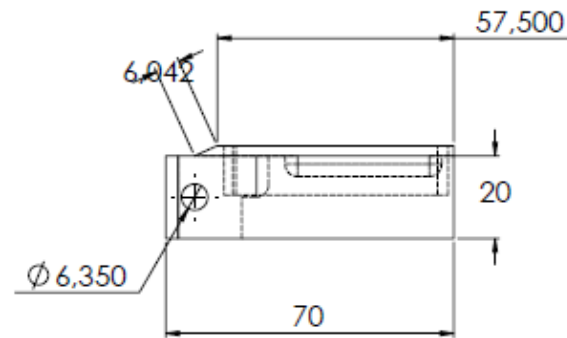
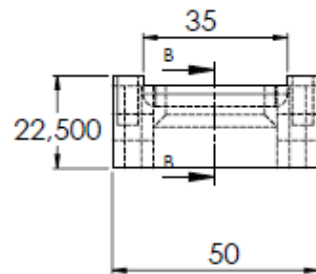
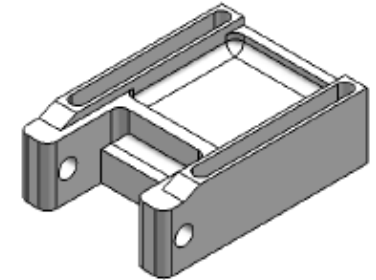
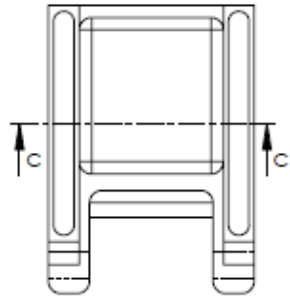
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		FACULTAD DE INGENIERIA		DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE SISTEMAS	
CARRERA DE INGENIERIA EN SISTEMAS DE TRANSPORTES		GRUPO ACADÉMICO DE INGENIERIA DE SISTEMAS DE TRANSPORTES		MATERIA DE MECANISMO	
AUTORES: ING. JUAN RODOLFO RODRIGUEZ E. ING. JUAN SEBASTIÁN RIZZO Y. ING. CARLOS BORGAS PINILLA		TÍTULO: DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MI) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS TIPO-S.		FECHA: 2023	
PROFESOR:		ASISTENTE:		MATERIA DE INGENIERIA	
TÍTULO:		FECHA:		PÁGINA 1 DE 1	



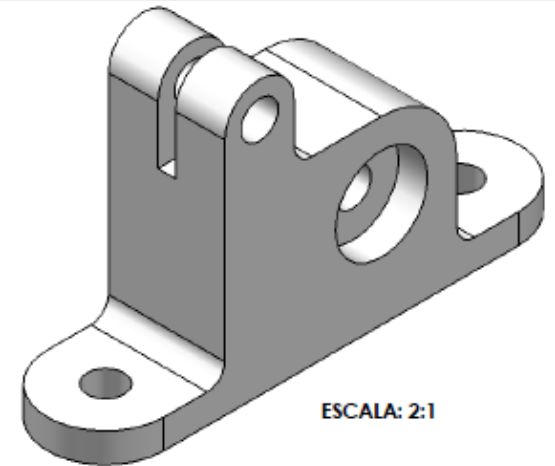
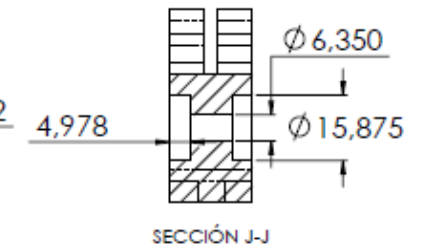
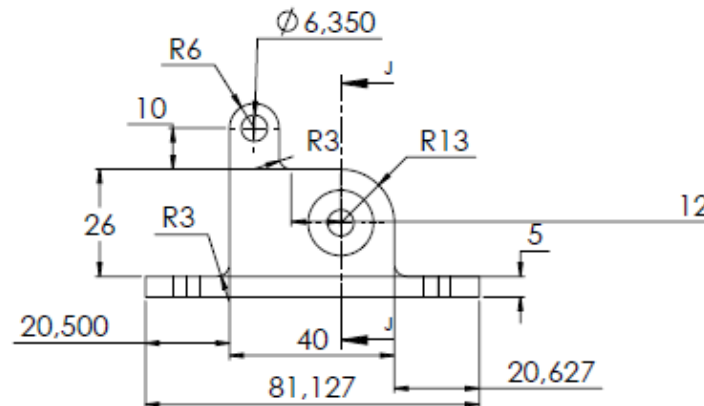
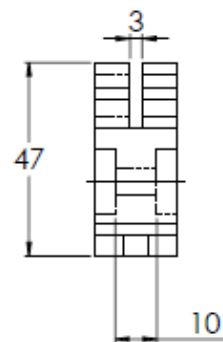
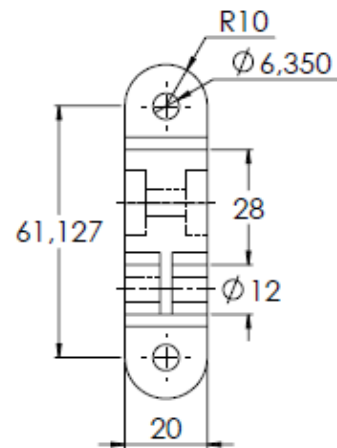
DETALLE B  
ESCALA 2 : 1



FINO SI INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULARES:		ACABADO:	REVISAR Y FIRMAR ANTES DE USAR	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN COBORDON ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
NOMBRE: DISEÑO: JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L. JUAN SEBASTIAN ROZO V. VIKIP: ING. CARLOS BORRAS PINILLA		FECHA:	FECHA:	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
APLICACION: RAZON: CASO:	MATERIAL: DURALUMINIO		NOMBRE DE OBJETO: BARRA LARGA	
			ESCALA: 1:1	HOJA 1 DE 15 A3

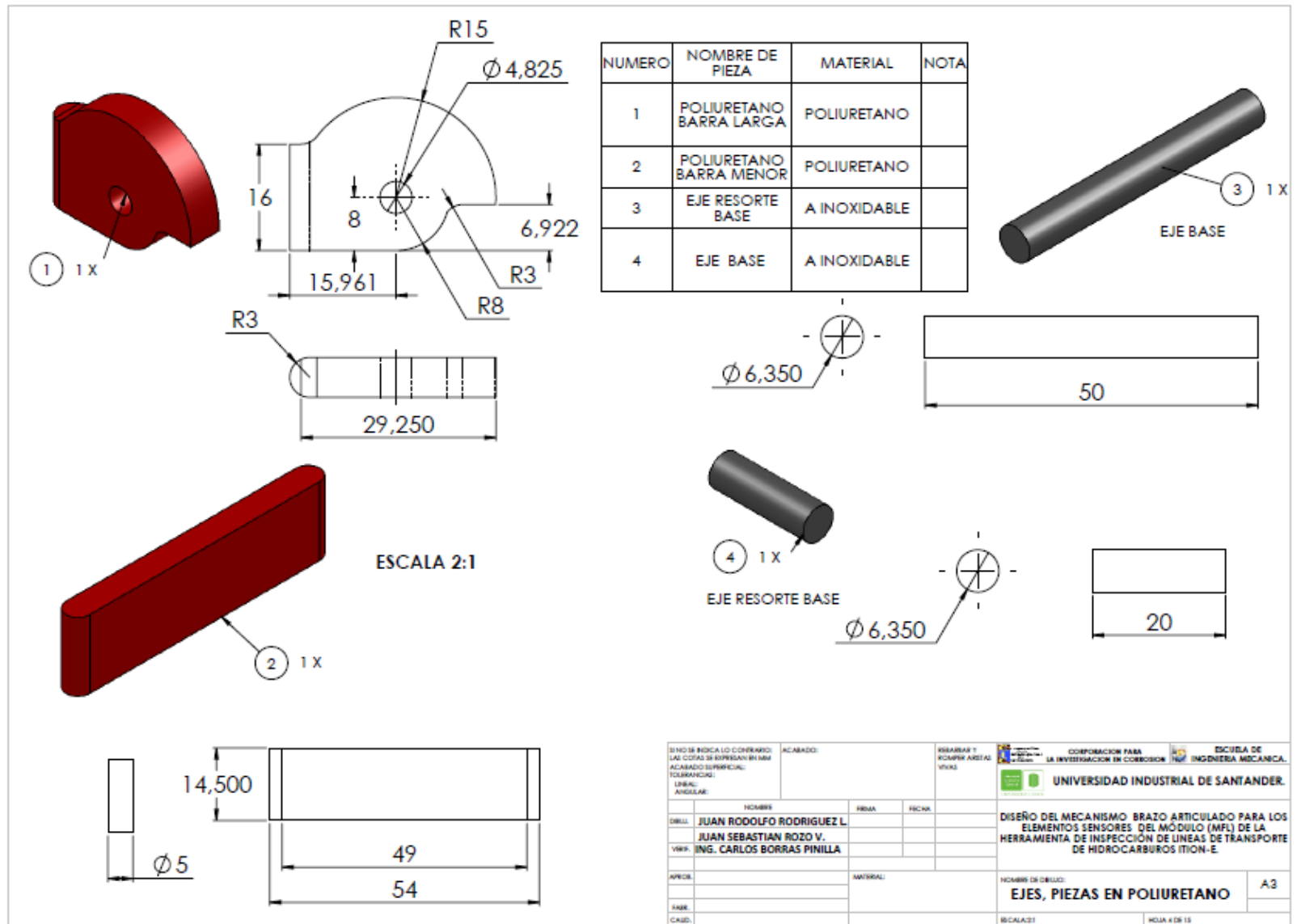


DIBO DE BOCALLO CONVENIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULARES:		ACABADO:  FINES Y RENDIMIENTOS VENTAS	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN COBROSON ESCUELA DE INGENIERIA MECANICAL
NOMBRE: DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MPL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E		FIRMA: FECHA:	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
DIBO: VERR:	NOMBRE: JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L. JUAN SEBASTIAN ROZO V. ING. CARLOS BORRAS PINILLA	MATERIAL: DURALUMINIO	NOMBRE DE DIBO: BARRA SENSORES
APLIC: RAZO: CASO:			A3 ESCALA: 1:1 HOJA 2 DE 15

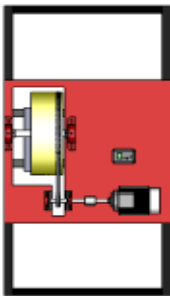
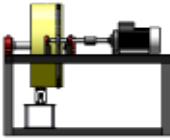


