

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA LA  
OBTENCION DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE DE UN POZO PETROLERO**

**DIEGO ALEJANDRO FERREIRA PEREIRA**

**JOSE DANIEL GARCIA LOPEZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**BUCARAMANGA**

**2012**

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA LA  
OBTENCION DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE DE UN POZO PETROLERO**

**DIEGO ALEJANDRO FERREIRA PEREIRA**

**JOSE DANIEL GARCIA LOPEZ**

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

**INGENIERO MECANICO**

**Director**

**JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ**

**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**BUCARAMANGA**

**2012**

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	27
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	27
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	30
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	32
1.3.1 Objetivos Generales	32
1.3.2 Objetivos Específicos	32
2. PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE EN UN POZO PETROLERO	34
3. DISEÑO DEL SISTEMA EMULADOR	38
3.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	39
3.2 Diseño	40
3.3 Diseño del cofre de mando	46

3.4	CONSTRUCCION	47
3.4.1	Diseño preliminar	47
3.4.2	Adquisición de materiales	47
3.4.3	Rediseño	48
4	METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DINÁMICAS, CARGA Y ASOCIACIÓN DE GRÁFICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL DINAGRAMA SUPERFICIE	49
4.1	METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CONDICIONES DINÁMICAS	50
4.1.1	Calibración del acelerómetro	51
4.1.2	Corrección del “DC OFFSET”	53
4.1.3	Adquisición de datos promedio a 30 Hz	55
4.1.4	Adquisición de aceleración	55
4.1.5	Ajuste de aceleración	58
4.1.6	Integrar aceleración a velocidad	60
4.1.7	Ajuste de Velocidad	63
4.1.8	Nuevo reconocimiento de marcas de comienzo de ciclo	64
4.1.9	Forzar el promedio del ciclo de velocidad a cero	64
4.1.10	Velocidad final	64
4.1.11	Integrar la velocidad a posición	65
4.2	DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE CARGA	66
4.2.1	Calibración de la celda de carga	66
4.2.2	Adquisición de datos	68

4.2.3 Almacenamiento de datos	68
4.3 ASOCIACIÓN DE GRÁFICAS PARA LA OBTENCIÓN DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE	69
5 METODOLOGÍA DE REDUCCIÓN DE PUNTOS	71
5.1 DEFINICIÓN	72
5.2 METODOLOGÍA IMPLEMENTADA	74
5.2.1 Almacenamiento temporal de datos	76
5.2.2 Determinación de rango de límites	77
5.2.3 Comparaciones lógicas para determinación de patrones	77
5.2.4 Almacenamiento de dato	79
6 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	81
6.1 ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL PROYECTO	81
6.2 FENÓMENOS FÍSICOS	83
6.3	SENSORES 84
6.3.1 Acelerómetro MMA7361I	86
6.3.2 Celda de carga Lexus tipo s	88
6.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	90

6.4.1	Amplificadores	91
6.4.2	Módulo analógico	93
6.4.3	Siwarex U	96
6.5	HARDWARE DE ADQUISICIÓN	97
6.6	COMPUTADOR	101
7.	MONTAJE Y CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	103
7.1	Conexión del acelerómetro	103
7.1.1	Amplificador operacional con configuración seguidor	104
7.1.2	Conexión del acelerómetro al hardware de adquisición	105
7.2	conexión CELDA DE CARGA	106
7.2.1	Conexión de la celda de carga al amplificador de instrumentación para lectura de la National Instruments	106
7.2.2	Conexión de la celda de carga al modulo de pesaje Siwarex u	107
7.3	MONTAJE GENERAL	108
7.3.1	Montaje general de los dispositivos al PLC	108
7.3.2	Montaje general de los dispositivos a la tarjeta National Instruments	109
8.	ANALISIS DE RESULTADOS	111
8.1	DINAGRAMA SUPERFICIE	111
8.1.1	Posición	111

8.1.2 Carga	115
8.1.3 Dinagrama	116
8.2 REDUCCIÓN DE PUNTOS	118
CONCLUSIONES	122
RECOMENDACIONES	124
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXOS	126

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. UNIDAD MECÁNICA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL POZO 32 DE CEC.	28
FIGURA 2. ADQUISICIÓN MANUAL DE DATOS EN CAMPO ESCUELA COLORADO.	29
FIGURA 3. ESQUEMA GENERAL DEL PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	36
FIGURA 4. UNIDAD MECÁNICA DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL.	38
FIGURA 5. DINAGRAMA DE SUPERFICIE TEÓRICO DE DISEÑO.	40
FIGURA 6. GEOMETRÍA DE UN MACHÍN PETROLERO Y DE UN MECANISMO MANIVELA-BIELA-CORREDERA.	41
FIGURA 7. MANIVELA DEL MECANISMO.	42
FIGURA 8. BIELA DEL MECANISMO.	42
FIGURA 9. CORREDERA DEL MECANISMO.	43
FIGURA 10. GUÍA LINEAL.	43
FIGURA 11. ELEMENTOS DEL MECANISMO DEL PEULA.	44
FIGURA 12. ETAPAS DE ASCENSO Y DESCENSO.	45
FIGURA 13. COFRE DE MANDO.	46
FIGURA 14. DISEÑO FINAL DEL PEULA.	48
FIGURA 15. ESQUEMA GENERAL DE METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CONDICIONES DINÁMICAS.	50

FIGURA 16. ACELERÓMETRO MMA7361L	51
FIGURA 17. EJES CARTESIANOS DEL ACELERÓMETRO	51
FIGURA 18. SEÑALES DE SALIDA DEL ACELERÓMETRO.	52
FIGURA 19. LÍNEA DE CALIBRACIÓN DEL ACELERÓMETRO.	52
FIGURA 20. GRÁFICA ACELERACIÓN VS TIEMPO SIN CORRECCIÓN DEL DC OFFSET.	53
FIGURA 21. GRÁFICA DE VELOCIDAD VS TIEMPO SIN CORRECCIÓN DEL DC OFFSET.	54
FIGURA 22. SEÑAL DE ACELERACIÓN DESPUÉS DE CORRECCIÓN DEL DC OFFSET.	54
FIGURA 23. GRÁFICA ACELERACIÓN VS TIEMPO CON CORRECCIÓN DEL DC OFFSET.	55
FIGURA 24. ZONAS DE INTERÉS PARA DETERMINAR INICIO DE CICLOS.	56
FIGURA 25. COMPARACIONES LÓGICAS PARA OBTENER MARCA DE CAMBIO DE SIGNO DE ACELERACIÓN.	57
FIGURA 26. RECONOCIMIENTO DE CICLO EN ACELERACIÓN.	58
FIGURA 27. CICLO DE ACELERACIÓN.	59
FIGURA 28. CICLO DE ACELERACIÓN ORIGINAL Y FORZADA.	60
FIGURA 29. EJEMPLO DE APROXIMACIÓN DE INTEGRACIÓN.	61
FIGURA 30. ERROR GENERADO EN PRIMER MÉTODO DE APROXIMACIÓN.	61
FIGURA 31. MÉTODO DE APROXIMACIÓN APLICADO AL PROYECTO.	62
FIGURA 32. VELOCIDAD SIN NINGÚN PROCESO DE AJUSTE.	63
FIGURA 33. VELOCIDAD DESPUÉS DE PROCESO DE AJUSTE COMPLETO.	65
FIGURA 34. POSICIÓN CONTRA TIEMPO.	65

FIGURA 35. SOFTWARE SIWATOOL U DE SIEMENS.	66
FIGURA 36. GRÁFICA DE CARGA VS TIEMPO.	69
FIGURA 37. GRAFICA DE CARGA VS POSICIÓN SUPERPUSTAS	70
FIGURA 38. GRÁFICA DE CARGA VS POSICIÓN DE UN CICLO DEL SISTEMA.	70
FIGURA 39. CURVA ORIGINAL Y CURVA CON ÚNICAMENTE PUNTOS SIGNIFICATIVOS.	71
FIGURA 40. EJEMPLO DE REDUCCIÓN DE PUNTOS.	72
FIGURA 41. DINAGRAMA SIN COMPRESIÓN.	73
FIGURA 42. PATRONES QUE RECONOCEN EL PUNTO SIGNIFICATIVO.	74
FIGURA 43. SECUENCIA LÓGICA DE LA METODOLOGÍA DESARROLLADA.	75
FIGURA 44. ALMACENAMIENTO TEMPORAL DE DATOS.	76
FIGURA 45. LÍMITES DE VALORES.	77
FIGURA 46. EJEMPLO DE PATRONES A RECONOCER.	78
FIGURA 47. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADO EN NATIONAL INSTRUMENTS.	82
FIGURA 48. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADO EN PLC.	82
FIGURA 49. FENÓMENOS FÍSICOS ESTUDIADOS EN EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	83
FIGURA 50. DINAGRAMA DE SUPERFICIE.	84
FIGURA 51. UBICACIÓN DE LOS SENSORES EN LA ESTRUCTURA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	85
FIGURA 52. ACELERÓMETRO MMA7361L EN TARJETA.	87
FIGURA 53. MODELO SIMPLIFICADO DEL TRANSDUCTOR.	88

FIGURA 54. CELDA DE CARGA INSTALADA EN EL MECANISMO.	90
FIGURA 55. UBICACIÓN DEL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES EN LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	91
FIGURA 56. AMPLIFICADOR OPERACIONAL LF353.	92
FIGURA 57. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN INA114AP.	93
FIGURA 58. MÓDULO ANALÓGICO SM334 AI4/AO2X8/8BIT.	95
FIGURA 59. CPU315F-2 PN/DP.	98
FIGURA 60. NATIONAL INSTRUMENTS USB-6009.	99
FIGURA 61. UBICACIÓN DEL HARDWARE DE ADQUISICIÓN EN LA ESTRUCTURA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	100
FIGURA 62. UBICACIÓN DEL COMPUTADOR EN LA ESTRUCTURA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	101
FIGURA 63. UBICACIÓN DEL SOFTWARE EN LA ESTRUCTURA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	102
FIGURA 64. CONEXIÓN DEL ACELERÓMETRO.	103
FIGURA 65. CONFIGURACIÓN TIPO SEGUIDOR DE UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL.	104
FIGURA 66. CONEXIÓN A LAS TERMINALES DEL ACELERÓMETRO A LA NI Y AL PLC.	105
FIGURA 67. CONEXIÓN DE LA CELDA DE CARGA AL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN.	106
FIGURA 68. CONEXIÓN DE LA CELDA DE CARGA AL MÓDULO SIWAREX U.	107
FIGURA 69. MONTAJE GENERAL DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS BASADO EN PLC.	108

FIGURA 70. MONTAJE GENERAL DE LOS DISPOSITIVOS A LA NATIONAL INSTRUMENTS.	110
FIGURA 71. POSICIÓN	112
FIGURA 72. CARGA	116
FIGURA 73. DINAGRAMA PLC	117
FIGURA 74. DINAGRAMA LABVIEW	118
FIGURA 75. PORCENTAJES DE REDUCCIÓN.	120
FIGURA 76. RESULTADO # 1 – REDUCCIÓN DE PUNTOS DE DINAGRAMA OBTENIDO DEL PEULA.	121
FIGURA 77. PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.	127
FIGURA 78. REPRESENTACIÓN DE UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL.	129
FIGURA 79. CONFIGURACIÓN TIPO SEGUIDOR DE UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL.	130
FIGURA 80. PATRONES DE LAS CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE FONDO SEGÚN GIBBS & NOLEN	133
FIGURA 81. PATRONES DE LAS CARTAS DINAMOMÉTRICAS DE FONDO SEGÚN GILBERT	134
FIGURA 82. ESQUEMA DE LA PRUEBA LÓGICA PARA DETERMINAR PICOS.	135
FIGURA 83. ESQUEMA DE LA PRUEBA LÓGICA PARA DETERMINAR LAS CRESTAS TIPO A.	136
FIGURA 84. ESQUEMA DE LA PRUEBA LÓGICA PARA DETERMINAR LAS CRESTAS TIPO B.	137
FIGURA 85. ESQUEMA DE LA PRUEBA LÓGICA PARA DETERMINAR LOS CAMBIOS SIGNIFICATIVOS DE PENDIENTE.	138

FIGURA 86. RESULTADOS ADICIONALES POSICIÓN PLC	139
FIGURA 87. RESULTADOS ADICIONALES POSICIÓN LABVIEW	140
FIGURA 88. RESULTADOS ADICIONALES CARGA PLC	141
FIGURA 89. RESULTADOS ADICIONALES CARGA LABVIEW,	141
FIGURA 90. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA PLC #1.	142
FIGURA 91. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA PLC #2	142
FIGURA 92. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA PLC #3	143
FIGURA 93. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA LABVIEW #1	143
FIGURA 94. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA LABVIEW #3	144
FIGURA 95. RESULTADOS ADICIONALES DINAGRAMA LABVIEW #4	144
FIGURA 96. RESULTADO # 2 - REDUCCIÓN DE PUNTOS DE DINAGRAMA OBTENIDO DEL TWM.	145
FIGURA 97. RESULTADO # 3 - REDUCCIÓN DE PUNTOS DE DINAGRAMA OBTENIDO DEL TWM.	146

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DATOS TÉCNICOS DEL ACELERÓMETRO MMA7361L CON BOARD REGULADORA.	87
TABLA 2. DATOS TÉCNICOS DE CELDA DE CARGA LEXUS SP06-AL.	89
TABLA 3. DATOS TÉCNICOS DEL MÓDULO ANALÓGICO.	94
TABLA 4. DATOS TÉCNICOS DEL MÓDULO SIWAREX U.	96
TABLA 5. INTERFAZ RS 232C DEL MÓDULO SIWAREX U.	96
TABLA 6. DATOS TÉCNICOS DEL PLC.	98
TABLA 7. DATOS TÉCNICOS DE LA NATIONAL INSTRUMENTS USB-6009.	99
TABLA 8. RESULTADOS DE POSICIÓN EN LA PLATAFORMA API.	113
TABLA 9. RESULTADOS DE POSICIÓN EN LA PLATAFORMA PC (LABVIEW)	114
TABLA 10. TABLA DE RESULTADOS DE PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE LOS DIVERSOS NIVELES.	119

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	127
ANEXO B. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE DINAGRAMAS	131
ANEXO C. DIAGRAMAS DE CASOS PARA REDUCIR PUNTOS	135
ANEXO D. RESULTADOS ADICIONALES	139
ANEXO E. PLANOS	147

## RESUMEN

**TITULO:** PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS PARA LA OBTENCION DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE DE UN POZO PETROLERO.\*

**AUTORES:** GARCIA LOPEZ José Daniel, \*\*

FERREIRA PEREIRA Diego Alejandro. \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Adquisición de datos, dinagramas, Automatas industriales (PLC), emulador de unidades mecánicas, algoritmo de reducción de memoria, acelerómetro, pozo inteligente, campo inteligente

### DESCRIPCIÓN:

La industria petrolera, más concretamente, los departamentos de producción, están en la continua exploración de métodos que ayuden al mejoramiento e incremento de la producción de yacimientos, por lo cual obligatoriamente se habla de automatización. Por tal razón, dicha industria se está enfocando en la realización e implementación de pozos y campos inteligentes a través de los cuales se detecten con rapidez y precisión los diversos inconvenientes que se pueden presentar en un pozo petrolero. Estos conceptos han tomado auge en los últimos años, pues incorporan una operación autónoma, eficiente y continua, disminuyendo el riesgo operacional y aumentando la producción de crudo mediante la monitorización y administración del yacimiento.

La automatización es la base para llegar al concepto de pozo o campo inteligente, por lo cual, el uso de componentes hardware y software es obligatorio para dicha función. Existen varias empresas a comercializar dichos componentes de software y hardware, pero tales componentes son cerrados, generando con ello una completa dependencia.

En el presente proyecto se realizó un prototipo de adquisición de datos de carga y desplazamiento de la barra pulida de un pozo petrolero, los cuales fueron asociados para obtener los denominados dinagramas de superficie. Se experimentó una metodología de cálculo en dos arquitecturas de hardware distintas en un sistema emulador de una unidad de levantamiento artificial, permitiendo tener una idea general de los conceptos de pozo y campo inteligente. Otros temas que trató el proyecto fueron: almacenamiento de datos, obtención de valores de carga por medio de celdas de carga, realizar un pre-procesamiento de datos para reducir los datos a puntos significativos; son tareas que fueron de suma importancia en el objetivo final de campo inteligente, y son tareas, que el proyecto presente, trató de resolver dentro de su temática.

---

\*Proyecto de Grado

\*\*Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Ing. Jorge Enrique Meneses Flórez.

## ABSTRACT

**TITLE:** PROTOTYPE OF A DATA ACQUISITION SYSTEM TO OBTAIN SURFACE DYNACARDS OF OIL WELLS.

**AUTHORS:** GARCIA LOPEZ Jose Daniel, \*\*

FERREIRA PEREIRA Diego Alejandro. \*\*

**KEY WORDS:** Data acquisition, dyna cards, programmable controller (PLC), pump jack emulator, memory reduction algorithm, accelerometer, intelligent oil well, intelligent oil field.

### DESCRIPTION:

The oil field, more specifically, the production department, are constantly exploring new methods that help improving and increasing the production of oil fields, which mandatorily leads to speak about automation. For this reason, the oil industry is focusing in developing and implementing intelligent wells through which it detects accurately and quickly the problems that might occur in an oil field. This concept has become more and more common during the last years, since it has an autonomous operation, efficient and continuous, decreasing the operational risk and increasing the oil production thanks to the field management.

Automation is the foundation in order to achieve an intelligent well, which, hardware and software is very important for this purpose. There are many companies willing to commercialize these kinds of software and hardware, but their products are closed, generating a complete dependence.

In this project, it has been made a load and position data acquisition prototype of the pump jack's polished rod, which are associated in order to obtain the surface dynagraph charts. An algorithm was experimented in two different kind of hardware in an artificial lift emulating system, allowing to have a general idea of intelligent oil field. Other relevant topics tested in this project are: data storage, data acquisition through a load cell, data pre-processing in order to reduce the data into significant points; these were very important tasks for the intelligent oil field objective as well as they were tasks that the current project tried to solve.

---

\*Graduation Project

\*\*Industrial University of Santander. Faculty of Physical – Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Eng. Jorge Enrique Meneses Florez.

## INTRODUCCIÓN

La Universidad Industrial de Santander y particularmente, la escuela de Ingeniería Mecánica han fomentado el crecimiento de sus estudiantes inculcando en ellos las competencias y los valores morales y éticos, con el propósito de educar profesionales con las habilidades necesarias y requeridas que les permitan proponer soluciones idóneas a cualquier tipo de situación.

En los últimos años el uso de elementos computarizados y electromecánicos que son empleados para el control de procesos industriales, o también llamados sistemas automatizados, han sido extensamente usados para reducir la necesidad del trabajo humano en la producción de bienes y/o servicios. El uso de las herramientas de automatización tales como: la interfaz hombre-máquina (HMI), control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), controladores lógicos programables (PLC), instrumentación, entre otros, han hecho grandes cambios en la industria, pues mediante estas herramientas se mejora la economía de las empresas, de la sociedad e incluso de la humanidad; se reducen los tiempos de operaciones, se liberan los trabajadores de sus tareas actuales para que puedan asumir otros roles, se desarrollan labores que estaban más allá de las capacidades humanas.

Teniendo en cuenta lo citado anteriormente, la implementación de estos sistemas industriales automatizados han tenido una notable participación en lo que actualmente se llaman pozos y campos inteligentes, que se pueden definir como un pozo o campo con capacidades de medición y control en el lugar de realización. También es preciso indicar que un campo o pozo inteligente puede ser llamado inteligente si, y sólo si, le añade valor al proyecto durante su ciclo de vida. La tecnología de pozos y campos inteligentes han mostrado diferentes beneficios, sin embargo, los retos de éstos se encuentran en su confiabilidad, su rentabilidad

y fases de ejecución. Como resultado, muchas compañías tienden a aplicar esta tecnología con precaución sabiendo que el costo de un sistema inteligente puede ser fácilmente tres o incluso cuatro veces mayor que el campo original.

A través de la automatización es posible monitorear remotamente y controlar la producción de campos buscando garantizar una máxima producción, un mínimo costo de operación y extender la vida útil del equipo. El objetivo de realizar un proyecto de automatización de un campo petrolero, consiste en integrar todos los pasos necesarios para poder optimizar un pozo a través de técnicas avanzadas de control y la cual comprenden tres módulos: 1) Adquisición de datos; 2) Procesamiento de datos en tiempo real; 3) Control sobre las variables del campo, teniendo en cuenta el paso 2).

Los sensores son considerados como el corazón de un campo inteligente y posibilitan el control del comportamiento de un pozo petrolero. Algunos de estos sensores se utilizan para la medición de las variables del pozo y otros para visualizar los atributos de éste. Existen variables importantes que se deben medir en un pozo petrolero y algunas de ellas se pueden determinar mediante los sensores pertinentes.

Este trabajo de grado se enfocó en la adquisición de dos variables importantes en el bombeo mecánico las cuales son: carga y posición. La adquisición de datos es un proceso que consiste en la obtención de muestras que miden las condiciones físicas del mundo real y convierten tales muestras en valores numéricos digitales que posteriormente pueden ser manipulados por un computador. Entre los componentes que incluyen un sistema de adquisición de datos se encuentran los siguientes: sensores, acondicionadores de señales y convertidores analógicos-digitales.

En el bombeo mecánico, el dinamómetro para la barra pulida, es un instrumento con el que se adquiere un registro continuo del patrón de fuerzas a través del

desplazamiento de la barra pulida. Estas cargas son registradas en una carta, describiendo una curva cerrada llamada dinagramas. Los dinagramas se clasifican en dos grupos los cuales son: de superficie y de fondo. El dinagrama de superficie, mediante la aplicación de procesos matemáticos, facilita la obtención del dinagrama de fondo, el cual es una representación gráfica del trabajo mecánico que desempeña la unidad y permite determinar, con alta precisión, las diferentes fases de un ciclo de bombeo, como también da una idea de las condiciones de la bomba, de la varilla de succión y de la unidad de bombeo en general.

Con base en lo expuesto anteriormente, en este trabajo se planteó un prototipo de adquisición de datos que permitió la visualización de dinagramas de superficie usando sensores apropiados, hardware para el tratamiento de la señal de los sensores, algoritmos matemáticos que procesen las señales emitidas por los sensores y software para ejecutar los algoritmos y para la visualización de los dinagramas.

El presente libro explica de manera detallada las consideraciones previamente mencionadas. Para lograr una mejor comprensión del mismo, se organizan los capítulos la siguiente forma:

- 1. Importancia y objetivos del proyecto.* En esta sección se da a conocer la problemática tratada, la justificación de la misma y los objetivos generales y específicos que se desarrollaron en el presente proyecto
- 2. Prototipo de un sistema de adquisición de datos para la obtención de dinagramas de superficie en un pozo petrolero.* Presenta la idea general del proyecto mostrando los diversos desarrollos realizados a lo largo de la ejecución del presente proyecto de una manera resumida.

3. *Diseño del sistema emulador.* Se muestran las distintas consideraciones en el diseño del sistema emulador, tanto mecánicas, cinemáticas, de la caja de mando. Adicionalmente se muestra el modelo desarrollado y todas sus especificaciones técnicas.

4. *Metodologías implementadas de posición y carga.* En este capítulo se hace referencia al desarrollo generado por parte de los autores en cuanto a las metodologías implementadas para obtener las condiciones dinámicas (aceleración, velocidad y posición), mostrando una explicación detallada del mismo a partir de mediciones de aceleración. De igual manera se explica la adquisición de la carga del **Prototipo Emulador de Unidad de Levantamiento Artificial** (de ahora en adelante denominado **PEULA**), a partir de mediciones de la celda de carga.

5. *Metodología de reducción de puntos.* En este capítulo se explica la metodología desarrollada e implementada para la reducción de memoria de almacenamiento, mediante la reducción de puntos de una función por medio de una serie de comparaciones lógicas y que a su vez permita recrear fielmente la función original con menor cantidad de memoria.

6. *Estructura del sistema de adquisición de datos.* En este capítulo se describe el sistema de adquisición de datos implementado en el proyecto, mirando su estructura y los diferentes componentes de un sistema de adquisición que fueron implementados en el proyecto. De igual forma, se describen los diversos equipos y/o componentes hardware que fueron utilizados, funciones y referencias de los diversos elementos.

7. *Montaje y conexión de los dispositivos electrónicos.* En esta sección se explican las diversas consideraciones para montar y conectar los circuitos auxiliares implementados en el PEULA.

8. *Análisis de resultados.* Se tratan los resultados obtenidos del prototipo de adquisición de datos aplicados en el PEULA.

9. *Conclusiones*

10. *Recomendaciones.*

11. *Anexos.* En esta sección se tiene toda la información complementaria referente al proyecto como lo es marco teórico, hojas de especificaciones, planos y demás.

# 1. IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

## 1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La Universidad Industrial de Santander y la escuela de Ingeniería Mecánica han intentado promover las diversas competencias de sus estudiantes, con el fin de formar profesionales con alta calidad humana, ética, política, técnica y científica.

La industria petrolera, más concretamente, los departamentos de producción, están en la continua exploración de métodos que ayuden al mejoramiento e incremento de la producción de yacimientos, por lo cual obligatoriamente se habla de automatización. Por tal razón, dicha industria se está enfocando en la realización e implementación de pozos y campos inteligentes a través de los cuales se detecten con rapidez y precisión los diversos inconvenientes que se pueden presentar en un pozo petrolero. Estos conceptos han tomado auge en los últimos años, pues incorporan una operación autónoma, eficiente y continua, disminuyendo el riesgo operacional y aumentando la producción de crudo mediante la monitorización y administración del yacimiento.

Son muchos los pozos petroleros existentes en Colombia y en el mundo, que cuentan con unidades mecánicas de levantamiento artificial de crudo, el cual se estima que es el método más usado(alrededor del 90%).

En la búsqueda de optimizar el proceso de extracción de petróleo de pozos petroleros con unidades mecánicas de levantamiento artificial, es fundamental implementar un sistema automatizado a estos, el cual se conoce como Pozos Inteligentes. Se habla de Campos Inteligentes cuando se intercomunican todos estos pozos inteligentes y se hace un proceso de monitoreo y administración de datos de cada uno de ellos en una plataforma conjunta.

Figura 1.Unidad mecánica de levantamiento artificial Pozo 32 de CEC.



Fuente: Autores

Para analizar el rendimiento de las unidades de levantamiento artificial, se tiene como la herramienta más importante los dinagramas de fondo de pozo. Estos, son curvas que asocian la fuerza y el desplazamiento del sistema. Como es casi imposible medir estas variables a las profundidades del pozo, es posible calcularlas mediante un análisis, teniendo en cuenta la configuración de varillas en serie que hay desde la superficie hasta el fondo del pozo y las mediciones que se hacen en la cabeza del pozo. Los datos obtenidos de carga y posición en la superficie se conocen como dinagramas de superficie, y son el objetivo fundamental de la adquisición de datos de un sistema de pozo inteligente. Una vez calculado los dinagramas de superficie se realiza un procedimiento de cálculo respectivo y se obtiene los dinagramas de fondo que permitirán obtener información valiosa sobre las condiciones de la unidad, como los son:

- Porcentaje de llenado de bomba
- Operación y fuga de válvulas de la bomba
- Distribución de carga en las sarta de varillas

- Desplazamiento efectivo del pistón de la bomba
- Cargas máximas y mínimas, están dentro de la capacidad de la unidad.
- Otros.

Obtener los dinagramas de superficie, es el objetivo principal de la adquisición de datos para poder llegar a diagnosticar el pozo. Para el caso específico de Campo Escuela Colorado, el proceso de adquisición de datos se hace manualmente cada cierto tiempo, es decir, que se programa la inspección para realizar el diagnóstico de cada pozo según una rutina establecida, el cual implica transporte de personal, equipos, horas hombre, incertidumbre del proceso entre cada ronda, costos de tiempo y presupuesto.

Figura 2. Adquisición manual de datos en Campo Escuela Colorado.