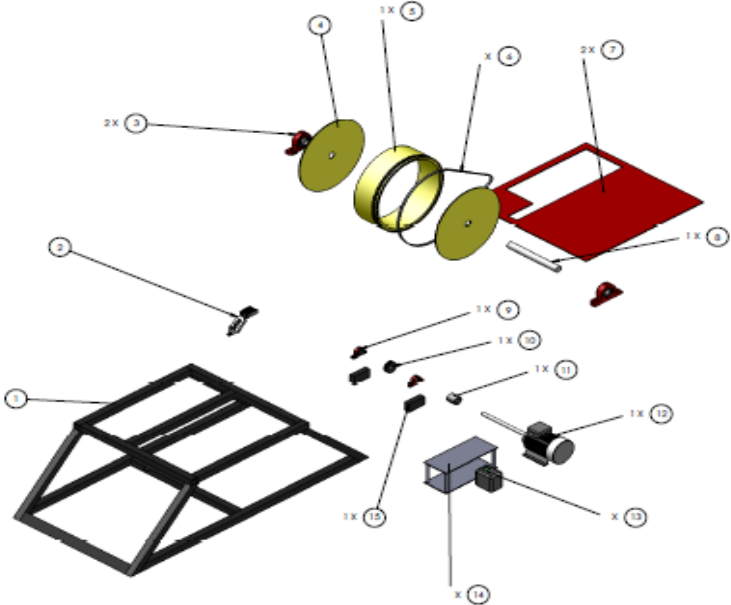
ESCALA: 2:1

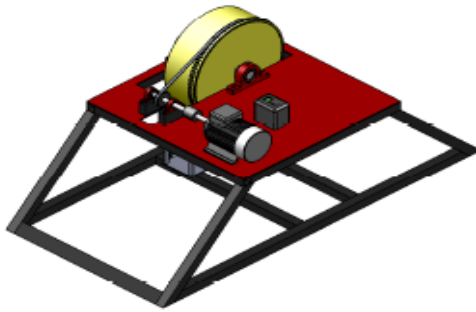
DISEÑO DE BOCAL LO CONTIENE: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULARES:		ACABADO:	REVISAR Y REVISAR ANTES VERIR	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN COOPERACION ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
NOMBRE: DISEÑ. JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L. JUAN SEBASTIAN ROZO V. VERIF. ING. CARLOS BORRAS PINILLA		FIRMA: _____ FECHA: _____	DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MPL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E	
APLICAR: RANK: CASO:		MATERIAL: DURALUMINIO	NOMBRE DE OBJETO: SOPORTE	A3
		ESCALA: 1:1		HOJA 3 DE 15



## ANEXO B DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS





Numero de pieza	Nombre de la pieza	Material	Cantidad
1	Estructura Base	Aero A36	1
2	Brzo Articulado	Duraluminio, Poluretano	1
3	Rodamiento Tuberia		2
4	Tapa Tuberia	Acero A36	2
5	Tuberia	Acero Inoxidable	1
6	Coneo De Transmisi3n		1
7	Placa Soporte	Acero A36	1
8	Eje Tuberia		1
9	Rodamiento eje Motor		2
10	Wton de Amorte		1
11	Acople motor eje		1
12	Motor		1
13	Variador de Frecuencia		1
14	Soporte de Brzo		1
15	Soporte rodamiento Base		1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM  
ACABADO SUPERFICIAL:  
TOLERANCIAS:  
LINEAL:  
ANGULAR:

ACABADO:

REVISAR Y  
FIRMAR AREA:  
VIGIL

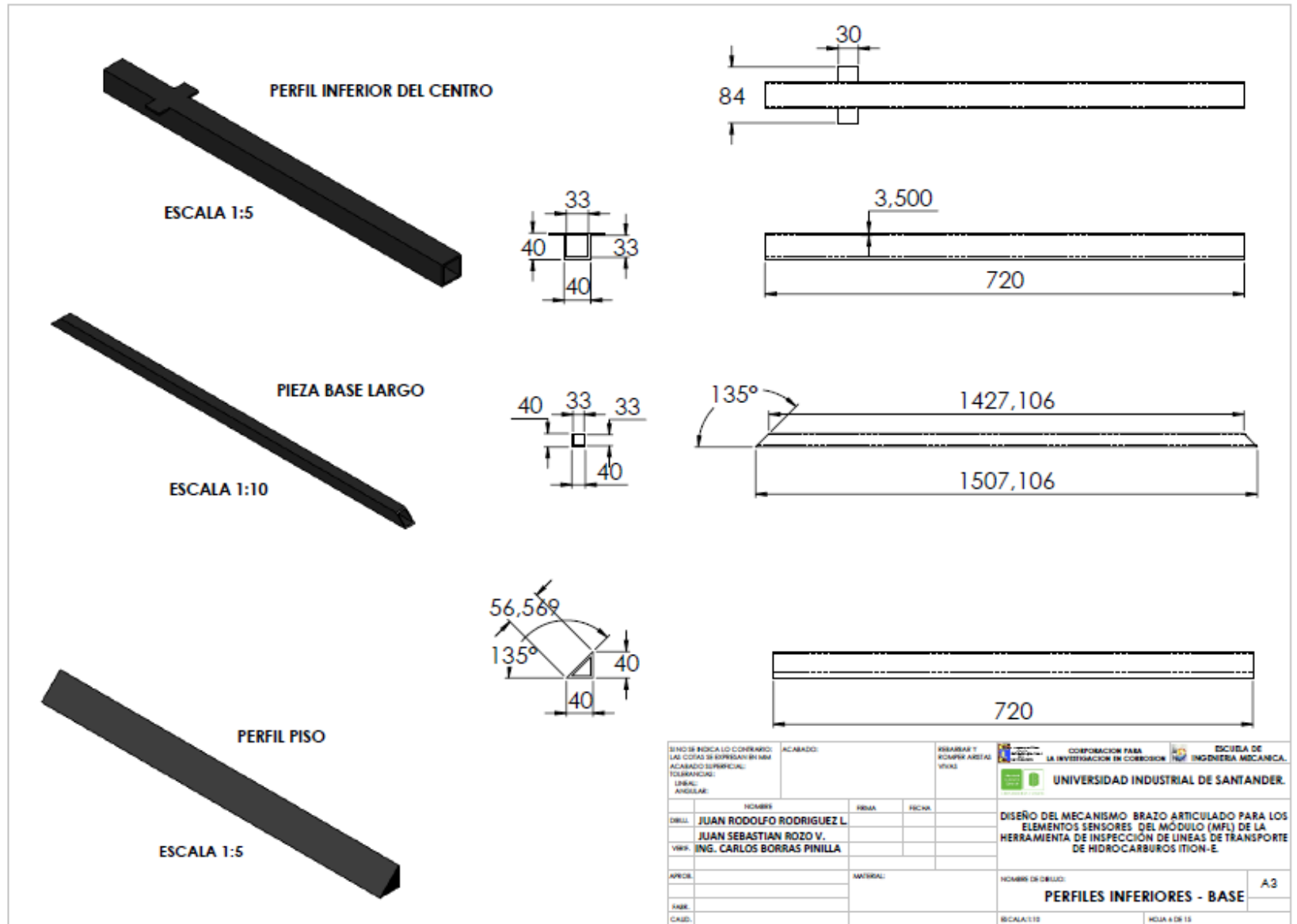
CORPORACION PARA  
LA INVESTIGACION EN CORROSION  
INGENIERIA MECANICA  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

DISEÑO DEL MECANISMO BRZO ARTICULADO PARA LOS  
ELEMENTOS SENSORES DEL M3DULO (MFL) DE LA  
HERRAMIENTA DE INSPECCION DE LINEAS DE TRANSPORTE  
DE HIDROCARBUROS ITION-E

NOMBRE DE DIBUJO:  
**Ensamble banco de pruebas**

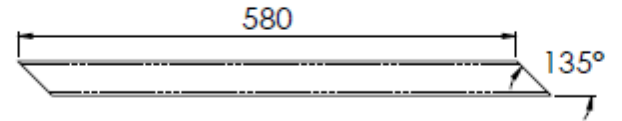
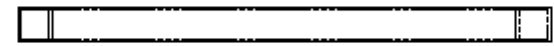
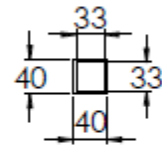
NOMBRE DE DIBUJANTE:  
A.1.

ESCALA: 1:10 HOJA 4 DE 10

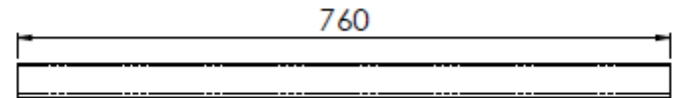
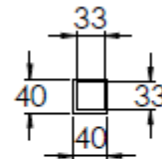




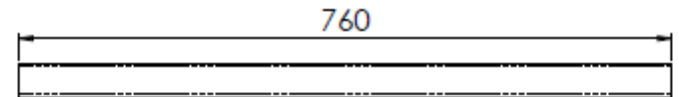
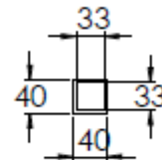
PERFIL BASE



PERFIL SUPERIOR

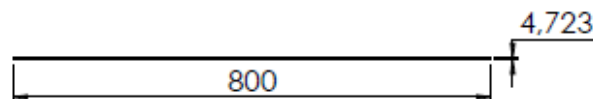
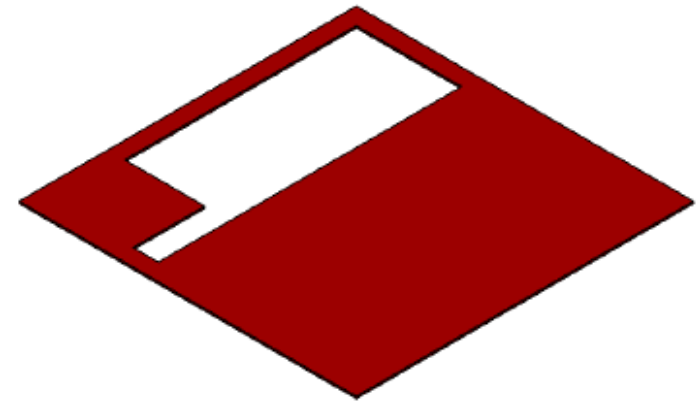
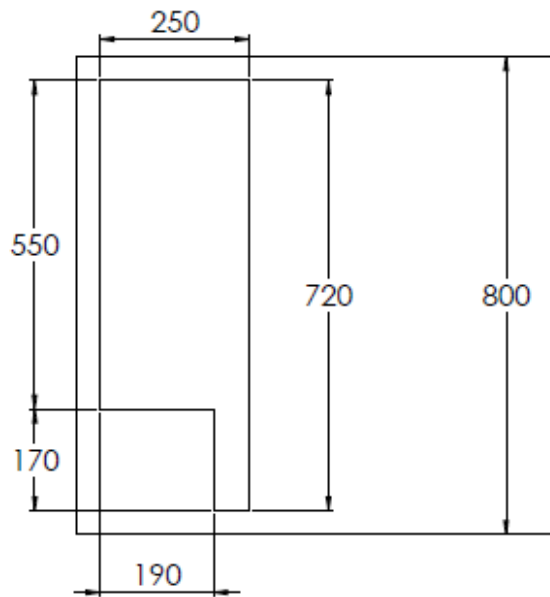


PIEZA 3



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REVISAR Y ROMPER ARTISTAS VIKING	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN COOPERACION	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA.
NOMBRE: <b>JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L.</b>		FIRMA: 	FECHA: 	<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.</b>	
DISEÑO: <b>JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L.</b>				DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MPL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E.	
VIKING: <b>ING. CARLOS BORRAS PINILLA</b>				NOMBRE DE DIBUJO: <b>PERFILES SUPERIORES - BASE</b>	
APROBADO: 		AUTORIZADO: 		HOJA 7 DE 13	
ASESORADO: 				A3	
CADENADO: 				BICAJA 13	

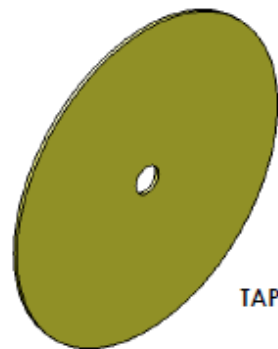
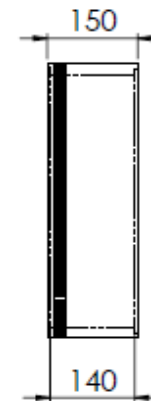
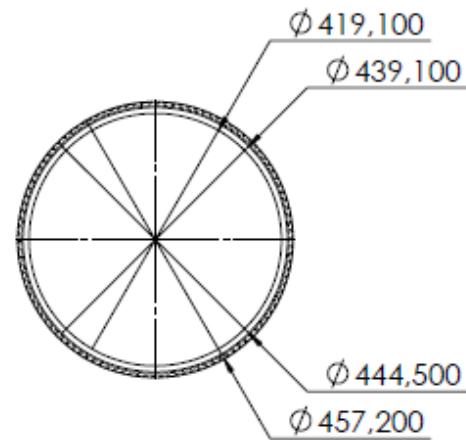




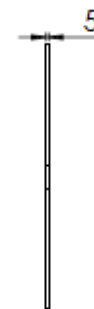
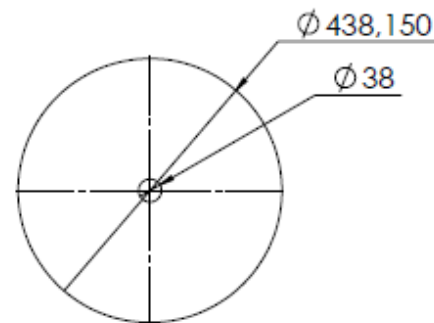
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE REFIEREN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULOS:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARETAS VITAS	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN COOPERACION ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA. <b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.</b>
DISEÑÓ:	NOMBRE <b>JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L</b>	FIRMA	FECHA	DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MPL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCION DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E.
VERIFICÓ:	NOMBRE <b>JUAN SEBASTIAN ROZO V.</b>			
	NOMBRE <b>ING. CARLOS BORRAS PINILLA</b>			
APROBÓ:		MATERIAL: <b>Acero A-36</b>		NOMBRE DE DISEÑO: <b>PLACA</b>
ELABORÓ:				<b>A3</b>
CALEFICÓ:				ESCALA: 1:1
				HOLLA Y DE 15



PIEZA 2



TAPA

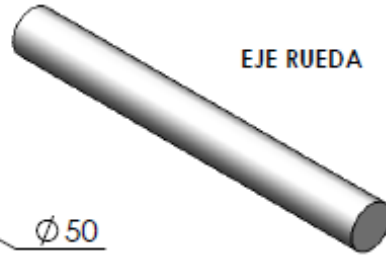


SINDE INDICA LO CONTENIDO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAS: ANGULOS:		ACABADO:	REVISAR Y COMPROBARE VOTOS	CORPORACION PARA LA INVESTIGACION EN CORROSION ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA.
NOMBRE: <b>JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L.</b> <b>JUAN SEBASTIAN ROZO V.</b> VOTO: <b>ING. CARLOS BORRAS PINILLA</b>		FECHA:		<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.</b>  DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MFL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E.
APROB.		MATERIAL:		NOMBRE DE DISEÑO: <b>RUEDA</b>
FECHA:				A3
CARGO:				ESCALA: 1:1 HOJA 13 DE 13

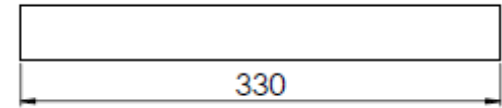
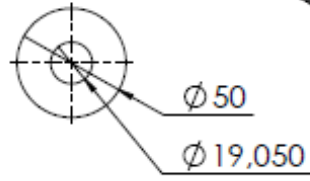
ACOPLE



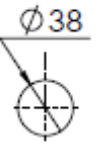
ESCALA 1:2



EJE RUEDA



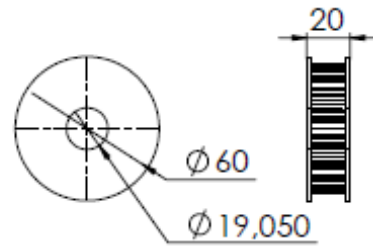
ESCALA 1:3



PIÑÓN PEQUEÑO



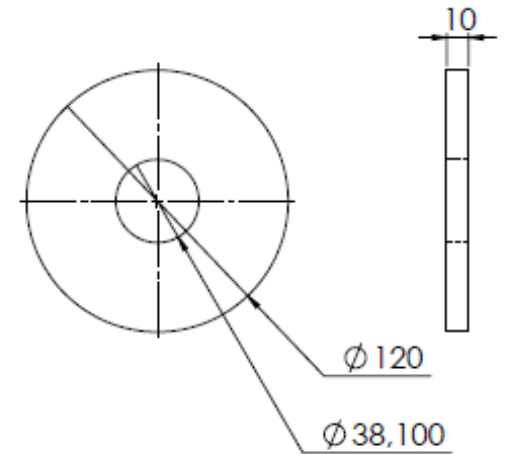
ESCALA 1:2



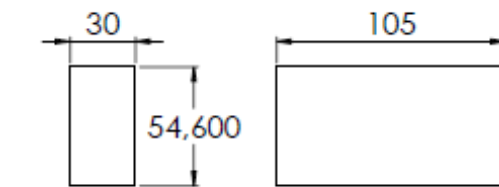
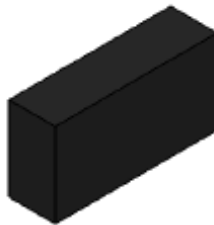
PIÑÓN TUBERIA



ESCALA 1:2




BASE RODAMIENTO MOTOR



ESCALA 1:2



SINDESE INDICADO CONVENIR: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VANG:	COOPERACION PARA LA INVESTIGACION EN CORROSION ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA.
NOMBRE: <b>JUAN RODOLFO RODRIGUEZ L.</b> <b>JUAN SEBASTIAN ROZO V.</b> VIKIP: <b>ING. CARLOS BORRAS PINILLA</b>		PRIMA:	FECHA:	DISEÑO DEL MECANISMO BRAZO ARTICULADO PARA LOS ELEMENTOS SENSORES DEL MÓDULO (MPL) DE LA HERRAMIENTA DE INSPECCIÓN DE LINEAS DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS ITION-E
APROB.: ANE.: CAD:		AUTOR:		NOMBRE DE OBJETO: <b>EJE RUEDA Y ACCESORIOS</b>
				ESCALA:1:2 HOJA 14 DE 16


ANEXO C. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DURALUMINIO.


  
**Cia. General de Aceros S.A**


ACERO HERRAMIENTA  
Aleación No Ferrosa

**DURALUMINIO**

  
soluciones en acero inoxidable



  
soluciones al carbono

# DURALUMINIO

## Generalidades

Alumold 500 es un duraluminio de alta resistencia aleado al zinc, considerado como una aleación de última generación después del duraluminio tradicional 7075 y duraluminios de segunda generación como el 7010 y 7050. Gracias a su bajo peso, su excelente maquinabilidad y sus propiedades mecánicas, lo hacen un material capaz de reemplazar al acero en aplicaciones que requieran una combinación adecuada de estas propiedades, complementadas con resistencia a la corrosión y brillo como en el caso de los moldes de inyección de plástico y placas de soporte en troqueles progresivos. Los siguientes criterios se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar un duraluminio:

- Alta transferencia térmica (cuatro veces mayor que el acero)
- Bajo peso del molde o de las placas
- Alta maquinabilidad con buen acabado superficial
- Resistencia a la corrosión
- Buena polichabilidad

Analisis típico en %	ZN	MG	Cu	Al
	6.0	2.4	1.6	Balance

\*Estado de suministro: reconocido

## Aplicaciones

Las principales áreas de aplicación de Alumold 500 son: Moldes de inyección, termoformado y soplado de termoplásticos, elementos estructurales de maquinaria, placas de calentamiento, partes de maquinaria para la industria farmacéutica (blisteradoras), elementos de ingeniería mecánica.

PROPIEDADES DE UTILIZACIÓN		
Soldadura	Ajuste(MIG o TIG) Recarga (TIG)	Evitar Bueno
Mecanizado	Fragmentación de viruta Brillo superficial	Bueno Muy Bueno
Anodización	De protección De dureza	Aceptable Muy Bueno



**Cia. General de Aceros S.A**

# Tratamiento térmico

Alumold 500 es una aleación tratada en fábrica con proceso de homogenización, recocido, alivio de tensiones y endurecimiento por precipitación (envejecido) con un temple T6-51. El envejecimiento artificial mejora las propiedades mecánicas y la estabilidad dimensional.

Para incrementar la resistencia al desgaste, se puede utilizar niquelados o anodizados duros.

## Propiedades mecánicas

COMPARATIVAS CON OTROS MATERIALES

ESPESOR	40 mm		100 mm	
	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de fluencia (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de fluencia (Mpa)
ALUMOLD 500	560 a 620	510 a 570	550 a 610	500 a 560
Acero SAE 1045 Normalizado	630	345	620	325
Acero SAE 1045 Tratado	1400	1100	1320	1050
Acero P 20 Bonificado	1080	945	1080	945

EN FUNCIÓN DEL ESPESOR

ESPESOR EN MM	Valores mínimos			Valores típicos			
	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de fluencia (Mpa)	A %	Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite de fluencia (Mpa)	A %	HBS
25 <math>\leq A \leq 76.2</math>	560	510	5	590	540	10	190
76.2 <math>< A \leq 127</math>	550	500	4	580	530	6	185
127 <math>< A \leq 152.4</math>	540	490	2.5	570	520	4	185
152.4 <math>< A \leq 203.2</math>	525	480	1	555	510	2	180
203.2 <math>< A \leq 254</math>	505	460	1	535	490	1.5	180
254 <math>< A \leq 305</math>	470	435	0.5	510	470	1.5	175

## Propiedades físicas

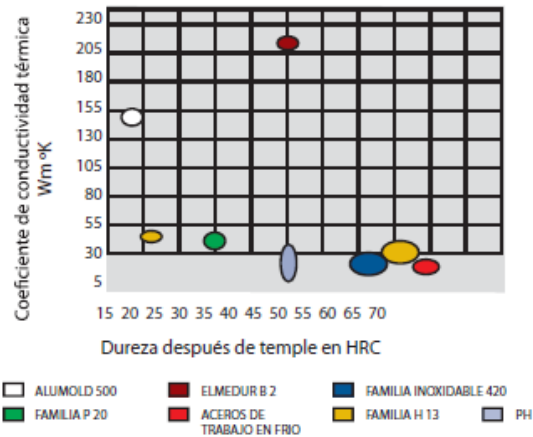
PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad kg/dm <sup>3</sup>	2.83
Dilatación térmica entre (0 - 100°C)	23.7 10 <sup>-6</sup> /°C
Conductividad térmica (0 - 100°C)	153 (W/m°C)
Calor específico(0 - 100°C)	857 J/kg°C
Módulo de elasticidad	72.000 MPa
Módulo de compresión	73.000 MPa
Coefficiente de Poisson*	0.33
Intervalo de fusión	475 - 630°C



**Cia. General de Aceros S.A**

Relación de dureza contra conductividad térmica



El tiempo de enfriamiento representa alrededor del 70 al 75% del ciclo completo de inyección de una pieza, por lo tanto un pequeño incremento en la conductividad térmica tiene un impacto importante en la reducción del ciclo incrementando la productividad del molde. Alumold 500 presenta una conductividad térmica cinco (5) veces mayor que los aceros usados en la fabricación de moldes de inyección y por lo tanto se constituye en una excelente alternativa para la fabricación de este tipo de herramientas.