Fuente: Autores

De acuerdo a lo expuesto, se puede identificar la problemática como: el desarrollo de un prototipo de adquisición de datos que permite la obtención de dinagramas de superficie, evaluado en un prototipo emulador de una unidad de levantamiento artificial (de ahora en adelante denominado PEULA), que permite establecer las bases para un desarrollo de un sistema de pozo inteligente y posteriormente, el concepto de campo inteligente.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La automatización es la base para llegar al concepto de pozo o campo inteligente, por lo cual, el uso de componentes hardware y software es obligatorio para dicha función. Existen varias empresas a comercializar dichos componentes de software y hardware, pero tales componentes son cerrados, generando con ello una completa dependencia. A su vez, se comercializan productos que realizan la función de diagnóstico pero no integrada a una función de monitoreo continuo.

A nivel nacional no se encuentra desarrollos propios que conduzcan a la aplicación de conceptos de pozos inteligentes, mientras que en la región latinoamericana, encontramos a Brasil que ha soportado la investigación de desarrollos de hardware y software propios, liderados especialmente por PETROBRAS y Universidades del mismo país.

Adicionalmente, se tiene que Campo Escuela Colorado ya es un campo maduro y no es conveniente la implementación de software comercial, pues sus altos costos no justifican la inversión y se torna importante el acuerdo que hay con la Universidad Industrial de Santander. Este acuerdo propone un acercamiento entre la academia y la industria nacional de hidrocarburos, siendo este un espacio importante a la hora de propiciar el desarrollo de proyectos de investigación y apropiación tecnológica.

En el presente proyecto se realizó un prototipo de adquisición de datos de carga y desplazamiento de la barra pulida, los cuales fueron asociados y se obtuvo los denominados dinagramas de superficie. Se experimentó una metodología de cálculo en dos arquitecturas de hardware distintas en un sistema emulador de una unidad de levantamiento artificial, permitiendo tener una idea general de los conceptos de pozo y campo inteligente. Este prototipo de sistema de adquisición, planteó una alternativa desarrollada internamente para adquirir las variables requeridas de estos procesos, frente a lo que se hace actualmente de manera

manual y con software comercial, siendo esta una primera fase de desarrollo dejando espacio para fases adicionales que en conjunto lleguen al concepto de campo inteligente, diseñado e implementado localmente, siendo una solución propia y abierta para el desarrollo de la academia y la industria nacional.

Generar la metodología para obtener posicionamiento por medio de un acelerómetro en unidades de levantamiento artificial, fue de vital importancia, por lo cual existen patentes al respecto, pero se planteó una alternativa a dichas soluciones. Otros temas que trató el proyecto fueron: almacenamiento de datos, obtención de valores de carga por medio de celdas de carga, realizar un pre-procesamiento de datos para reducir los datos a puntos significativos, son tareas que fueron de suma importancia en el objetivo final de campo inteligente, y son tareas que el proyecto presente, trató de resolver dentro de su temática.

Las razones por las cuales la industria nacional y mundial se ha enfocado en estos conceptos, son sus grandes beneficios obtenidos, algunos de dichos beneficios son tratados en un estudio realizado SUN E&P, el cual fue un estudio de alrededor de 5 años, que trata de los costos y beneficios de implementar estos sistemas. Algunos de los beneficios obtenidos en el estudio son:

- Crecimiento de la producción de crudo y gas (3.8% - 13.9%). Este incremento en la producción es directo resultado de la reducción de tiempo muerto, mejor supervisión general y mejores eficiencias operacionales.
- Permitirá detectar fallas y/o bajas eficiencias con mucha anterioridad, de las cuales se resaltan, detectar la baja eficiencia de las bombas rápidamente, detectar basura en tuberías, alarma inmediata de problemas, detectar filtración rápidamente, determinar problemas de parafina en la línea de flujo.
- Disminución sustancial en el consumo energético del sistema
- Habilidad de rastrear las bombas de pozo en pozo con mucha más facilidad.

## 1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.3.1 Objetivos Generales

- Contribuir en el compromiso misional que tiene la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER en formar personas de alta calidad de profesionales e investigadores y del CAMPO ESCUELA COLARADO en desarrollar proyectos de investigación y apropiación tecnológica, en el desarrollo tecnológico de la cadena productiva de los hidrocarburos.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar y construir un Prototipo Emulador de una Unidad de Levantamiento Artificial (de ahora en adelante: **PEULA**), que permita emular el movimiento lineal alternativo y condiciones de carga de las unidades de bombeo, con las siguientes características:
  - Desplazamiento del movimiento lineal alternativo superior a 30 cm.
  - Velocidad de rotación: [5-12 rpm].
  - Condición de carga en descenso: Emulación de peso de sarta de varillas.
  - Condición de carga en elevación: Emulación de peso de la sarta de varillas y la fuerza de empuje de la bomba.
- Desarrollar un prototipo de adquisición de datos basado en API y en Plataforma PC (Tarjetas de adquisición de datos NationalInstrument) que permita:
  - Adquirir Aceleración en función del Tiempo. 3 Señales Analógicas (Ejes X, Y y Z).
  - Adquirir fuerza en función del tiempo. 1 Señal de Celda de carga.

- Con Frecuencia de adquisición: 20-33 Hertz.
- Tiempo de adquisición: 60 segundos.
- Con equipos:
  - Tarjeta de adquisición NI USB-6009
  - PLC S7-315F 2PN-DP
- Desarrollar e implementar una metodología de cálculo para determinar la velocidad y posicionamiento en función del tiempo, del PEULA, de datos de aceleración provenientes de un sensor acelerómetro de referencia MMA7361.
- Desarrollar e implementar una metodología que permita determinar la carga en función del tiempo, del PEULA, de los datos adquiridos por medio de una celda de carga tipo S con una capacidad máxima a soportar de veinticinco kilogramos (25Kg).
- Obtener dinagramas de superficie del PEULA, relacionando la posición de la barra pulida con los datos de fuerza, los cuales son adquiridos mediante el sistema de adquisición de datos.
- Desarrollar e implementar una metodología de reducción de puntos de una función basada en comparaciones lógicas logrando la selección de únicamente los puntos significativos de la función, disminuyendo la memoria requerida de almacenamiento.

## **2. PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE EN UN POZO PETROLERO**

El presente capítulo muestra la idea general del proyecto mostrando los diversos desarrollos realizados a lo largo de la ejecución del mismo de una manera resumida.

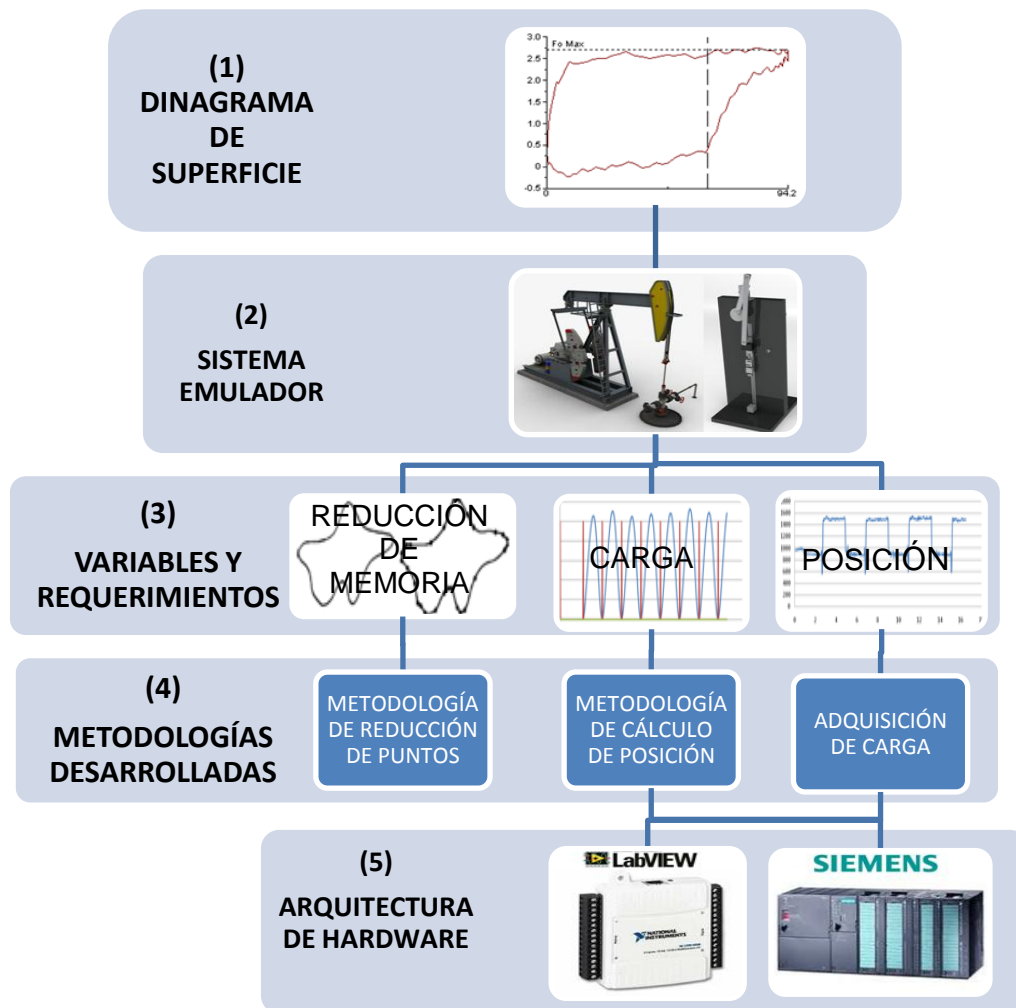
El prototipo de sistema de adquisición de datos desarrollado, surge de la necesidad del desarrollo propio y abierto de un sistema que acerque los conceptos de pozo y campo inteligente.

Para todo esto, es fundamental la obtención de dinagramas (Figura 3.1), los cuales son cartas o graficas que muestran una relación entre posición y carga del sistema. Éstos dinagramas son los instrumentos más importantes que se tienen para el diagnóstico de pozo y campos petroleros debido a que un análisis de estas cartas permite reconocer los diversos comportamientos que suceden en el pozo petrolero, siendo una analogía con el análisis de espectros en vibraciones mecánicas y la detección de fallas en maquinas. Cabe decir, que existen dos tipos de dinagramas, uno superficial que corresponde a las mediciones de los valores de carga y posición en la superficie del pozo, graficas en la cual el presente proyecto se enfocó y dinagramas de fondo, que son el resultado de un proceso matemático aplicado al dinagrama superficial previamente mencionado.(Ver ANEXO B).

Para lograr obtener estas cartas, se requiere de una unidad de levantamiento artificial y debido a la complejidad existente en hacer desarrollo y pruebas permanentes en pozos petroleros, surgió la necesidad de desarrollar un sistema que emule el comportamiento de desplazamiento y de cargas de una unidad

mecánica de levantamiento artificial. Para ello, se diseñó el PEULA (Figura 3.2), el cual emula el movimiento alternativo presente en dichas unidades mecánicas mediante un mecanismo manivela-biela-corredera, donde el movimiento rotacional del motor se transforma en un movimiento de traslación de la corredera, emulando el movimiento presente en la barra pulida de las unidades mecánicas, las cuales se basan en un mecanismo cuadrilátero articulado para lograr dicho movimiento de traslación.

Figura 3. Esquema general del prototipo de adquisición de datos.



Fuente: Autores.

De la misma forma que el PEULA emula el comportamiento de traslación, éste debe responder a los comportamientos de carga presentes en estas mismas. Las unidades poseen una sarta de varillas que son un peso fijo para los requerimientos de carga, adicionalmente, la acción de bombeo del fluido es un peso que se presenta en el movimiento ascendente de la unidad. Por ello, el PEULA desarrollado presenta estas dos cargas para emular este comportamiento particular. Un peso fijo emulando el comportamiento de la sarta de varillas y un peso que se une en el punto muerto inferior mediante la excitación de un electroimán y se mantiene adherido hasta el punto muerto superior, donde el electroimán deja de ser energizado, y por ende, la carga emuladora del proceso de bombeo es descolgada.

Con estos principios de funcionamiento, el PEULA permite emular de la manera requerida tanto el movimiento alternativo presente en la barra pulida, como el comportamiento de cargas durante el ciclo de ejecución.

Una vez diseñado y desarrollado el sistema emulador, se tiene que para la obtención del dinagrama superficial de dicho elemento, se requieren dos variables principalmente: carga y posición (Figura 3.3), pues son estas las variables que se deben relacionar para construir los dinagramas. Debido a esto, fue necesario el desarrollo de metodologías especiales que permitiesen adquirir de manera precisa dichas variables. Estas metodologías hacen referencias a: desarrollo e implementación de una metodología de cálculo para la obtención de la posición; desarrollo e implementación de un proceso de adquisición de carga.

Para la obtención de posición, se usó un acelerómetro para obtenerla medida de posición de la barra pulida a partir de las mediciones de aceleración y mediante el uso de un protocolo de cálculo basado en procesos de ajustes y de doble integración en dichas mediciones.

La adquisición de carga se plantea mediante la medición de carga por medio de una celda de carga tipo S conectada al dispositivo emulador.

Adicionalmente a estos procesos, se experimentó en la reducción de memoria de almacenamiento, el cual hace referencia a la capacidad de representar fielmente una curva, que en el caso de estudio son los dinagramas obtenidos con una reducción significativa de los puntos almacenados. Para tal objetivo, se desarrolló e implementó una metodología de reducción de puntos basado en el reconocimiento de unos patrones, que mediante una serie de comparación lógica, determina cual punto no es relevante para la representación de la grafica. Una vez reconocido el patrón, se almacena el punto correspondiente, despreciando los otros, con lo cual se reduce la cantidad de puntos y que a su vez permite representar el mismo comportamiento presente en los dinagramas pero con menor cantidad de puntos, lo cual se transforma en menor memoria de almacenamiento.

Dentro de un objetivo global para las próximas etapas de desarrollo de los conceptos de pozos y campos inteligentes, es fundamental el tema de las arquitecturas de hardware, por tal razón se buscó evaluar el comportamiento de dos arquitecturas, pensadas para dos posibles escenarios (Figura 3.5). El primer escenario sería la instalación de un PLC en cada pozo, haciendo los respectivos procesos de adquisición, procesamiento y de las respectivas operaciones de maniobra y control. El otro escenario sería la instalación de dispositivos hardware desarrollados para adquirir y transmitir datos a una plataforma PC.