## Tratamiento superficial de aluminio

Cuando es necesario endurecer o modificar la superficie del aluminio, las siguientes alternativas pueden tomarse: anodizado duro, recubrimientos varios.

### A. Anodizado duro

Permite obtener sobre la superficie de Alumold 500 una alta dureza (350 Vickers aproximadamente). A diferencia de los procesos de recubrimientos duros, la capa anódica de alúmina se genera a partir del mismo metal base y por lo tanto, no se presentan problemas de adhesión. El espesor de esta capa puede ser superior a 120 micras, aunque espesores entre 50 y 60 micras son generalmente utilizados.

La capa anódica puede ser impregnada con varias sustancias lubricantes (PTFE, grafito, bisulfuro de molibdeno) para reducir el coeficiente de fricción.



**Cia. General de Aceros S.A**

# Tratamiento superficial del aluminio

MATERIAL + TRATAMIENTO SUPERFICIAL	COEFICIENTE DE FRICCIÓN
Alumold 500	0.53
Alumold 500 + Anodizado Duro	0.77
Alumold 500 + Anodizado Duro + PTFE	0.21
Alumold 500 + Anodizado Duro + MoS <sub>2</sub>	0.18
Alumold 500 + Anodizado Duro + Grafito	0.15

El anodizado duro se realiza sobre la superficie pulida del molde para mantener la ventaja de la gran maquinabilidad del material.

## B. Recubrimientos varios

Alumold 500 permite depositar varios recubrimientos como cromo o níquel y otros metales. Estos recubrimientos se pueden realizar de diferentes maneras con las siguientes posibles consecuencias sobre las propiedades de Alumold 500:

1. Deposición electrolítica a temperatura ambiente: este proceso no modifica las propiedades de Alumold 500 pero se debe tomar las siguientes precauciones:

- En superficies curvas (como en el caso de las cavidades de un molde), el espesor de película puede que no sea absolutamente constante: se debe evaluar el rango de tolerancia de la pieza inyectada.
- El recubrimiento de cromo generalmente se realiza después de un recubrimiento de cobre. Si se produce un rayón en la superficie recubierta, se puede generar corrosión por pila galvánica.

2. Deposición al vacío (PVD): es posible depositar todos los metales y una gran variedad de compuestos (TiN, WC, etc.) a través de este proceso; sin embargo, la temperatura y el tiempo del proceso puede reducir drásticamente las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio.



**Cia. General de Aceros S.A**

## Mecanizado

OPERACIÓN	ALUMOLD 500			
	HERRAMIENTA DE ACERO RÁPIDO		HERRAMIENTA DE CARBURO	
	Desbaste	Acabado	Desbaste	Acabado
<b>Torneado</b>				
Velocidad de corte (m/min)	300 a 600	≥1000	≥1000	≥1000
Avance (mm/rev.)	0.2 a 0.6	0.05 a 0.2	0.3 a 0.6	0.02 a 0.2
Profundidad de corte (mm)	3 a 15	0.3 a 3	3 a 15	0.3 a 3
<b>Fresado</b>				
Velocidad de corte (m/min)	300 a 600	≥1000	≥1000	≥1000
Avance (mm/diente)	0.1 a 0.3	0.03 a 0.1	0.1 a 0.3	0.03 a 0.1
Profundidad de corte (mm)	—	≤ 0.5	—	≤ 0.5
<b>Taladrado</b>				
Angulo de corte (°)	120 - 140		120 - 140	
Angulo de incidencia (°)	8 a 9		8 a 9	
Velocidad de corte (m/min)	30 a 80		50 a 100	
Avance (mm/rev.)	0.02 a 0.5		0.02 a 0.5	

## Mecanizado por electroerosión

El proceso EDM tanto de penetración como de corte por hilo ofrece buenos resultados con ALUMOLD 500. Como en el mecanizado por desprendimiento de viruta, la erosión sobre ALUMOLD 500 es hasta 8 veces más rápida que para el acero.

Penetración: se recomienda reducir la velocidad de la máquina en el acabado que permite afinar el grano y una superficie lisa. Tal superficie puede ser usada directamente en partes de moldes con buena apariencia superficial.

Corte por hilo: Se sugieren las siguientes condiciones de mecanizado:

Electrodo	wire SW 25, diámetro 235 micras	
Dieléctrico	agua desionizada	
Avance	espesor de 40 mm	8.5 mm/min.
	espesor de 60 mm	5.9 mm/min.
	espesor de 80 mm	4.5 mm/min.
	espesor de 100 mm	3.7 mm/min.



**Cia. General de Aceros S.A**

Rectificado: El rectificado sobre ALUMOLD 500 es posible tomando las siguientes precauciones:

- Evite usar ruedas de rectificado utilizadas para rectificar otros materiales (especialmente acero).
- Si la máquina rectificadora ha sido utilizada para rectificar otros materiales:

- Drene y limpie los circuitos de refrigeración
- Reemplace el refrigerante
- Reemplace el filtro

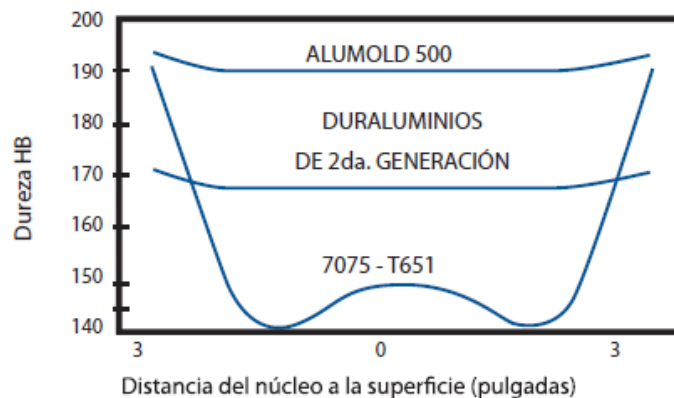
Las siguientes condiciones de rectificado han sido usadas satisfactoriamente por nuestros clientes:

- Rueda abrasiva: dimensiones 400 x 50 x 127 tipo 87 A 47 H 8 V 217
- Velocidad periférica 30 m/s

- Lubricante tipo V 915 M
- Filtro tipo III / 40

Polichabilidad: Para lograr obtener un acabado "brillo espejo" en la superficie de una aleación de aluminio, esta debe contar con una microestructura libre de defectos (como inclusiones o poros), garantizar una composición química homogénea y que a la vez proporcione propiedades mecánicas similares en toda su masa. En estas condiciones, una adecuada técnica de pulido empleada por el operario permite garantizar los resultados esperados a un costo razonable.

Dentro del grupo de duraluminios utilizados actualmente, Alumold 500 presenta el mejor comportamiento de sus propiedades mecánicas a través de su sección transversal aseguradas por un proceso de fabricación rigurosamente controlado garantizando un brillo homogéneo.



El acabado espejo en ALUMOLD 500 aparece 3 a 4 veces más rápido que sobre el acero usando los procedimientos convencionales de brillo.



**Cia. General de Aceros S.A**

## ANEXO D PROPIEDADES DEL POLIURETANO

Propiedades del poliuretano fueron tomadas de la página del instituto de tecnología de Massachusetts.

MATERIAL	Type	Cost (\$/kg)	Density ( $\rho$ , Mg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus (E, GPa)	Shear Modulus (G, GPa)	Poisson's Ratio ( $\nu$ )	Yield Stress ( $\sigma_Y$ , MPa)	UTS ( $\sigma_f$ , MPa)	Breaking strain ( $\epsilon_f$ , %)	Fracture Toughness ( $K_{IC}$ , MN m <sup>3/2</sup> )	Thermal Expansion ( $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> /C)
Polyurethane elastomer	polymer	4.00	1.2	0.025	0.0086	0.50	30	30	500	0.30	125

<http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials-fall-1999/modules/props.pdf>

## **ANEXO E. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y MODELAMIENTO EN ANSYS**

El método de los elementos finitos (FEM en siglas en inglés) es un método de cálculo utilizado en diversos problemas de ingeniería, que se basa en considerar al cuerpo o estructura dividido en elementos discretos, con determinadas condiciones de vínculos entre sí, generándose un sistema de ecuaciones que se resuelven numéricamente y proporciona el estado de tensiones y deformaciones.

El método de elementos finitos es muy versátil, poderoso y nos permite resolver problemas en estado estático o dependiente del tiempo, lineal o no lineal, se pueden manejar una gran variedad de materiales especiales: homogéneos, ortotrópicos, anisotrópicos. Se pueden considerar efectos especiales sobre los materiales: plasticidad, propiedades dependientes de la temperatura.

El método de elementos finitos también es un procedimiento numérico aplicable a un gran número de problemas con condiciones de borde impuestas (en las formaciones las condiciones de borde serían: restricciones y cargas externas e internas). La mayoría de estos problemas no tienen solución analítica o es muy difícil obtenerla, por lo que se convierte en la única alternativa de solución. Con este método se pueden resolver sistemas los cuales no son tan fáciles de resolver mediante modelos matemáticos simples. Existen dos tipos de caminos para su formulación, basándose en el principio de trabajos virtuales, es decir formulaciones variacionales, o mediante el método de Galerkin, método directo o bien con Raleigh Ritz. Si este método fue desarrollado en un principio para problemas de análisis de estructuras, con este método se pueden representar entre otros los siguientes fenómenos físicos:

- Fenómenos termodinámicos: distribución de temperatura en un sólido.
- Simulación de efectos dinámicos: choque de dos cuerpos.
- Geomecánica : comportamiento de la corteza terrestre.

## CONCEPTO

La base del método de elementos finitos es la representación de un cuerpo por ensamble de subdivisiones llamadas ELEMENTOS. Estos elementos se interconectan a través de puntos llamados NODOS.

Una manera de discretizar un cuerpo o estructura es dividirla en un sistema equivalente de cuerpos pequeños, tal que su ensamble representa el cuerpo original. La solución que se obtiene para cada unidad se combina para obtener la solución total. Por ende, La solución del problema consiste en encontrar los desplazamientos de estos puntos y a partir de ellos, las deformaciones y las tensiones del sistema analizado. Las propiedades de los elementos que unen a los nodos, están dadas por el material asignado al elemento, que definen la rigidez del mismo, y la geometría de la estructura a modelar (a partir de las Leyes de la Elástica). Las deformaciones y las fuerzas externas se relacionan entre si mediante la rigidez y las relaciones constitutivas del elemento. Trabajando en régimen elástico, las ecuaciones que definen el sistema pueden expresarse de forma matricial como se muestra a continuación:

$$[K] \cdot \{\delta\} = \{F\}$$

Donde :

- [K]: es la matriz rigidez del sistema. Propiedad del material.
- $\{\delta\}$ : es el vector desplazamientos. Comportamiento.
- $\{F\}$ : es el vector de esfuerzos. Acción.