Para evaluar estos dos posibles escenarios, se aplicaron las metodologías anteriormente mencionadas a un autómata programable industrial (PLC Siemens) y a una tarjeta de adquisición de datos de National Instrument basada en LabVIEW. Adicionalmente, se demostró la versatilidad de las metodologías desarrolladas donde se observó su funcionalidad independientemente del lenguaje de programación o la arquitectura de hardware empleada.

### 3. DISEÑO DEL SISTEMA EMULADOR

En este capítulo se explican las diversas consideraciones de diseño y construcción del Prototipo Emulador de Unidad de Levantamiento Artificial (PEULA), el cual como su nombre indica, emula el comportamiento dinámico y de cargas de una unidad mecánica de levantamiento artificial en operación óptima.

Figura 4. Unidad mecánica de levantamiento artificial.



Fuente: Northern Arizona Wind&Sun

El Prototipo Emulador de una Unidad de Levantamiento Artificial (PEULA) cuenta con un motorreductor DC de 24V que gira a bajas revoluciones, de 7-16 RPM según el voltaje de alimentación, una manivela de aluminio de dimensiones 36cm x 3.8cm x 1 cm (largo, ancho y espesor), una biela de aluminio de dimensiones 60cm x 3.8cm x 1 cm (largo, ancho y espesor), un imán, un contrapeso, una celda de carga, un acelerómetro, un autómatas programable industrial, una tarjeta National Instruments y una estructura con un perfil rectangular de 3" x 1.5" de acero calibre 18.

La estructura se encuentra dividida en dos secciones; en una sección de la estructura está instalado el mecanismo que emula el movimiento de una unidad de

levantamiento artificial y la otra sección contiene los dispositivos encargados de la adquisición (National Instruments y Autómata Programable Industrial). Se tomó la decisión de diseñar la estructura de esta manera para tener un sistema compacto y de fácil transporte. Igualmente, esta configuración permite un fácil cableado del acelerómetro, la celda de carga, el motor y el imán hacia los dispositivos de procesamiento.

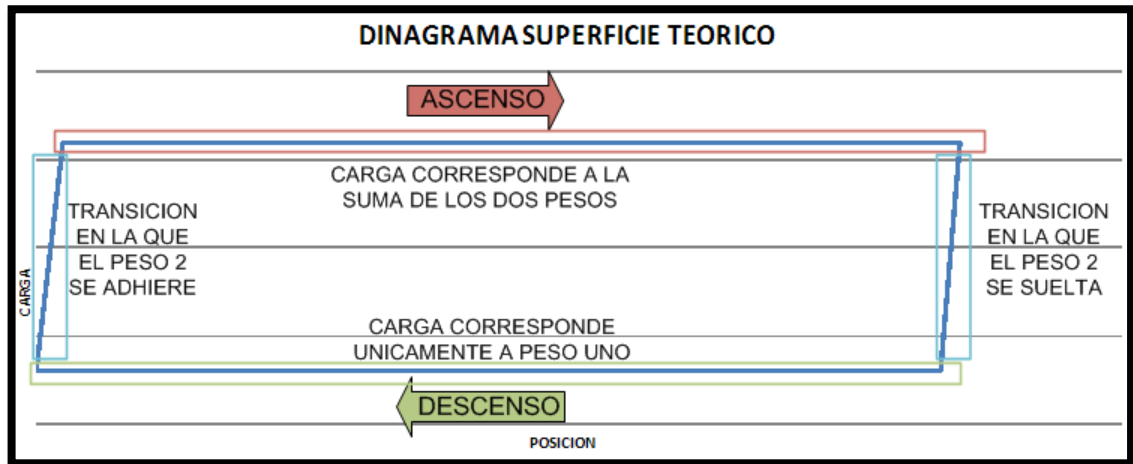
### **3.1 CONSIDERACIONES DE DISEÑO**

Un equipo de levantamiento artificial por bombeo mecánico produce un movimiento alternativo que impulsa una bomba sumergible en un yacimiento petrolífero. Un motor eléctrico gira un par de manivelas que se encuentran unidas a un extremo de un eje de metal, y que por su acción rotativa, suben y bajan el eje. Este último, tiene en el otro extremo una punta curva que se encuentra unida a una barra de metal que se mueve de arriba hacia abajo. La barra se une a una bomba de profundidad en un pozo de petróleo. Todo este sistema de balancín imparte el movimiento de sube y baja a la sarta de varillas de succión que mueve el pistón de la bomba a cierta profundidad del fondo del pozo.

Las condiciones de carga para las unidades mecánicas de levantamiento artificial tienen principalmente dos cargas. La carga de descenso que es particularmente el peso de la sarta de varillas que hay desde la barra pulida hasta la bomba de profundidad. Y una carga de ascenso que corresponde a la sarta de varillas previamente mencionada y la acción de bombeo que varía dependiendo de las condiciones en las cuales se encuentra dicho pozo.

Teniendo en cuenta dichas consideraciones de funcionamiento se plantea un diseño basado en un dinagrama que muestre una carga aproximadamente constante en descenso denominada PESO 1 y en ascenso, una carga correspondiente a la suma de PESO 1 y PESO 2, la cual se consideró que fuera aproximadamente constante.

Figura 5. Dinagrama de superficie teórico de diseño.



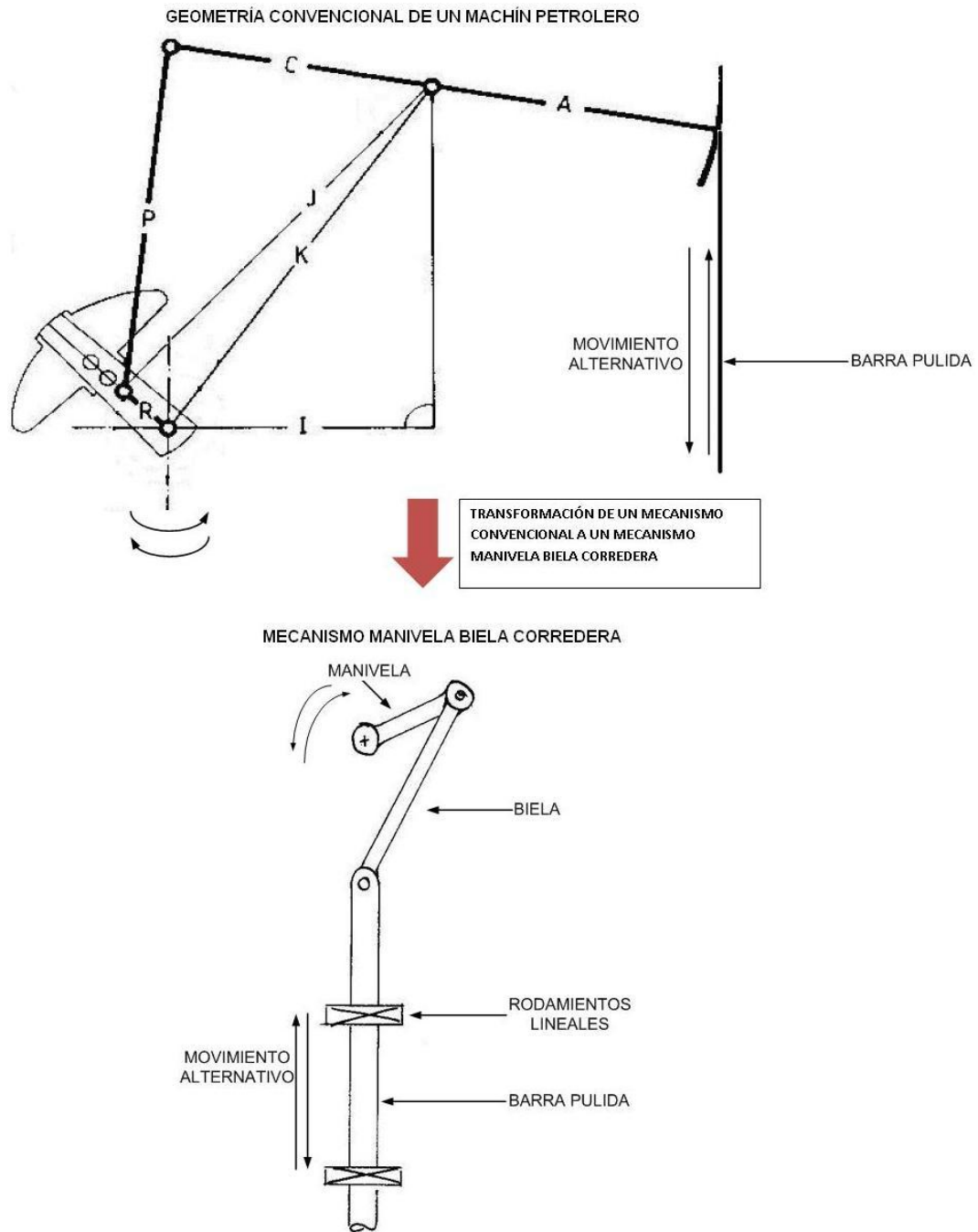
Fuente: Autores

### 3.2 DISEÑO

Para poder emular el movimiento alternativo que tiene un machín petrolero, se diseñó y construyó un mecanismo manivela-biela-corredera cuyo movimiento alternativo vertical es similar al del machín, pero difiere en su estructura y geometría. Se optó por este mecanismo debido a su simplicidad en el diseño y en la construcción. En la figura 6 se puede visualizar un esquema general de la diferencia en la geometría de ambos mecanismos y su similitud cinemática.

El mecanismo tipo manivela-biela-corredera transforma el movimiento circular del motor en un movimiento de traslación. La manivela es una palanca que se encuentra unida en la mitad a un motorreductor, que tiene unida en un extremo a la biela y en el otro un contrapeso. Esta instalación le facilita a la biela moverse alternativamente, de arriba hacia abajo, garantizando consecuentemente el movimiento lineal de la corredera.

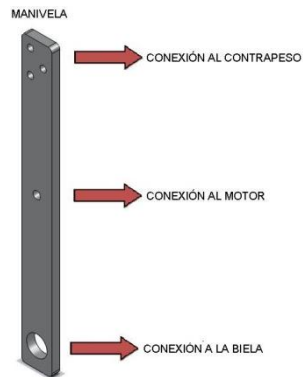
Figura 6. Geometría de un machín petrolero y de un mecanismo manivela-biela-corredera.



Fuente: Autores.

La manivela es una pieza rígida del mecanismo, que en su centro se encuentra unida al motorreductor, en un extremo al contrapeso y en su otro extremo a la biela. El material de este elemento es aluminio, el cual es resistente y liviano.

Figura 7. Manivela del mecanismo.



Fuente: Autores.

La biela es un elemento rígido y largo, que se encuentra unida en un extremo a la manivela y en el otro extremo a la corredera del mecanismo. El material de la de la biela es aluminio, debido a que es una pieza que debe resistir los esfuerzos de trabajo.

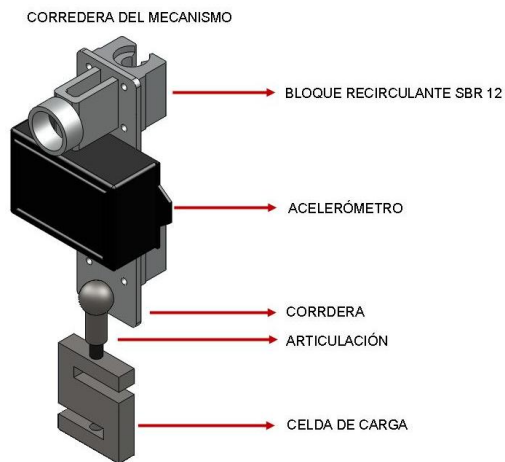
Figura 8 Biela del mecanismo.



Fuente: Autores.

La corredera del mecanismo es una placa de acero, que en un extremo está acoplada a la biela en el resto de cuerpo tiene instalada la celda de carga y el acelerómetro.

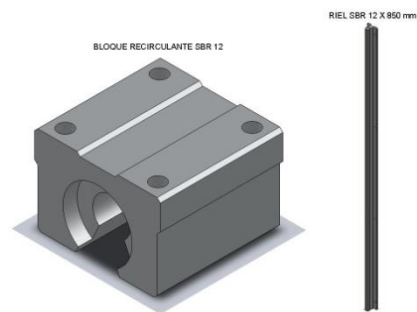
Figura 9. Corredera del mecanismo.



Fuente: Autores.

La corredera se mueve a través de un riel, que es un eje de acero cromado y está soportado en una base de aluminio. El desplazamiento a lo largo del riel se da gracias a un bloque re circulante, que tiene atornillado dentro de él, un rodamiento lineal que le permite realizar esta acción.

Figura 10. Guía lineal.



Fuente: Autores.

En la siguiente figura se muestran todos los elementos que hacen parte del mecanismo y su ensamblaje. Estos elementos son: el contrapeso, la manivela, la biela, la corredera, la guía lineal, el peso 1 emulador de la sarta de varillas y el peso 2 emulador del peso del fluido.

Figura 11. Elementos del mecanismo del PEULA.