Un ejemplo podría ser:

**TABLA 5. TABLA DESCRIPCIÓN DE VARIABLES**

	<b>Propiedad [K]</b>	<b>Comportamiento {u}</b>	<b>Acción {F}</b>
<b>Térmica</b>	conductividad	temperatura	generación de calor
<b>Electrostática</b>	Permitividad dieléctrica	Potencial eléctrico	carga

El método de los elementos finitos no es la mejor o más acertada solución para cualesquiera de los elementos físicos que se tengan, es decir, estas tienen sus pro y sus contras como se describirá a continuación.

**.VENTAJAS DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

- Permite resolver problemas en estado estable o dependiente del tiempo, lineal o no lineal.
- Puede manejar sin esfuerzo lagunas geometrías muy complejas, siempre y cuando se lleven a cabo con mucho cuidado para no estropear los resultados. En la automatización de simulaciones es muy difícil manejar estos tipos de geometrías.
- Se pueden manejar cargas (esfuerzos y tensiones ) y restricciones complejas.
- Se pueden manejar materiales especiales: no homogéneos, ortotrópicos, anisotrópicos.
- Se pueden considerar efectos especiales sobre los materiales como lo puede ser la plasticidad y propiedades dependientes de la temperatura.

- Puede manejar una amplia variedad de problemas de ingenierías, pues tiene varias herramientas de aplicación: electromagnetismo, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos, transferencia de calor , etc.

### **DESVENTAJE DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS.**

- El método de elementos finitos obtiene solo una aproximación a la solución.
- La precisión de los resultados depende de la densidad de elementos a utilizar.

### **GENERALIDADES DEL MODELAMIENTO EN ANSYS**

El método de elementos finitos es una nueva formulación matemática, aunque su estructura básica es conocida hace mucho tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo gracias a la evolución de la informática como lo es el programa Ansys, que es una herramienta de simulación muy eficaz.

El programa ANSYS es un programa de propósito general que hace uso del método numérico anteriormente descrito para la solución de distintos problemas como lo son los térmicos, electrónicos, estructurales, electromagnéticos, etc.

El software ANSYS esta compuesta por una gran familia como lo son:

- ANSYS Mechanical.
- Ansys LS DINA
- ANSYS Emag
- ANSYS Structural
- ANSYS flotran
- Ansys civilfem

Entre las operaciones que es capaz de realizar ANSYS se encuentran:

- Análisis estructural.
- Análisis térmico.
- Análisis electromagnético.
- Análisis de fluidos. (CFC)
- Análisis de campos acoplados

Para el análisis estático estructural (lineal y no lineal)

- Pandeo (lineal y no lineal )
- Anisotropía.
- Contactos de superficies de contacto no lineales.
- No linealidades geométricas ( grandes desplazamientos y deformaciones, rigidizacion tensional, etc)
- Materiales no lineales.

Para análisis dinámico

- Análisis modal.
- Análisis sísmico.
- Análisis armónicos.
- Análisis transitorios lineales y no lineales.

## ANEXO F. CATALOGO MOTOR SIEMENS.

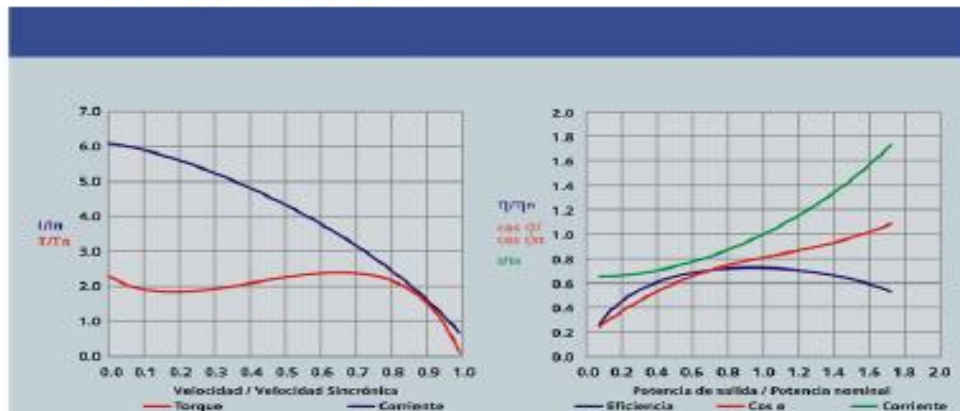
# SIEMENS



CARACTERISTICAS TECNICAS MOTOR 1LA7 063-2YA60

Potencia Nominal (HP)	2.00	Potencia Nominal (KW)	1.49
Factor de Servicio	1.15	Frecuencia (Hz)	60
Voltaje Nominal (V)	220 / 440	Intensidad Nominal (A)	6.20 / 3.10
Intensidad a Factor de Servicio	7.1/3.55	Intensidad de Arranque	6.30
Numero de Fases	3	Velocidad Sincronica (rpm)	3600
Velocidad Nominal (rpm)	3410	Factor de Potencia a Carga Nominal	0.85
Eficiencia de Carga Nominal (%)	74.00	Torque Nominal (Nm)	4.17
Torque de Arranque	3.30	Torque Maximo	2.70
Momento de Inercia (kg/m2)	0.00110	Clase de Aislamiento	F
Tamaño Constructivo	IEC 80M	Grado de Protección Mecanica	IP55
Ejecucion	B3	Rodamiento Lado A1S	6004-2Z/C3
Rodamiento Lado B5	6004-2Z/C3	Peso (kg)	10.00

CURVAS CARACTERISTICAS MOTOR 1LA7 063-2YA60



# SIEMENS

DIMENSIONES MOTOR 1LA7 083-2YA60

**Motor 1LA7 071/080/090 (IMB3)**  
Dimensiones generales

Centro de Neutro  
Lado de conexión D20

Dimensiones	Simbolo	Tolerancia
L	100	±0.10
h	100	±0.10
h <sub>1</sub>	100	±0.10
h <sub>2</sub>	100	±0.10
h <sub>3</sub>	100	±0.10
h <sub>4</sub>	100	±0.10
h <sub>5</sub>	100	±0.10
h <sub>6</sub>	100	±0.10
h <sub>7</sub>	100	±0.10
h <sub>8</sub>	100	±0.10
h <sub>9</sub>	100	±0.10
h <sub>10</sub>	100	±0.10
h <sub>11</sub>	100	±0.10
h <sub>12</sub>	100	±0.10
h <sub>13</sub>	100	±0.10
h <sub>14</sub>	100	±0.10
h <sub>15</sub>	100	±0.10
h <sub>16</sub>	100	±0.10
h <sub>17</sub>	100	±0.10
h <sub>18</sub>	100	±0.10
h <sub>19</sub>	100	±0.10
h <sub>20</sub>	100	±0.10
h <sub>21</sub>	100	±0.10
h <sub>22</sub>	100	±0.10
h <sub>23</sub>	100	±0.10
h <sub>24</sub>	100	±0.10
h <sub>25</sub>	100	±0.10
h <sub>26</sub>	100	±0.10
h <sub>27</sub>	100	±0.10
h <sub>28</sub>	100	±0.10
h <sub>29</sub>	100	±0.10
h <sub>30</sub>	100	±0.10
h <sub>31</sub>	100	±0.10
h <sub>32</sub>	100	±0.10
h <sub>33</sub>	100	±0.10
h <sub>34</sub>	100	±0.10
h <sub>35</sub>	100	±0.10
h <sub>36</sub>	100	±0.10
h <sub>37</sub>	100	±0.10
h <sub>38</sub>	100	±0.10
h <sub>39</sub>	100	±0.10
h <sub>40</sub>	100	±0.10
h <sub>41</sub>	100	±0.10
h <sub>42</sub>	100	±0.10
h <sub>43</sub>	100	±0.10
h <sub>44</sub>	100	±0.10
h <sub>45</sub>	100	±0.10
h <sub>46</sub>	100	±0.10
h <sub>47</sub>	100	±0.10
h <sub>48</sub>	100	±0.10
h <sub>49</sub>	100	±0.10
h <sub>50</sub>	100	±0.10
h <sub>51</sub>	100	±0.10
h <sub>52</sub>	100	±0.10
h <sub>53</sub>	100	±0.10
h <sub>54</sub>	100	±0.10
h <sub>55</sub>	100	±0.10
h <sub>56</sub>	100	±0.10
h <sub>57</sub>	100	±0.10
h <sub>58</sub>	100	±0.10
h <sub>59</sub>	100	±0.10
h <sub>60</sub>	100	±0.10
h <sub>61</sub>	100	±0.10
h <sub>62</sub>	100	±0.10
h <sub>63</sub>	100	±0.10
h <sub>64</sub>	100	±0.10
h <sub>65</sub>	100	±0.10
h <sub>66</sub>	100	±0.10
h <sub>67</sub>	100	±0.10
h <sub>68</sub>	100	±0.10
h <sub>69</sub>	100	±0.10
h <sub>70</sub>	100	±0.10
h <sub>71</sub>	100	±0.10
h <sub>72</sub>	100	±0.10
h <sub>73</sub>	100	±0.10
h <sub>74</sub>	100	±0.10
h <sub>75</sub>	100	±0.10
h <sub>76</sub>	100	±0.10
h <sub>77</sub>	100	±0.10
h <sub>78</sub>	100	±0.10
h <sub>79</sub>	100	±0.10
h <sub>80</sub>	100	±0.10
h <sub>81</sub>	100	±0.10
h <sub>82</sub>	100	±0.10
h <sub>83</sub>	100	±0.10
h <sub>84</sub>	100	±0.10
h <sub>85</sub>	100	±0.10
h <sub>86</sub>	100	±0.10
h <sub>87</sub>	100	±0.10
h <sub>88</sub>	100	±0.10
h <sub>89</sub>	100	±0.10
h <sub>90</sub>	100	±0.10
h <sub>91</sub>	100	±0.10
h <sub>92</sub>	100	±0.10
h <sub>93</sub>	100	±0.10
h <sub>94</sub>	100	±0.10
h <sub>95</sub>	100	±0.10
h <sub>96</sub>	100	±0.10
h <sub>97</sub>	100	±0.10
h <sub>98</sub>	100	±0.10
h <sub>99</sub>	100	±0.10
h <sub>100</sub>	100	±0.10

## ANEXO G VARIADOR DE FRECUENCIA

# SIEMENS

**MICROMASTER 420**  
0.12 kW - 11 kW

Compact Operating Manual

Issue 04/04



User Documentation

# 1 Installation

## 1.1 Clearance distances for mounting

The inverters can be mounted adjacent to each other. If they are mounted on top of each other, however, a clearance of 100 mm has to be observed.

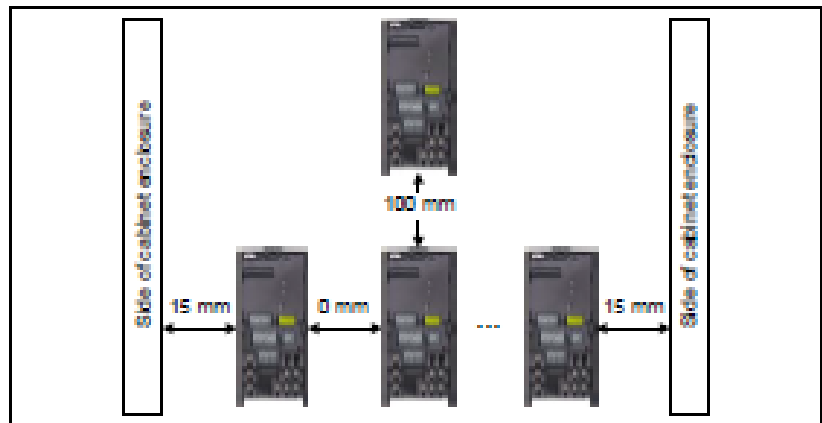


Fig. 1-1 Clearance distances for mounting

## 1.2 Mounting dimensions

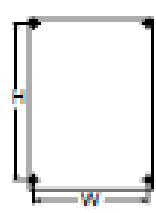
	Frame Size	Drilling Dimensions		Tightening Torque	
		H mm (Inch)	W mm (Inch)	Bolts	Nm (lbf.in)
	A	160 (6.30)	—	2xM4	2.5 (22.12)
	B	174 (6.85)	138 (5.43)	4xM4	
	C	204 (8.03)	174 (6.85)	4xM4	

Fig. 1-2 Mounting dimensions

## 2 Electrical Installation

### 2.1 Technical Specifications

#### 1 AC 200 V – 240 V

Order No. 6SE6420-	2AB 2UC	11- 2AA1	12- 5AA1	13- 7AA1	15- 5AA1	17- 5AA1	21- 1BA1	21- 5BA1	22- 2BA1	23- 0CA1
Frame Size		A					B			C
Inverter Output Rating	kW hp	0.12 0.16	0.25 0.33	0.37 0.5	0.55 0.75	0.75 1.0	1.1 1.5	1.5 2.0	2.2 3.0	3.0 4.0
Input Current	A	1.4	2.7	3.7	5.0	6.6	9.6	13.0	17.6	23.7
Output Current	A	0.9	1.7	2.3	3.0	3.9	5.5	7.4	10.4	13.8
Recommended Fuse	A SNA	10 3803	10 3803	10 3803	10 3803	18 3805	18 3807	20 3807	25 3810	32 3812
Input Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	2,5-8,0 13-9	2,5-8,0 13-9	4,0-8,0 11-9	8,0-10 9-7
Output Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,5-10 15-7
Tightening Torque	Nm (lbf.in)	1.1 (10)					1.5 (13.3)			2.25 (20)

#### 3 AC 200 V – 240 V

Order No. 6SE6420-	2AC 2UC	11- 2AA1	12- 5AA1	13- 7AA1	15- 5AA1	17- 5AA1	21- 1BA1	21- 5BA1	22- 2BA1	23- 0CA1	24- 0CA1	25- 5CA1
Frame Size		A					B			C		
Inverter Output Rating	kW hp	0.12 0.16	0.25 0.33	0.37 0.5	0.55 0.75	0.75 1.0	1.1 1.5	1.5 2.0	2.2 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.5 7.5
Input Current	A	0.8	1.1	1.6	2.1	2.9	4.1	5.8	7.8	10.5	13.1	17.5
Output Current	A	0.9	1.7	2.3	3.0	3.9	5.5	7.4	10.4	13.8	17.5	22.0
Recommended Fuse	A SNA	10 3803	10 3803	10 3803	10 3803	18 3805	18 3805	20 3807	25 3810	32 3812	35 3814	
Input Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 13-7	2,5-10 13-7	2,5-10 13-7	4,0-10 11-7
Output Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 15-7	1,5-10 13-7	2,5-10 13-7	4,0-10 11-7
Tightening Torque	Nm (lbf.in)	1.1 (10)					1.5 (13.3)			2.25 (20)		

#### 3 AC 380 V – 480 V

Order No. 6SE6420-	2AD 2UD	13- 7AA1	15- 5AA1	17- 5AA1	21- 1AA1	21- 5AA1	22- 2BA1	23- 0BA1	24- 0BA1	25- 5CA1	27- 5CA1	31- 1CA1	
Frame Size		A					B			C			
Inverter Output Rating	kW hp	0.37 0.5	0.55 0.75	0.75 1.0	1.1 1.5	1.5 2.0	2.2 3.0	3.0 4.0	4.0 5.0	5.5 7.5	7.5 10.0	11.0 15.0	
Input Current	A	1.1	1.4	1.9	2.8	3.9	5.0	6.7	8.5	11.8	15.4	22.5	
Output Current	A	1.2	1.8	2.1	3.0	4.0	5.9	7.7	10.2	13.2	19.0	26.0	
Recommended Fuse	A SNA	10 3803	10 3803	10 3803	10 3803	18 3805	18 3805	20 3807	25 3807	32 3810	35 3814		
Input Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,5-8,0 15-9	2,5-10 13-7	4,0-10 11-7	8,0-10 9-7	
Output Cable	mm <sup>2</sup> AWG	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-2,5 17-13	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,0-8,0 17-9	1,5-10 15-7	2,5-10 13-7	4,0-10 11-7	
Tightening Torque	Nm (lbf.in)	1.1 (10)					1.5 (13.3)			2.25 (20)			

## 2.2 Power Terminals

You can gain access to the mains and motor terminals by removing the front covers.



Fig. 2-1 Removing Front Covers

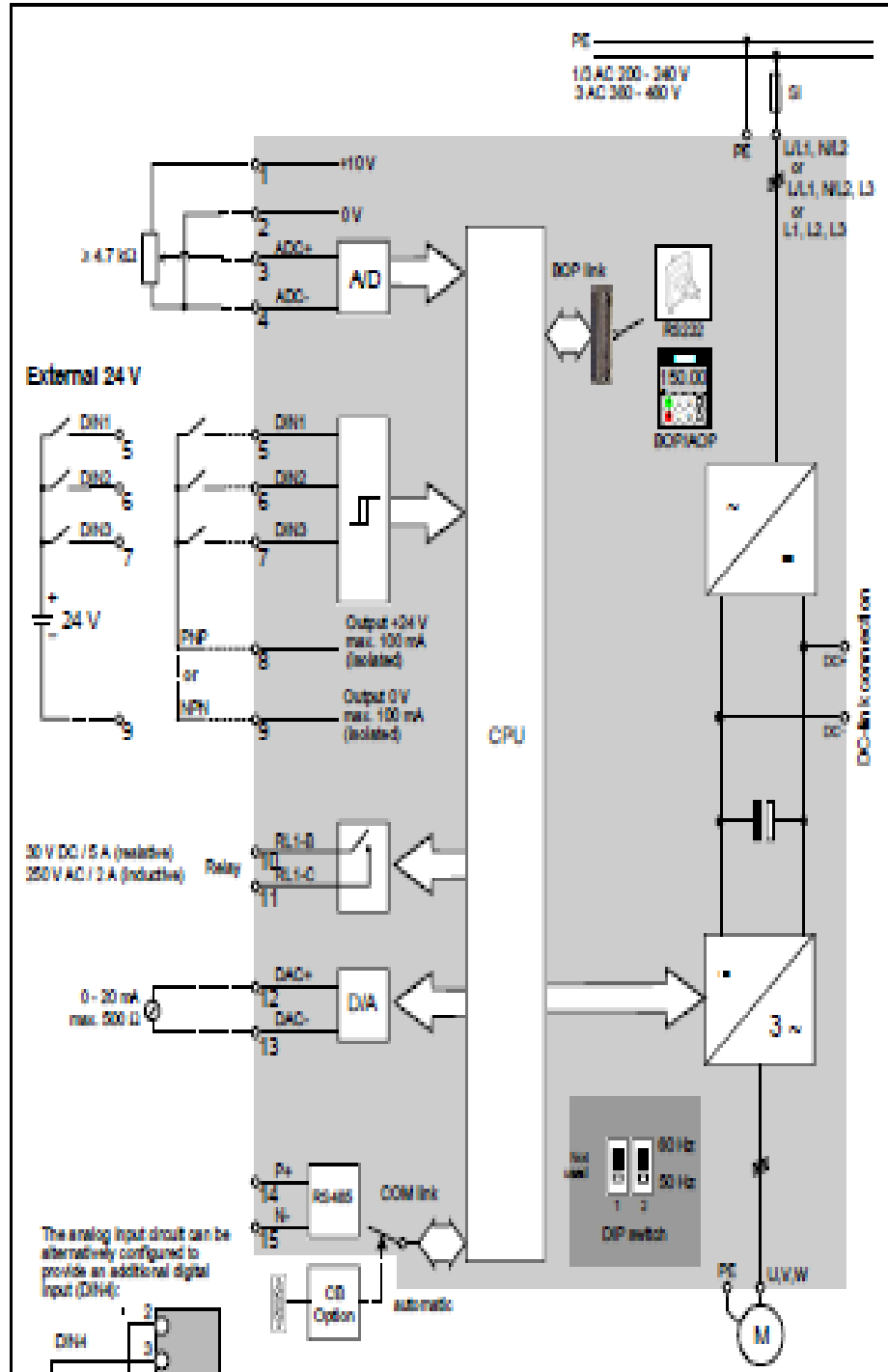


Fig. 2-2 Power Terminals

## 2.3 Control terminals

Terminal	Designation	Function
1	-	Output +10 V
2	-	Output 0 V
3	ADC+	Analog input (+)
4	ADC-	Analog input (-)
5	DIN1	Digital input 1
6	DIN2	Digital input 2
7	DIN3	Digital input 3
8	-	Isolated output +24 V / max. 100 mA
9	-	Isolated output 0 V / max. 100 mA
10	RL1-B	Digital output / NO contact
11	RL1-C	Digital output / Changeover contact
12	DAC+	Analog output (+)
13	DAC-	Analog output (-)
14	P+	RS485 port
15	N-	RS485 port

## 2.4 Block diagram



### 3 Factory setting

The MICROMASTER 420 frequency inverter is set in the factory so that it can be operated without any additional parameterization. To do this, the motor parameters set in the factory (P0304, P0305, P0307, P0310), that correspond to a 4-pole 1LA7 Siemens motor, must match the rated data of the connected motor (refer to the rating plate).