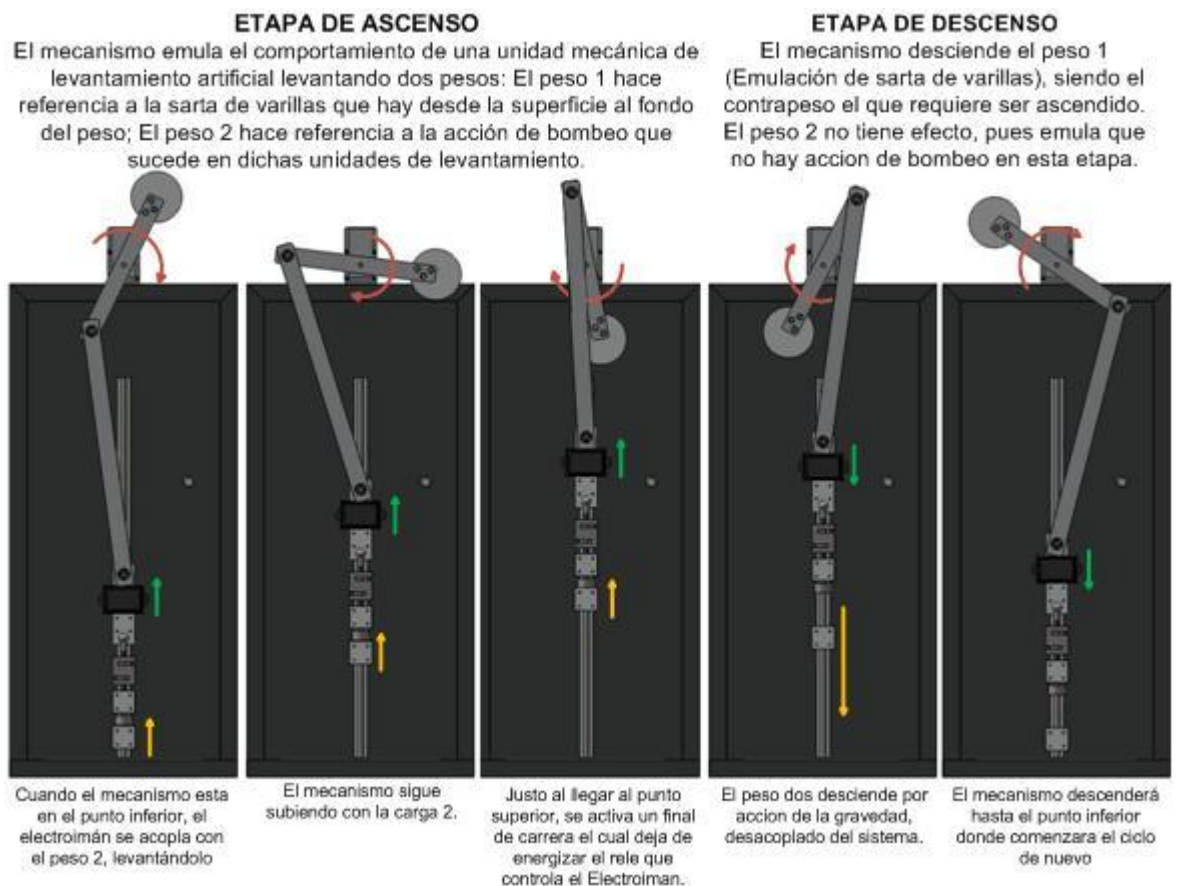


Fuente: Autores.

El mecanismo está compuesto de dos etapas, una primera etapa ascendente y una segunda etapa descendente. Durante la etapa descendente la celda de carga es sometida bajo el efecto impuesto por una carga fija a ella, simulando de esta manera el peso de la sarta de varillas de un sistema de levantamiento

artificial real. Por otro lado, en la etapa ascendente se le induce al imán, que se encuentra acoplado a la celda de carga, 12 voltios creando un campo magnético y uniendo a él una segunda carga que se encuentra descansando en la base de la estructura y que representa el volumen que desplaza el pistón instalado en el fondo del pozo. Estas dos etapas definen en el proceso un punto muerto superior y un punto muerto inferior, que se usan en la programación para establecer las condiciones de frontera al integrar la aceleración y para activar o desactivar el imán dependiendo del ciclo en el que se encuentra el mecanismo.

Figura 12. Etapas de ascenso y descenso.

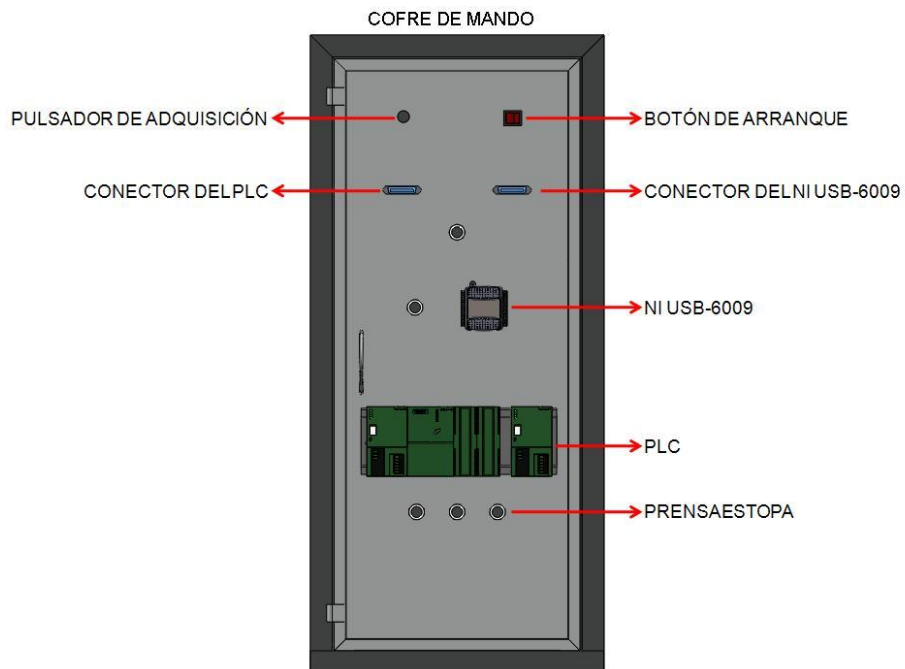


Fuente: Autores.

### 3.3 DISEÑO DEL COFRE DE MANDO

El cofre de mando está en la parte posterior de la estructura y los elementos que se destacan de esta sección son: botón de arranque, pulsador de adquisición, conector del PLC, conector del NI USB-6009, NI USB-6009 y PLC. Cada uno de estos elementos es fundamental para la adquisición de datos. El botón de arranque, al ser accionado, pone en marcha el motor; el pulsador de adquisición inicia la adquisición de datos cuando es oprimido por el usuario; el conector del NI USB-6009 envía las señales del acelerómetro y de la celda de carga al NI; el conector del PLC envía las señales del acelerómetro y de la celda de carga al PLC, así como, por medio de éste también se activa el relé del imán, el relé del motor, el pulsador de adquisición y el botón de arranque; los prensaestopas son elementos por donde pasa el cableado de los dispositivos electrónicos que se encuentran instalados en el mecanismo al PLC y a la NI; por último, la NI USB-6009 y el PLC, los cuales son los dispositivos procesadores de datos.

Figura 13. Cofre de mando.



Fuente: Autores.

### **3.4 CONSTRUCCION**

Para poder ejecutar las pruebas del sistema de adquisición de datos, se necesitó de un sistema emulador al cual se le puedan aplicar las mismas. La fase de construcción está compuesta de tres etapas: diseño preliminar, adquisición de materiales, rediseño y montaje. Cada una de estas etapas constituyó de una parte fundamental para la fabricación del sistema emulador y posibilitaron la realización satisfactoria de las pruebas que se muestran en el capítulo 8.

#### **3.4.1 Diseño preliminar**

Esta etapa del proceso se estudió las soluciones más viables al problema que se quería afrontar. Se hizo un primer diseño del mecanismo emulador y se trabajó con información secundaria. En este nivel del proceso, se consideraron dos soluciones, como la construcción de un machín petrolero a pequeña escala y un mecanismo manivela-biela-corredera, pero se optó por esta última, la cual fue la más conveniente. El diseño preliminar de este proyecto se enfocó en la realización de un primer CAD (Diseño Asistido por Computadora), en donde se realizó un primer diseño del mecanismo sin conocimiento previo de los materiales existentes en el mercado local. Esta etapa del proceso facilitó una idea general del montaje del mecanismo y de los dispositivos electrónicos.

#### **3.4.2 Adquisición de materiales**

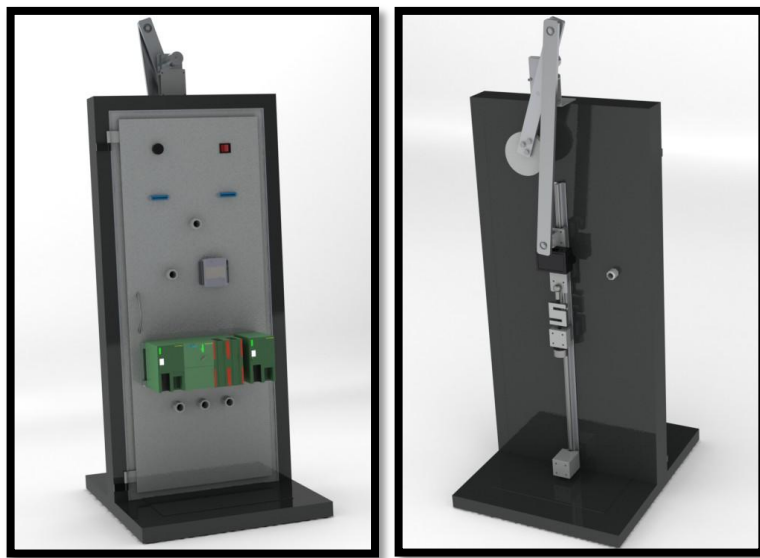
La adquisición de materiales consistió en determinar qué tipo de materiales se pueden conseguir en el mercado local y el costo unitario de los mismos. Esta fase es de vital importancia en el ciclo de proyecto, pues se debe saber con qué materiales se disponen para la realización del mismo. Con base en el diseño preliminar, no se obtuvo todos los materiales propuestos en el primer diseño, y por consiguiente, se debe plantear un nuevo diseño del sistema. Se hizo uso de 6 metros de perfilera rectangular para la estructura del sistema emulador, dos láminas aceradas de calibre 18 que hacen parte del soporte de la guía lineal y de la puerta donde se encuentran los dispositivos de procesamiento y otros

accesorios que permiten el arranque y la parada del motor, dos láminas soldadas en alto relieve en la parte inferior de la estructura y ángulos de 1" x 1" para darle soporte a las láminas. Las conexiones de los dispositivos electrónicos se realizaron mediante cable UTP (cable de par trenzado), el cual es el estándar para el vínculo entre los dispositivos electrónicos y van dentro de la estructura para proporcionar una mejor estética a la misma. En la parte superior de la estructura hay instalado un motorreductor DC de 24 voltios el cual proporciona el movimiento circular al mecanismo.

### 3.4.3 Rediseño

Una vez evaluado los materiales existentes en el mercado local, se procede a rediseñar el modelo actual y se hacen los ajustes pertinentes y necesarios para iniciar la etapa de montaje y construcción. En el rediseño, se remueven las piezas de las que no disponen en el mercado y se adaptan las piezas nuevas al diseño preliminar, y de esta manera se logra un diseño final que permita el montaje y la construcción del sistema emulador.

Figura 14. Diseño final del PEULA.



Fuente: Autores.

## **4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DINÁMICAS, CARGA Y ASOCIACIÓN DE GRÁFICAS PARA LA OBTENCIÓN DEL DINAGRAMA SUPERFICIE**

A la hora de realizar una adquisición de datos precisa, rápida y veraz, es fundamental contar con una metodología de cálculo eficiente para cada una de las señales recibidas. El desarrollo de las metodologías de adquisición de las condiciones dinámicas y de carga, son objetivos del presente proyecto.

Para obtener los dinagramas de superficie de las unidades mecánicas de levantamiento artificial, se requieren principalmente la posición de la barra pulida y la carga del sistema, las cuales deben tenerse en función del tiempo. Al asociar estas dos gráficas que se encuentran en el dominio del tiempo, se obtiene una gráfica donde se visualiza la Carga Vs Posición y de esta manera se logran los denominados dinagramas de superficie.

La posición de la barra pulida, es obtenida a partir de las mediciones de un acelerómetro, el cual debe pasar por un proceso de calibración, y desarrollar dos veces la integración de dicha señal, para obtener la posición. Adicionalmente, se debe considerar todo un procedimiento de tratamiento de señal, que permita obtener los datos con el menor error posible.

Por otra parte, las condiciones de carga del sistema son obtenidas por medio de una celda de carga, y cuya metodología de adquisición es mucho más sencilla, debido a que es una medición directa y no requiere un tratamiento de señal avanzado, como si es el caso particular de la posición.

Una vez determinadas las condiciones de carga y dinámicas del sistema, se asocia la carga vs la posición para así determinar el dinagrama de superficie del sistema.

Este prototipo de metodología y la asociación de variables de carga y posición, son el tema principal de este capítulo y serán explicadas a profundidad.

#### 4.1 METODOLOGÍA DE CÁLCULO DE CONDICIONES DINÁMICAS

A continuación se presenta un esquema que muestra de manera general la metodología implementada y posteriormente se explicará detalladamente cada una de las etapas.

Figura 15. Esquema general de metodología de cálculo de condiciones dinámicas.

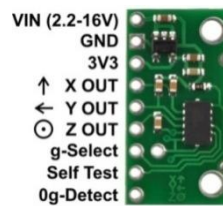


Fuente: Autores.

#### 4.1.1 Calibración del acelerómetro

Los acelerómetros electrónicos son instrumentos fabricados con el propósito de medir la aceleración lineal en uno, dos o tres dimensiones, de manera que sea posible medir la aceleración en cada eje. Las aceleraciones con estos sensores se miden utilizando la unidad “g”, que hace referencia a la aceleración gravitacional de la tierra.

Figura 16. AcelerómetroMMA7361L

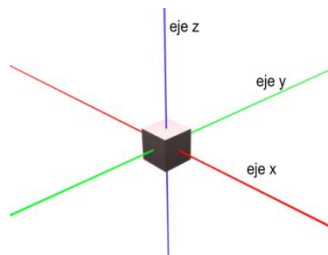


Fuente: DynamoElectronics.