Further factory setting:

- Command sources P0700 = 2 (Digital Input, see Fig. 3-1)
- Setpoint source P1000 = 2 (Analog Input, see Fig. 3-1)
- Motor cooling P0335 = 0
- Motor current limit P0640 = 150 %
- Min. frequency P1080 = 0 Hz
- Max. frequency P1082 = 50 Hz
- Ramp-up time P1120 = 10 s
- Ramp-down time P1121 = 10 s
- Control mode P1300 = 0

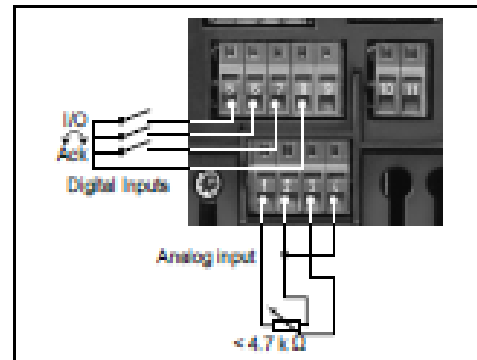


Fig. 3-1 Analog and Digital Inputs

Input/Output	Terminals	Parameter	Function
Digital input 1	5	P0701 = 1	ON / OFF 1 (UO)
Digital input 2	6	P0702 = 12	Reverse ( $\overleftarrow{r}$ )
Digital input 3	7	P0703 = 9	Fault reset (Ack)
Digital input	8	-	Power supply Digital input
Analog input	3/4	P1000 = 2	Frequency setpoint
	1/2	-	Power supply Analog input
Output relay	10/11	P0731 = 52.3	Default identification
Analog output	12/13	P0771 = 21	Output frequency

#### 3.1 50/60 Hz DIP switch

The default motor base frequency of the MICROMASTER inverter is 50 Hz. For motors, which are designed for a base frequency of 60 Hz, the inverters can be set to this frequency via a DIP switch.

- Off position: European defaults (50 Hz, kW etc.)
- On position: North American defaults (60 Hz, hp etc.)



## ANEXO H ARDUINO

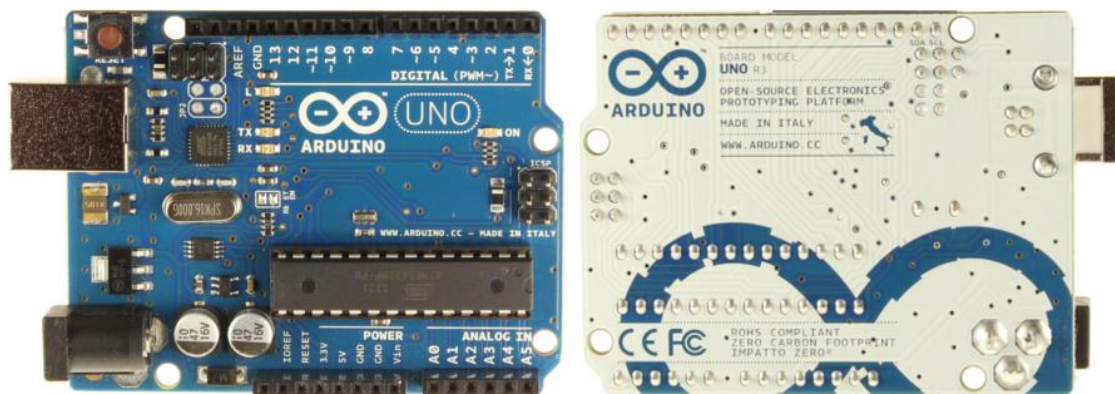
Arduino es una plataforma de código abierto basado en prototipos de electrónica flexible y fácil de usar hardware y software. Está pensado para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier persona interesada en la creación de objetos interactivos o entornos.

Arduino puede detectar el medio ambiente mediante la recepción de la entrada de una variedad de sensores y puede afectar a sus alrededores por controlar luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador de la placa se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino (basado en Processing). Proyectos Arduino puede ser independiente o se pueden comunicar con el software que se ejecuta en un ordenador (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP).

Las tablas se pueden construir con la mano o comprado premontado, el software se puede descargar de forma gratuita. Los diseños de referencia de hardware (archivos CAD) están disponibles bajo una licencia de código abierto, usted es libre de adaptarlos a sus necesidades.

Arduino recibió una Mención Honorífica en la sección de Comunidades Digitales del Prix Ars Electronica 2006

**FIGURA 86. ARDUINO UNO**





## LSM303DLM

Sensor module:  
3-axis accelerometer and 3-axis magnetometer

Preliminary data

### Features

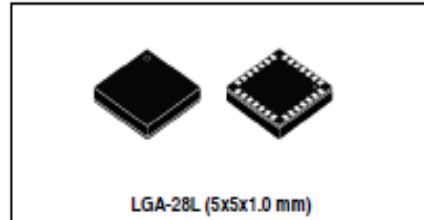
- Analog supply voltage: 2.16 V to 3.6 V
- Digital supply voltage I/Os: 1.8 V
- Power-down mode
- 3 magnetic field channels and 3 acceleration channels
- $\pm 1.3$  to  $\pm 8.1$  gauss magnetic field full-scale
- $\pm 2$  g /  $\pm 4$  g /  $\pm 8$  g dynamically selectable full-scale
- High performance g-sensor
- I<sup>2</sup>C serial interface
- 2 independent programmable interrupt generators for free-fall and motion detection
- Accelerometer sleep-to-wakeup function
- 6D orientation detection
- ECOPACK®, RoHS, and "Green" compliant

### Applications

- Compensated compass
- Map rotation
- Position detection
- Motion-activated functions
- Free-fall detection
- Intelligent power-saving for handheld devices
- Display orientation
- Gaming and virtual reality input devices
- Impact recognition and logging
- Vibration monitoring and compensation

### Description

The LSM303DLM is a system-in-package featuring a 3D digital linear acceleration sensor and a 3D digital magnetic sensor.



The various sensing elements are manufactured by using specialized micromachining processes, while the IC interfaces are realized using a CMOS technology that allows the design of a dedicated circuit which is trimmed to better match the sensing element characteristics. The LSM303DLM has a linear acceleration full-scale of  $\pm 2$  g /  $\pm 4$  g /  $\pm 8$  g and a magnetic field full-scale of  $\pm 1.3$  /  $\pm 1.9$  /  $\pm 2.5$  /  $\pm 4.0$  /  $\pm 4.7$  /  $\pm 5.6$  /  $\pm 8.1$  gauss, both fully selectable by the user.

The LSM303DLM includes an I<sup>2</sup>C serial bus interface that supports standard mode (100 kHz) and fast mode (400 kHz). The system can be configured to generate an interrupt signal by inertial wakeup/free-fall events, as well as by the position of the device itself. Thresholds and timing of interrupt generators are programmable on the fly by the end user.

Magnetic and accelerometer parts can be enabled or put into power-down mode separately. The LSM303DLM is available in a plastic land grid array package (LGA), and is guaranteed to operate over an extended temperature range from -40 to +85 °C.

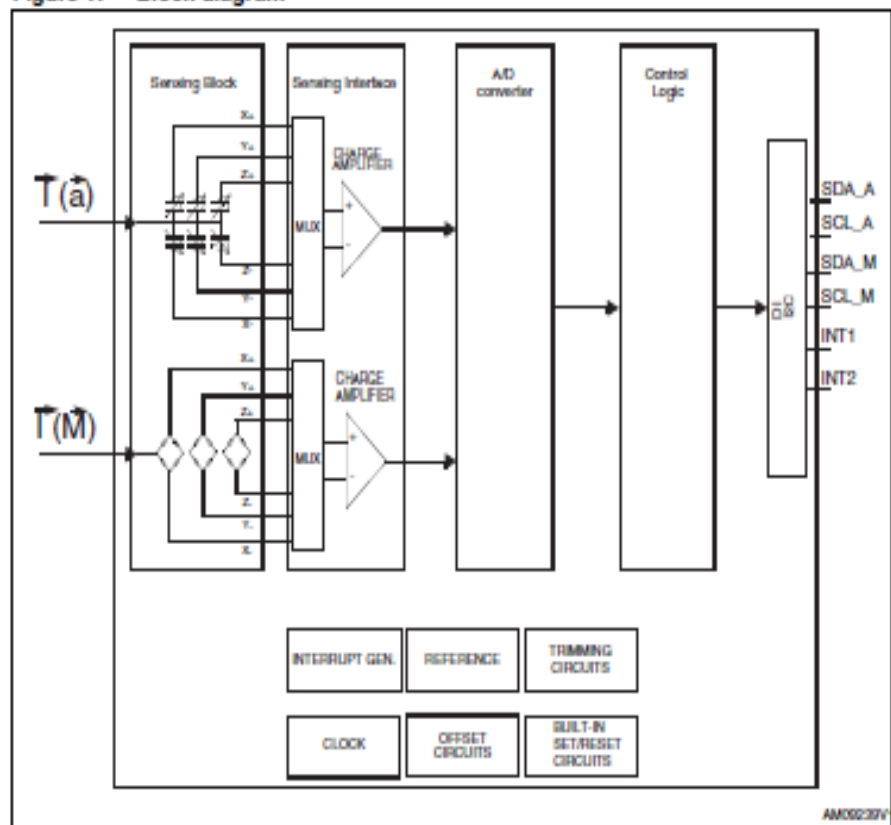
Table 1. Device summary

Part number	Temp. range [°C]	Package	Packing
LSM303DLM	-40 to +85	LGA-28	Tray
LSM303DLMTR			Tape and reel

# 1 Block diagram and pin description

## 1.1 Block diagram

Figure 1. Block diagram



## 1.2 Pin description

Figure 2. Pin connection

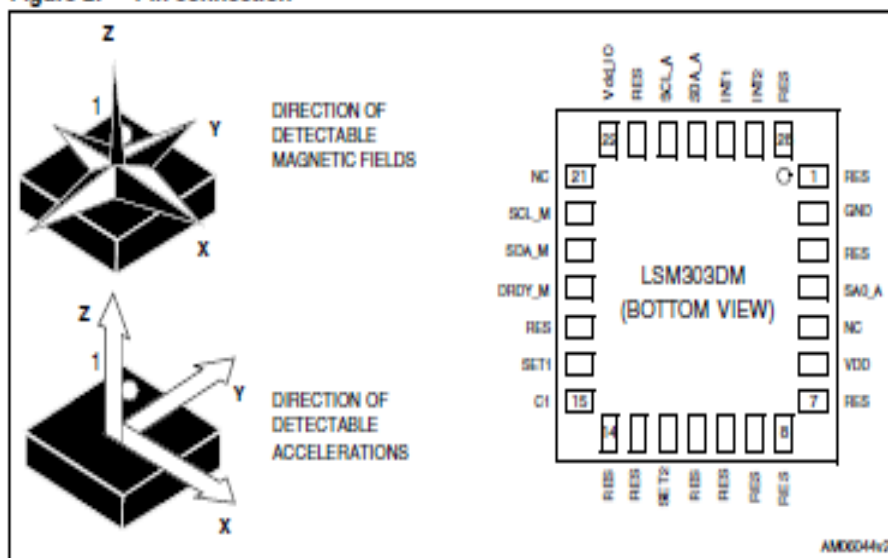


Table 2. Pin description

Pin#	Name	Function
1	Reserved	Connect to GND
2	GND	0 V supply
3	Reserved	Connect to GND
4	SA0_A	Linear acceleration signal I <sup>2</sup> C less significant bit of the device address (SA0)
5	NC	internally not connected
6	Vdd	Power supply
7	Reserved	Connect to Vdd
8	Reserved	Leave unconnected
9	Reserved	Leave unconnected
10	Reserved	Leave unconnected
11	Reserved	Leave unconnected
12	SET2	S/R capacitor connection (C2)
13	Reserved	Leave unconnected
14	Reserved	Leave unconnected
15	C1	Reserved capacitor connection (C1)
16	SET1	S/R capacitor connection (C2)
17	Reserved	Connect to GND
18	DRDY_M	Magnetic signal Interface data ready
19	SDA_M	Magnetic signal Interface I <sup>2</sup> C serial data (SDA)

Table 2. Pin description (continued)

Pin#	Name	Function
20	SCL_M	Magnetic signal interface I <sup>2</sup> C serial clock (SCL)
21	NC	Internally not connected
22	Vdd_IO	Signal interface power supply for I/O pins
23	Reserved	Connect to Vdd_IO
24	SCL_A	Linear acceleration signal interface I <sup>2</sup> C serial clock (SCL)
25	SDA_A	Linear acceleration signal interface I <sup>2</sup> C serial data (SDA)
26	INT1	Inertial Interrupt 1
27	INT2	Inertial Interrupt 2
28	Reserved	Connect to GND

Table 3. Sensor characteristics (continued)

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ. <sup>(1)</sup>	Max.	Unit
LA_TCS0	Linear acceleration sensitivity change vs. temperature	FS bit set to 00		±0.01		%/°C
LA_TyOff	Linear acceleration typical Zero-g level offset accuracy <sup>(3),(4)</sup>	FS bit set to 00		±60		mg
LA_TCOff	Linear acceleration Zero-g level change vs. temperature	Max. delta from 25 °C		±0.5		mg/°C
M_CAS	Magnetic cross-axis sensitivity	Cross field = 0.5 gauss H applied = ±3 gauss		±1		%FS/ gauss
M_EF	Maximum exposed field	No permitting effect on zero reading			10000	gauss
M_R	Magnetic resolution			5		mgauss
M_DF	Disturbing field	Sensitivity starts to degrade. Use S/R pulse to restore sensitivity			20	gauss
Top	Operating temperature range		-40		+85	°C

1. Typical specifications are not guaranteed.
2. Verified by wafer level test and measurement of initial offset and sensitivity.
3. Typical Zero-g level offset value after MSL3 preconditioning.
4. Offset can be eliminated by enabling the built-in high-pass filter.

## 2.2 Electrical characteristics

@ Vdd = 2.5 V, T = 25 °C unless otherwise noted.

Table 4. Electrical characteristics

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ. <sup>(1)</sup>	Max.	Unit
Vdd	Supply voltage	-	2.16		3.6	V
Vdd_IO	Module power supply for I/O		1.71	1.8	Vdd+0.1	V
Idd	Current consumption in normal mode <sup>(2)</sup>			360		µA
IddPdn	Current consumption in power-down mode			2		µA
Top	Operating temperature range			-40		+85

1. Typical specifications are not guaranteed.
2. Magnetic sensor setting ODR = 7.5 Hz. Accelerometer sensor ODR = 50 Hz.



## L3G4200D

### MEMS motion sensor: ultra-stable three-axis digital output gyroscope

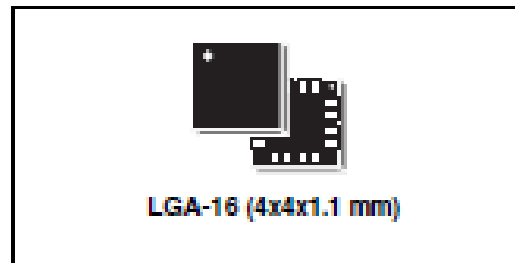
Preliminary data

#### Features

- Three selectable full scales (250/500/2000 dps)
- I<sup>2</sup>C/SPI digital output interface
- 16 bit-rate value data output
- 8-bit temperature data output
- Two digital output lines (interrupt and data ready)
- Integrated low- and high-pass filters with user-selectable bandwidth
- Ultra-stable over temperature and time
- Wide supply voltage: 2.4 V to 3.6 V
- Low voltage-compatible I/Os (1.8 V)
- Embedded power-down and sleep mode
- Embedded temperature sensor
- Embedded FIFO
- High shock survivability
- Extended operating temperature range (-40 °C to +85 °C)
- ECOPACK<sup>®</sup> RoHS and "Green" compliant

#### Applications

- Gaming and virtual reality input devices
- Motion control with MMI (man-machine interface)
- GPS navigation systems
- Appliances and robotics



#### Description

The L3G4200D is a low-power three-axis angular rate sensor able to provide unprecedented stability of zero rate level and sensitivity over temperature and time. It includes a sensing element and an IC interface capable of providing the measured angular rate to the external world through a digital interface (I<sup>2</sup>C/SPI).

The sensing element is manufactured using a dedicated micro-machining process developed by STMicroelectronics to produce inertial sensors and actuators on silicon wafers.

The IC interface is manufactured using a CMOS process that allows a high level of integration to design a dedicated circuit which is trimmed to better match the sensing element characteristics.

The L3G4200D has a full scale of ±250/±500/±2000 dps and is capable of measuring rates with a user-selectable bandwidth.

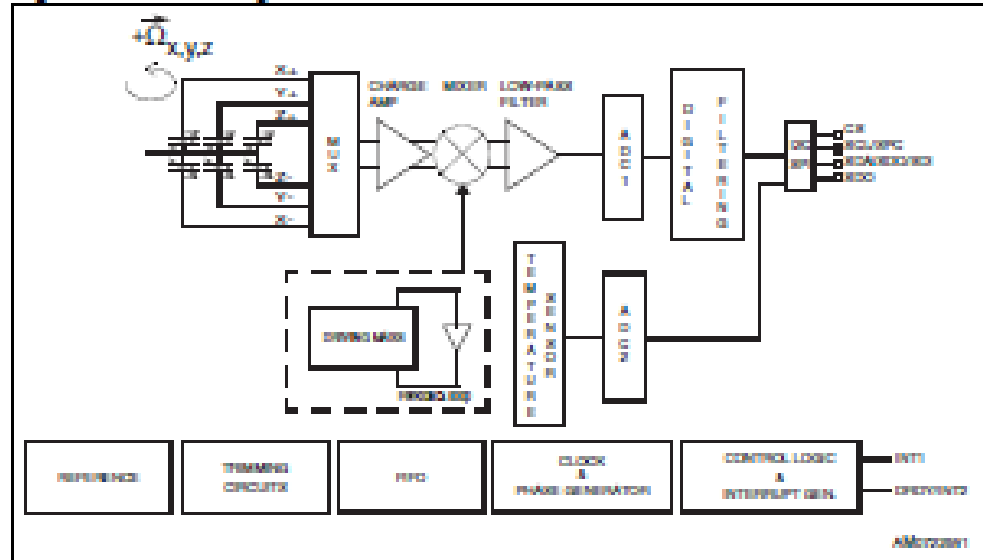
The L3G4200D is available in a plastic land grid array (LGA) package and can operate within a temperature range of -40 °C to +85 °C.

Table 1. Device summary

Order code	Temperature range (°C)	Package	Packing
L3G4200D	-40 to +85	LGA-16 (4x4x1.1 mm)	Tray
L3G4200DTR	-40 to +85	LGA-16 (4x4x1.1 mm)	Tape and reel

# 1 Block diagram and pin description

Figure 1. Block diagram



The vibration of the structure is maintained by drive circuitry in a feedback loop. The sensing signal is filtered and appears as a digital signal at the output.

## 1.1 Pin description

Figure 2. Pin connection

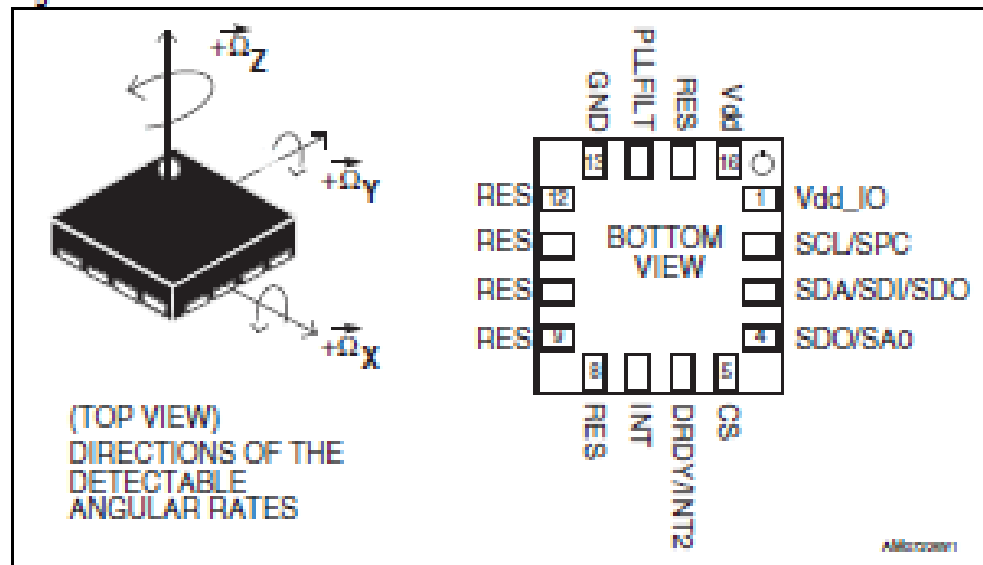
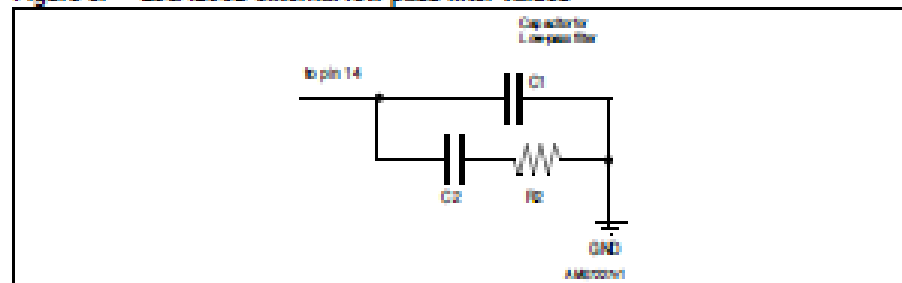


Table 2. Pin description

Pin#	Name	Function
1	Vdd_IO	Power supply for I/O pins
2	SCL SPC	I <sup>2</sup> C serial clock (SCL) SPI serial port clock (SPC)
3	SDA SDI SDO	I <sup>2</sup> C serial data (SDA) SPI serial data input (SDI) 3-wire interface serial data output (SDO)
4	SDO SA0	SPI serial data output (SDO) I <sup>2</sup> C least significant bit of the device address (SA0)
5	CS	SPI enable I <sup>2</sup> C/SPI mode selection (1: SPI idle mode / I <sup>2</sup> C communication enabled; 0: SPI communication mode / I <sup>2</sup> C disabled)
6	DRDY/INT2	Data ready/FIFO interrupt
7	INT1	Programmable interrupt
8	Reserved	Connect to GND
9	Reserved	Connect to GND
10	Reserved	Connect to GND
11	Reserved	Connect to GND
12	Reserved	Connect to GND
13	GND	0 V supply
14	PLLFLT	Phase-locked loop filter (see Figure 3)
15	Reserved	Connect to Vdd
16	Vdd	Power supply

Figure 3. L3G4200D external low-pass filter values <sup>(a)</sup>

a. Pin 14 PLLFLT maximum voltage level is equal to Vdd.