El comportamiento de los acelerómetros es directamente proporcional, es decir, la señal de voltaje de salida es proporción a la aceleración medida.

$$\text{Señal Salida (V)} = \alpha * \text{Aceleracion (g's)}$$

Figura 17. Ejes cartesianos del acelerómetro

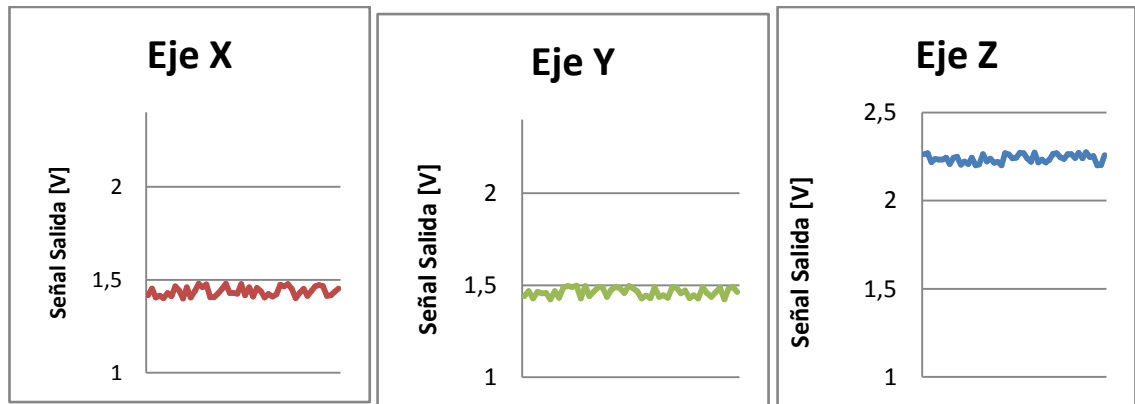


Fuente: Ingeniaste.

Al tener las mediciones de los 3 ejes cartesianos (X, Y y Z), se requieren mínimo dos valores con los cuales interpolar para obtener la línea de calibración

del sensor. Realizando mediciones pertinentes de los 3 ejes se pueden encontrar fácilmente dicha línea de calibración, pues en teoría se sabe que teniendo el acelerómetro perfectamente ubicado en un plano Z, las mediciones en cada eje son  $X = 0g$ ,  $Y = 0g$  y  $Z = 1g$ , debido a las especificaciones del sensor, se tiene que  $0g \approx 1.45 V$  y  $1g \approx 2.35 V$ .

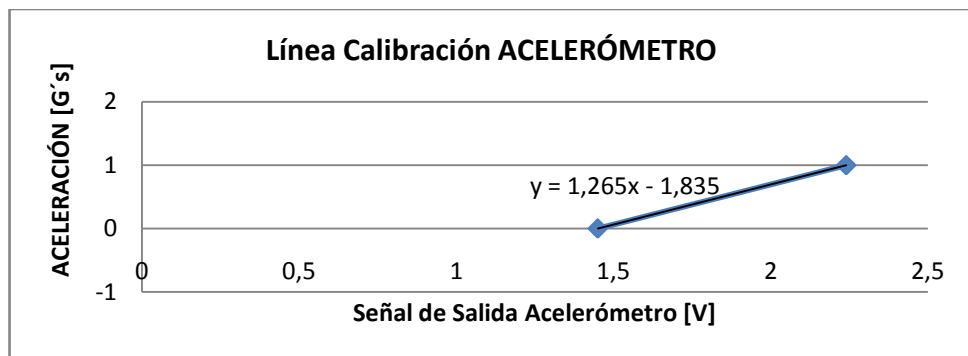
Figura 18. Señales de salida del acelerómetro.



Fuente: Autores.

Mediante el promedio de una serie de muestras para cada eje y sabiendo que representa su valor teórico, se puede determinar la ecuación del acelerómetro.

Figura 19. Línea de calibración del acelerómetro.



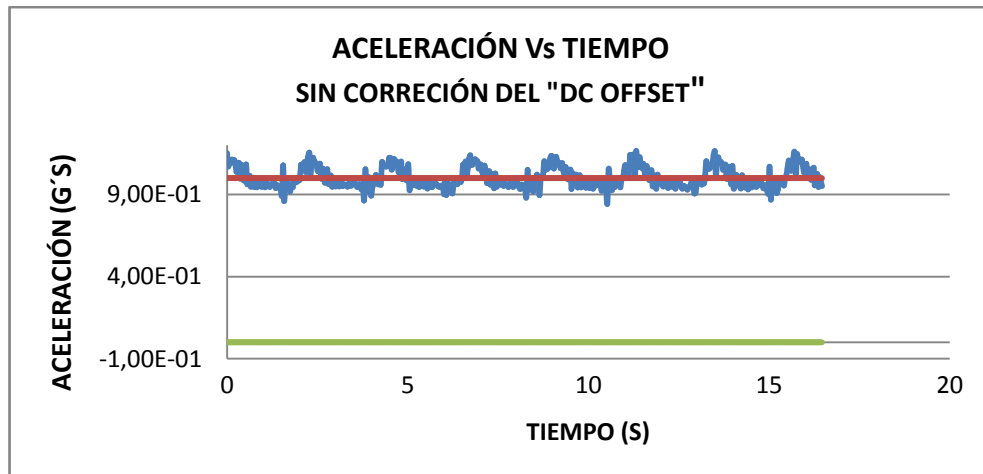
Fuente: Autores

#### 4.1.2 Corrección del “DC OFFSET”

La corrección del “DC OFFSET” consiste en restar la media aritmética de una serie de valores de aceleración calculados previamente de aproximadamente tres ciclos. Se debe realizar dicha corrección debido a que la información de salida del acelerómetro es un rango muy pequeño, comparado con el desfase producto de la medición constante de 1g, ocasionado por la fuerza gravitacional que muestra dicha medición en el tiempo.

Como se observa en la figura 20, las mediciones de aceleración se ven afectadas por la fuerza gravitacional, desplazando dicha curva aproximadamente a 1g (EJE ROJO) y que debería estar representada sobre 0g (EJE VERDE).

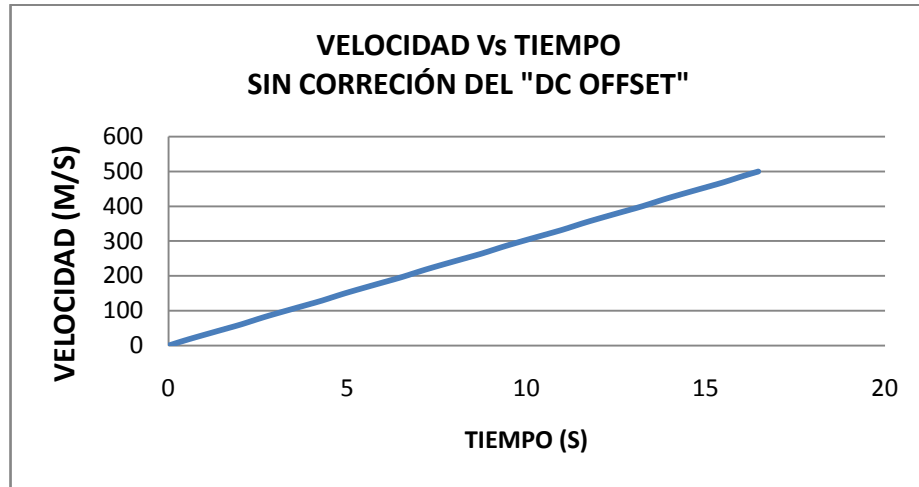
Figura 20. Gráfica Aceleración Vs Tiempo sin corrección del DC OFFSET.



Fuente: Autores.

De no corregirse el desfase, al integrar la señal se tendrá que a su vez se está integrando una constante, produciendo una gráfica tipo rampa.

Figura 21. Gráfica de Velocidad Vs Tiempo sin corrección del DC OFFSET.

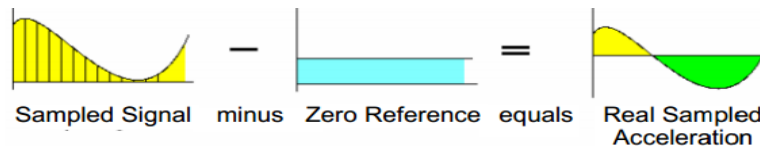


Fuente: Autores

### *PROCEDIMIENTO PARA CORRECCIÓN DE DC OFFSET*

Partiendo del concepto que se tiene que al cabo de un ciclo de la unidad mecánica de levantamiento artificial, es una función continua, se toma la medición de tres ciclos del proceso, y se determina su media aritmética. Dicha media será el valor que se restará a los datos de la señal capturados posteriormente, para obtener el muestreo real de datos sin el DC OFFSET. El valor de la media para todos los casos debe ser aproximadamente 1g.

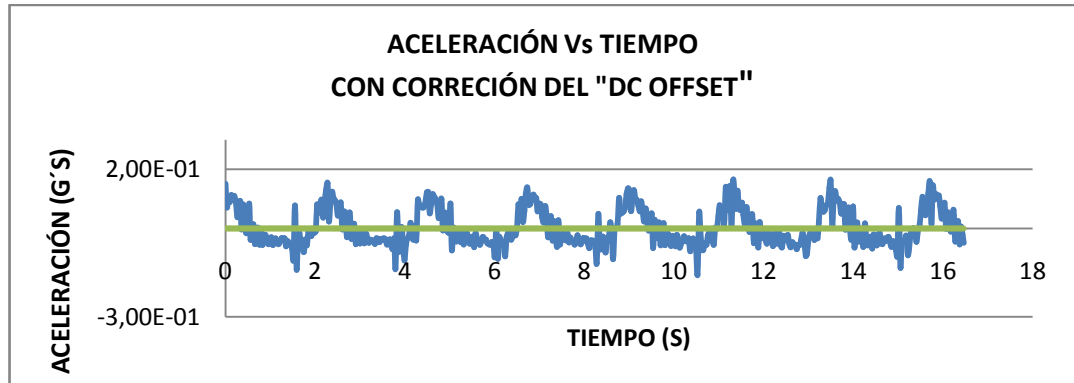
Figura 22. Señal de aceleración después de corrección del DC OFFSET.



Fuente: KurtSeifert y Oscar Camacho.

Una vez aplicada dicha corrección, la gráfica de aceleración vs tiempo es trasladada a la referencia cero del sistema, siendo ésta la verdadera señal de aceleración para el sistema.

Figura 23. Gráfica Aceleración Vs Tiempo con corrección del DC OFFSET.



Fuente: Autores.

#### 4.1.3 Adquisición de datos promedio a 30 Hz

La señal analógica que se lee, tiene una frecuencia de adquisición mucho mayor a los 30 [Hz] deseados. Para aumentar la precisión en la medida, se promedia los datos adquiridos en el periodo de tiempo correspondiente a la frecuencia de 30 [Hz]. De esta manera, se utilizan todos los datos adquiridos, ya que de no usarlos, se estaría usando un dato cada 30 Hz, despreciando todos los demás datos adquiridos.

Se suman todos los datos para un periodo de tiempo y después se divide en el número de datos sumados. De esta forma se determina el promedio de los datos de aceleración para esa fracción de tiempo.

#### 4.1.4 Adquisición de aceleración

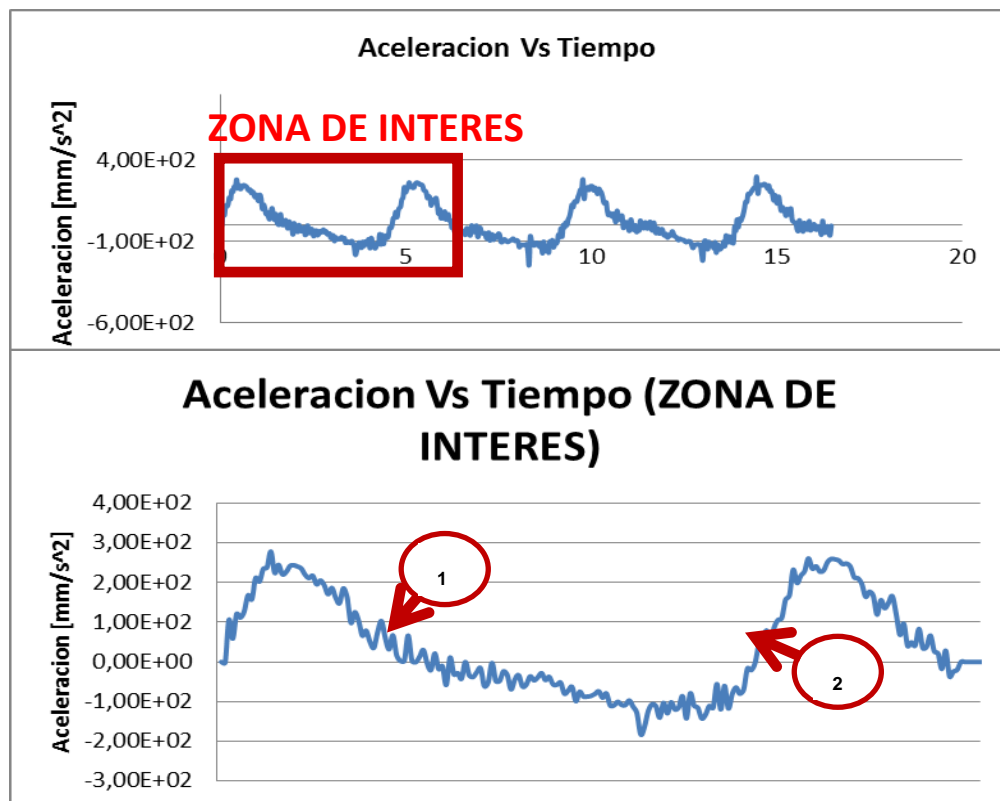
Una vez calibrado el sensor y corregido su desfase, se procede a adquirir la señal de aceleración a una rata cercana a los 30 [Hz]. Esta velocidad de

adquisición de datos está basada en los estándares marcados por los diversos sistemas comerciales de la actualidad.

Se adquieren los datos de la señal de aceleración correspondiente al eje cartesiano de interés. En el presente proyecto se almacenaran datos para 40 segundos de medición, los cuales representan 1200 datos capturados.

Adicionalmente, se deben establecer una serie de marcas correspondientes al inicio y fin de cada ciclo de la unidad mecánica de levantamiento artificial, pues estas marcas son fundamentales para tener un ajuste preciso en las mediciones, así como para diferenciar los diversos ciclos del sistema.

Figura 24. Zonas de interés para determinar inicio de ciclos.



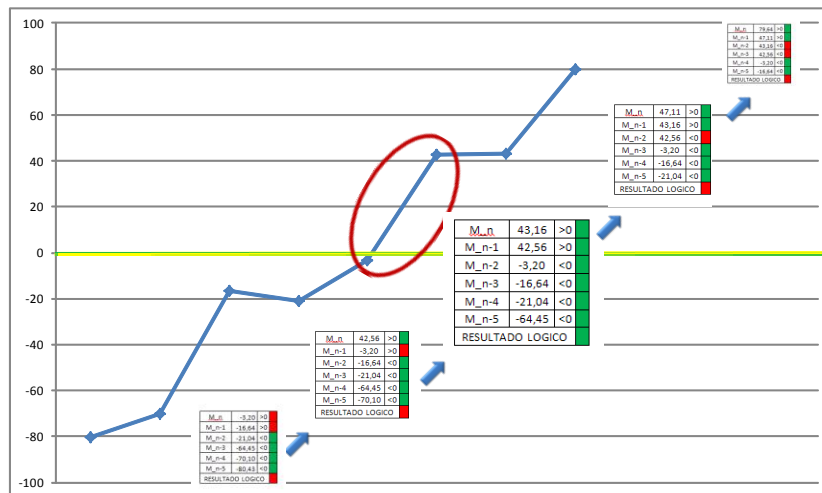
Fuente: Autores.

Para determinar dichas marcas, es fundamental entender que existen dos cambios en el sentido de la aceleración por ciclo, uno en cada extremo del recorrido de la barra pulida. Dichos puntos se pueden observar en cualquier gráfica de aceleración contra tiempo, cuando muestran un cambio de Aceleración positiva (+) hacia Aceleración negativa (-) o al contrario.

Se requiere reconocer uno de los dos puntos, por lo cual, debido a que el segundo punto muestra un cambio más suave, se toma este como punto de interés a identificar. Este punto hace referencia al punto muerto inferior.

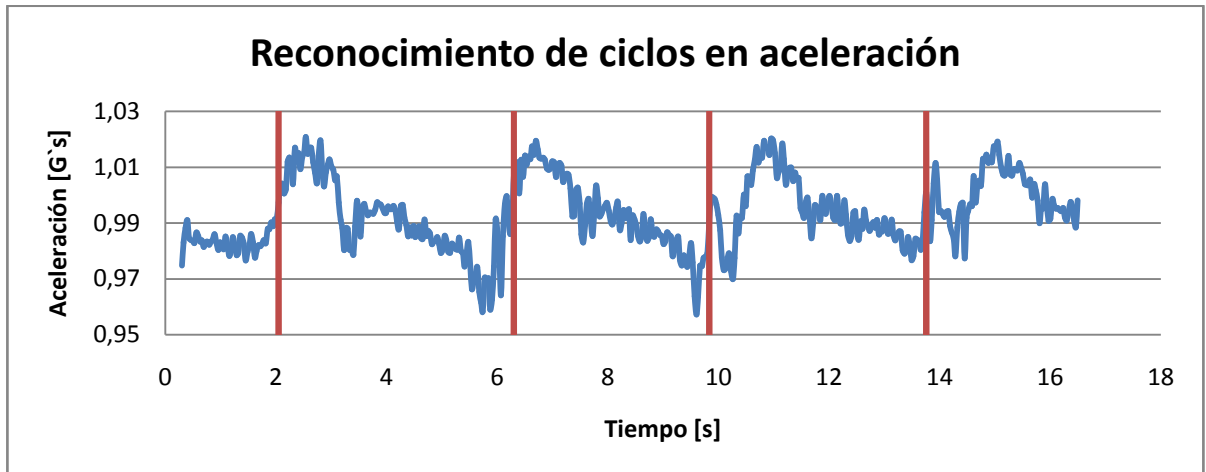
La identificación de este punto se hace mediante una serie de comparaciones frente al eje cero de referencia. Se almacenan temporalmente seis valores, los cuales los dos primeros valores (actual y anterior) se evalúan si son mayores a cero ( $>0$ ), mientras los demás, son evaluados si son menores que cero ( $<0$ ). Si se cumplen estas condiciones lógicas, se tiene que entre los puntos (n-1) y (n-2) hubo un cambio de signo en la señal, con lo cual la marca se grabara en la posición del primer dato positivo después de haber cambiado de signo.

Figura 25. Comparaciones lógicas para obtener marca de cambio de signo de aceleración.



Una vez determinada dicha posición se procede a marcar y almacenar estos datos en marcas, donde se puede distinguir el comienzo y final de cada ciclo.

Figura 26. Reconocimiento de ciclo en aceleración.



Fuente: Autores.

#### 4.1.5 Ajuste de aceleración

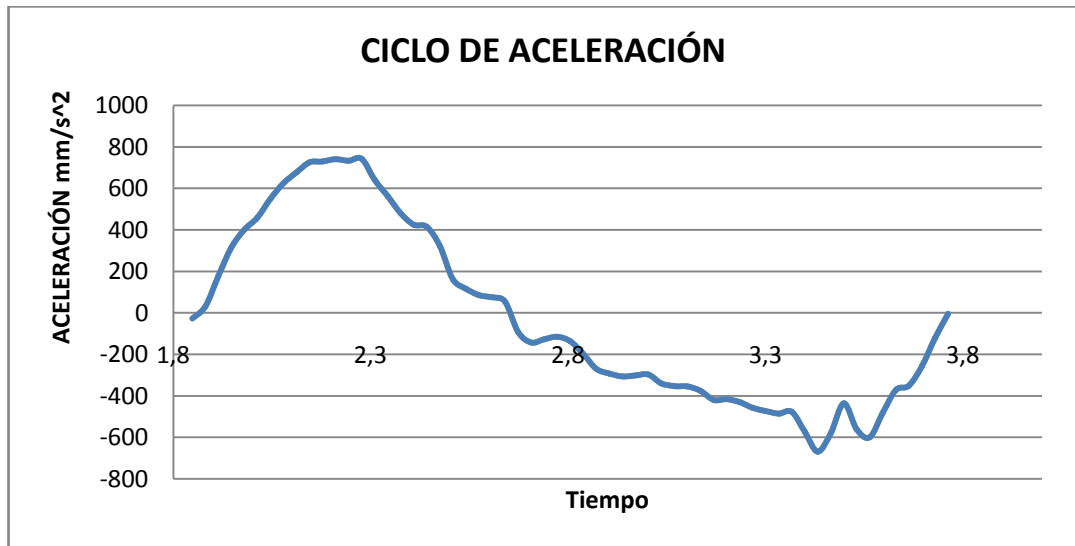
El ajuste realizado en esta etapa, consiste en forzar la señal para que el promedio de datos de aceleración a lo largo de un ciclo sea igual a cero. Esto se puede asumir, debido a que teóricamente, si se consideraran infinitos puntos de datos a lo largo del ciclo, la curva debería cerrar perfectamente, pero esto no es posible y se puede generar un error que irá distorsionando los datos a lo largo del proceso de la doble integración para obtener la posición.

#### ***PROCEDIMIENTO DE AJUSTE DE ACELERACION***

Debido a que ya se ha diferenciado las diversas marcas que muestran el cambio de aceleración positiva a negativa, se realiza un promedio de los datos contenidos durante este ciclo, y este valor será restado a todos y cada uno de

los valores que se almacenan durante el ciclo estudiado, permitiendo que la suma de aceleración durante este periodo sea cero.

Figura 27. Ciclo de aceleración.



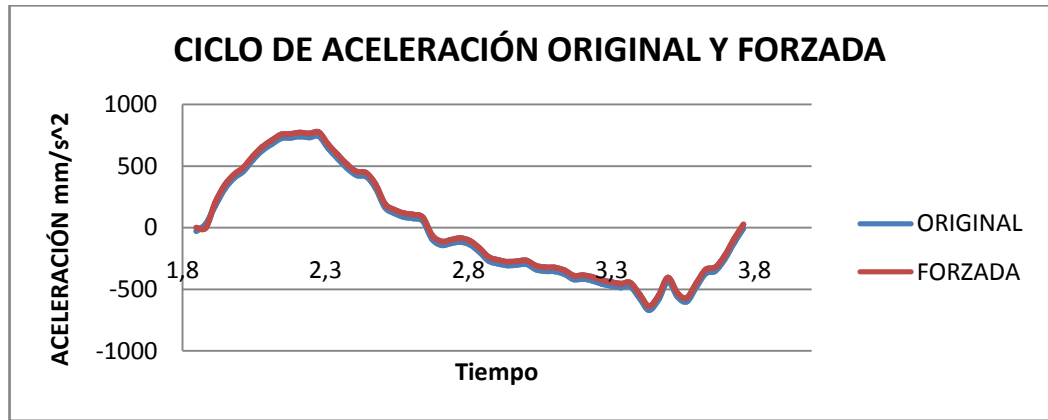
Fuente: Autores

La grafica representa un ciclo de los datos de aceleración del sistema. Se calcula el promedio para el ciclo dado y utilizando como ejemplo el ciclo mostrado en la figura anterior, el promedio de éste es de -27,9793 [mm/s<sup>2</sup>].

Este valor debe ser restado a todos los valores presentes en el ciclo, desplazando la grafica de aceleración en este valor, posibilitando la obtención una gráfica cuyo promedio sea cero, representando perfectamente el modelo teórico que se evidencia en un ciclo de la unidad mecánica de levantamiento artificial.

El promedio para la nueva curva forzada es de 0,05[mm/s<sup>2</sup>], siendo este un valor ampliamente permisible y proporciona una mejor representación del proceso real comparado con la curva original.

Figura 28. Ciclo de aceleración original y forzada.



Fuente: Autores.

#### 4.1.6 Integrar aceleración a velocidad

En esta etapa se utiliza un método de aproximación para el cálculo de la integral y consiste en el cálculo del área bajo la curva, como se presenta a continuación.

#### **MÉTODO DE INTEGRACIÓN**

La mejor manera para entender el método de aproximación usado para calcular la integral es revisando este concepto principalmente. La definición de aceleración, teóricamente hablando, es el cambio de velocidad de un sistema en un periodo de tiempo. De la misma forma, la velocidad es el cambio de posición en un periodo de tiempo por lo cual tenemos:

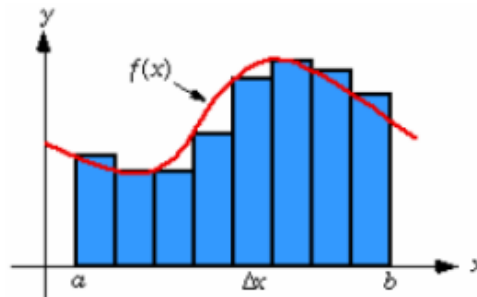
$$A = \frac{dV}{dt}$$

$$V = \frac{dS}{dt}$$

De esta manera, integrando la aceleración se obtiene la velocidad e integrando la velocidad se determina la posición. Según el concepto de integración de Riemann, se basa en un límite que aproxima el área de una región curvilínea a

base de partirla en pequeños trozos verticales y sumarlos. Por lo tanto, se puede entender la integral como el área bajo la curva.

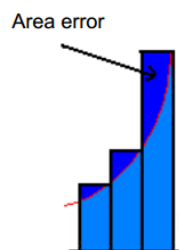
Figura 29. Ejemplo de aproximación de integración.



Fuente: KurtSeifert y Oscar Camacho.

Una primera aproximación para determinar el área bajo la curva es calculando el área por medio de la suma de rectángulos dados por un  $\Delta X$  y el valor de  $Y$ . Pero dicha aproximación, aunque su error en ocasiones puede ser despreciable, no se emplea y se considera otra aproximación para disminuir dicho error y obtener una mejor precisión en los datos integrados.

Figura 30. Error generado en primer método de aproximación.

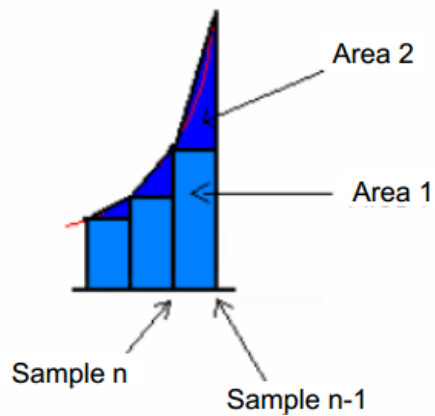


Fuente: KurtSeifert y Oscar Camacho.

El método de aproximación usado, utiliza una aproximación de la suma del rectángulo compuesto por la medición anterior y el triángulo formado por la medición anterior y la medición actual. De esta forma, el error producido en el

cálculo del área bajo la curva es mucho menor que el primer método mencionado.

Figura 31. Método de aproximación aplicado al proyecto.



Fuente: KurtSeifert y Oscar Camacho

La expresión utilizada para dicho método de aproximación es la siguiente:

$$A_n = \left( M_{n-1} + \frac{M_n - M_{n-1}}{2} \right) * T$$

Donde:

A:= Área

M:= Muestra

N:= Punto Actual

T:= Delta de tiempo

Una vez calculado el área, se tiene que:

$$Vel_n = Vel_{n-1} + Acel_n * Tiempo$$

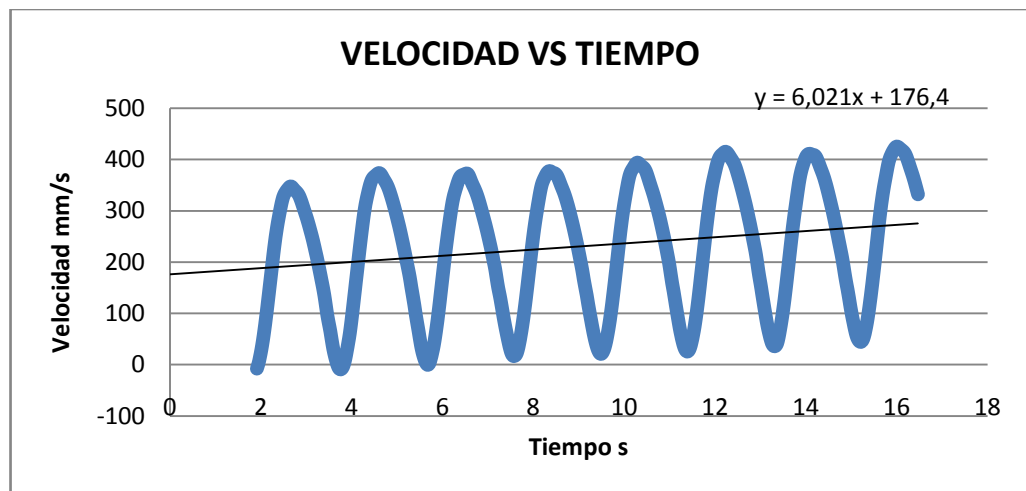
Donde  $Acel_n * Tiempo$  es el área calculada anteriormente, con lo cual:

$$Vel_n = Vel_{n-1} + A_n$$

#### 4.1.7 Ajuste de Velocidad

Una vez calculada la velocidad se obtiene una grafica de velocidad contra tiempo, pero que al no estar sujeta bajo condiciones iniciales, esta se encuentra desplazada en el eje Y. Además, puede presentar una pequeña pendiente de incremento, la cual se debe a la constante que se genera al integrar la señal en tiempo real.

Figura 32. Velocidad sin ningún proceso de ajuste.



Fuente: Autores.

Para reducir esta rampa de incremento se debe calcular una regresión lineal, según el método de los mínimos cuadrados, con los datos almacenados de velocidad.

$$m = \frac{\sum Xi * Yi - n * \bar{X} * \bar{Y}}{\sum Xi^2 - \bar{X}^2}$$

$$b = \bar{Y} - m * \bar{X}$$

Dicha regresión será aplicada a los valores de velocidad que se encuentran almacenados, con lo cual se hará:

$$Y = m * X + b$$

$$VEL_{Corregida} = VEL_{Original} - Y$$

Con esta corrección, se desplaza la velocidad al eje horizontal cero y adicionalmente se reducirá el error de la pendiente.

#### **4.1.8 Nuevo reconocimiento de marcas de comienzo de ciclo**

Adicionalmente a este cálculo, se deben reconocer nuevamente las marcas de comienzo y final de cada ciclo de la unidad de levantamiento artificial, pero esta vez se deben hacer desde los datos de aceleración, pues este es el verdadero comienzo del ciclo del sistema.

Para ellos se utiliza la misma metodología de reconocimiento por medio de comparaciones lógicas y se mira el cruce del eje horizontal cero, cuando esto suceda, se debe almacenar dicha marca.

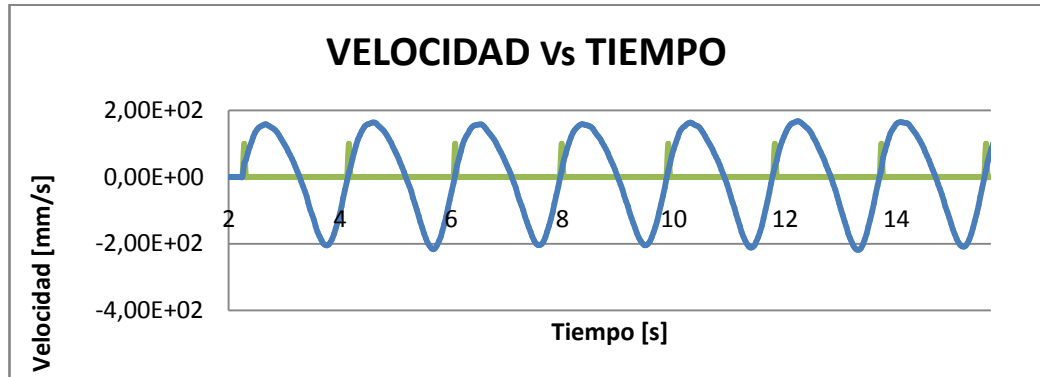
#### **4.1.9 Forzar el promedio del ciclo de velocidad a cero**

De la misma manera que se tomó un ciclo de aceleración y se calculó el promedio y luego se resto, para forzar a que la curva cierre. Este procedimiento se hace igualmente para la velocidad, permitiendo que la curva cierre y refleje el comportamiento independiente de cada ciclo de la unidad de bombeo.

#### **4.1.10 Velocidad final**

Una vez realizado todos estos ajustes a los datos de aceleración y una vez corregidos y de nuevo almacenados.

Figura 33. Velocidad después de proceso de ajuste completo.

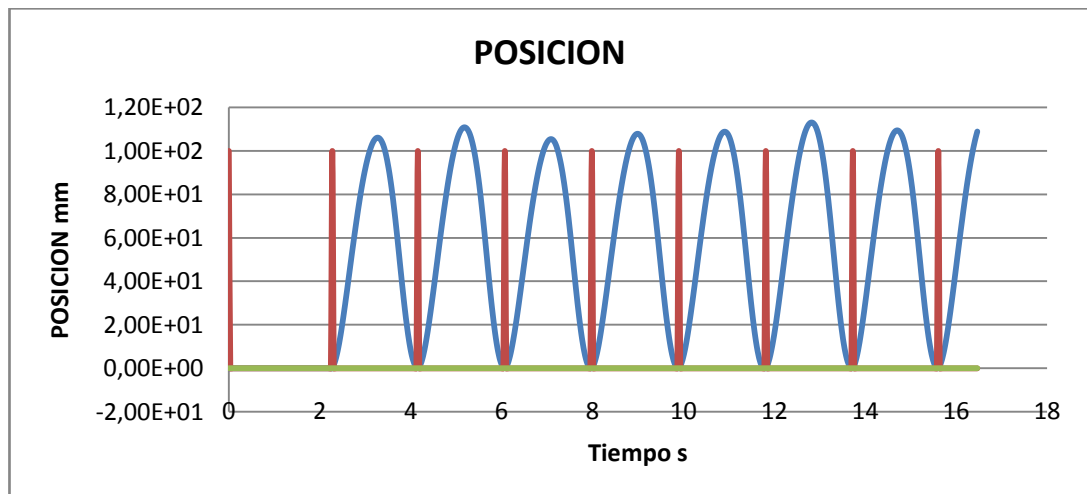


Fuente: Autores.

#### 4.1.11 Integrar la velocidad a posición

Se utiliza el mismo método usado para resolver la primera integral, sola que esta vez se integra la velocidad y de esta manera se obtiene la posición del sistema.

Figura 34. Posición contra tiempo.



Fuente: Autores.

## **4.2 DETERMINACIÓN DE CONDICIONES DE CARGA**

En esta sección se lleva a cabo la explicación de la metodología que se implemento para capturar la carga de la celda de carga. Cabe resaltar que para la determinación de las condiciones de carga no se requiere mayor cálculo, ya que esta es una medida directa del sensor de carga.

### **4.2.1 Calibración de la celda de carga**

La calibración del sensor es la parte más importante para la adquisición de las condiciones de carga, ya que si este queda mal calibrado, todas las mediciones que se hagan, no corresponderán a su valor físico por lo cual es de gran importancia para esta variable.

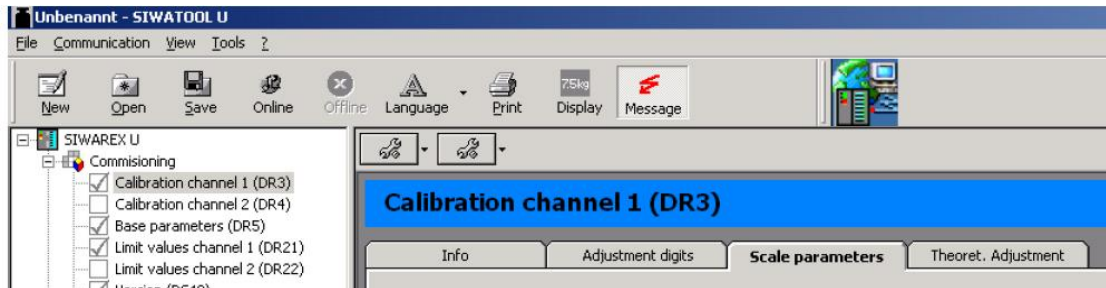
El sensor se puede calibrar de dos maneras: La primera es mediante sus valores teóricos dados por el fabricante en la hoja de especificaciones y la otra es mediante el cálculo de la recta experimentalmente. En el presente proyecto se trabajaron las dos formas de calibración, para el uso del PLC se trabajó la calibración teórica y en el uso de las tarjetas de adquisición se utilizó la calibración experimental por medio de pesos calibrados.

#### **4.2.1.1 *Calibración teórica***

La calibración teórica de la celda de carga se efectúa por medio de los valores característicos de esta, disponible en la hoja de especificaciones del fabricante y la utilización del software especializado de SIEMENS, denominado SIWATOOL. Esta calibración fue la implementada para la utilización del sistema con Autómata programable.

La caracterización teórica por medio del software SIWATOOL consta de cuatro instancias:

Figura 35. Software SIWATOOL U de Siemens.



Fuente: Autores.

- **Parámetros de Escala:** en esta instancia se requiere el valor característico de la celda de carga particular, para el caso de la celda implementada es de 2 mV/V, se calibra las unidades de la medición que puede ser gramos, libras, kilogramos y demás y se menciona el número de intervalos que tiene la celda de carga utilizada.
- **Ajuste teórico:** se pide introducir el número de celdas a usar y de nuevo los valores característicos que se tienen en la hoja de especificaciones de la celda y de su cero particular, adicionalmente se pide el peso nominal de la celda. Posteriormente se calcula los valores de la recta de calibración de la celda de carga en cuestión y se envían al autómata.
- **Ajuste del cero:** se trabaja con la celda sin ninguna carga y se calibra el cero para la celda específica, nuevamente se envían los datos al PLC.
- **Validación experimental:** se comprueba que la calibración teórica corresponde a las variables físicas reales mediante una comprobación experimental.

#### **4.2.1.2                    *Calibración experimental***

La señal de voltaje de salida del sensor es proporcional a la carga que se le efectúa, por lo cual la calibración experimental de este sensor corresponde a hacer una toma de datos de una serie de pesos calibrados y observar su salida correspondiente en voltaje.

Posteriormente se hace una regresión lineal de dichos datos y se obtiene la recta de calibración del sensor específico.

#### **4.2.2   *Adquisición de datos***

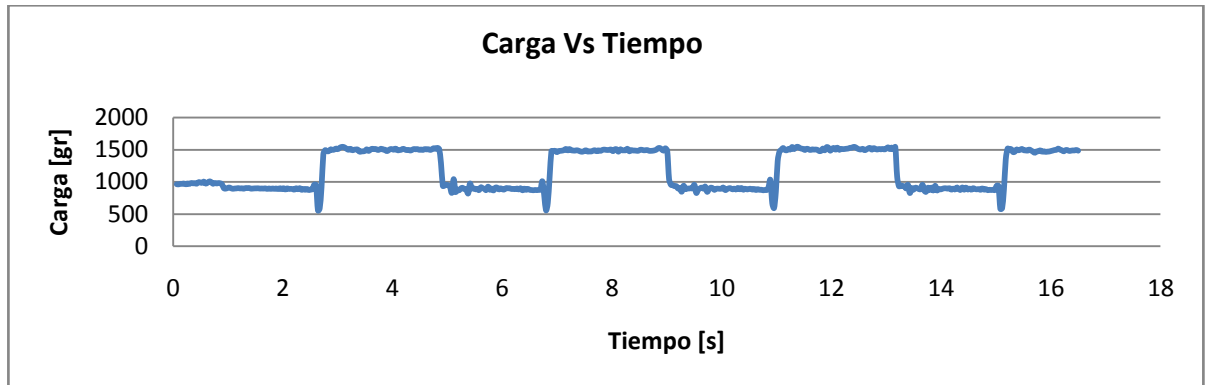
Una vez calibrado el sensor, se procede a adquirir la señal de carga a una rata cercana a los 30 Hz. Esta velocidad de captura de datos está basado en los estándares marcados por los diversos sistemas comerciales de la actualidad y a su vez es congruente los datos de aceleración almacenados a la misma frecuencia.

Se capturan los datos de la señal de carga, correspondiente a la carga del sistema emulador.

#### **4.2.3   *Almacenamiento de datos***

Una vez adquirido la señal de carga, se almacenan los datos de carga vs tiempo, a la misma frecuencia que los datos de aceleración, velocidad y posición.

Figura 36. Gráfica de Carga Vs Tiempo.



Fuente: Autores.

### **4.3 ASOCIACIÓN DE GRÁFICAS PARA LA OBTENCIÓN DE DINAGRAMAS DE SUPERFICIE**

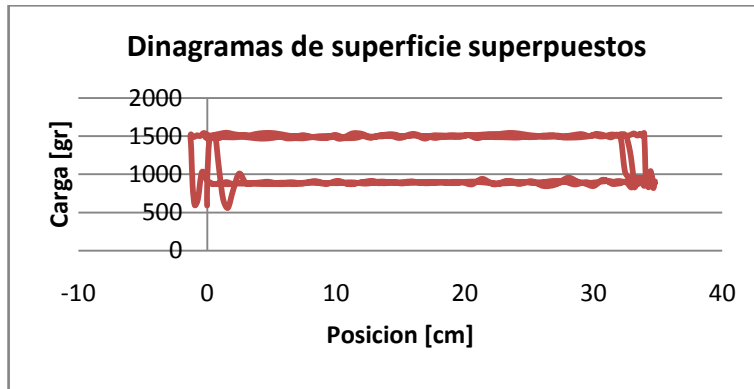
En esta sección se muestra la asociación de los datos de carga contra posición, los cuales se conocen como dinagramas de superficie. Estas graficas son uno de los objetivos principales del presente proyecto, ya que a partir de ellas se puede proceder a realizar un estudio más a fondo para obtener los dinagramas de fondo de pozo, estudio que no está dentro del proyecto, y así diagnosticar las condiciones de funcionamiento de la unidad de levantamiento artificial.

#### **DESARROLLO DE LA ASOCIACIÓN DE GRÁFICAS**

La asociación de las graficas consiste en unificar en una sola grafica la carga y la posición. Principalmente se tienen dos graficas, Carga en Función del tiempo y posición en función del tiempo. Dado que cada una de estas tiene un eje en común el cual es el tiempo.

Se relacionan ambas graficas en función del tiempo y de esta forma se elimina el eje del tiempo, de esta manera se obtiene la grafica de carga vs posición, la cual estará compuesto por todos los ciclos superpuestos.

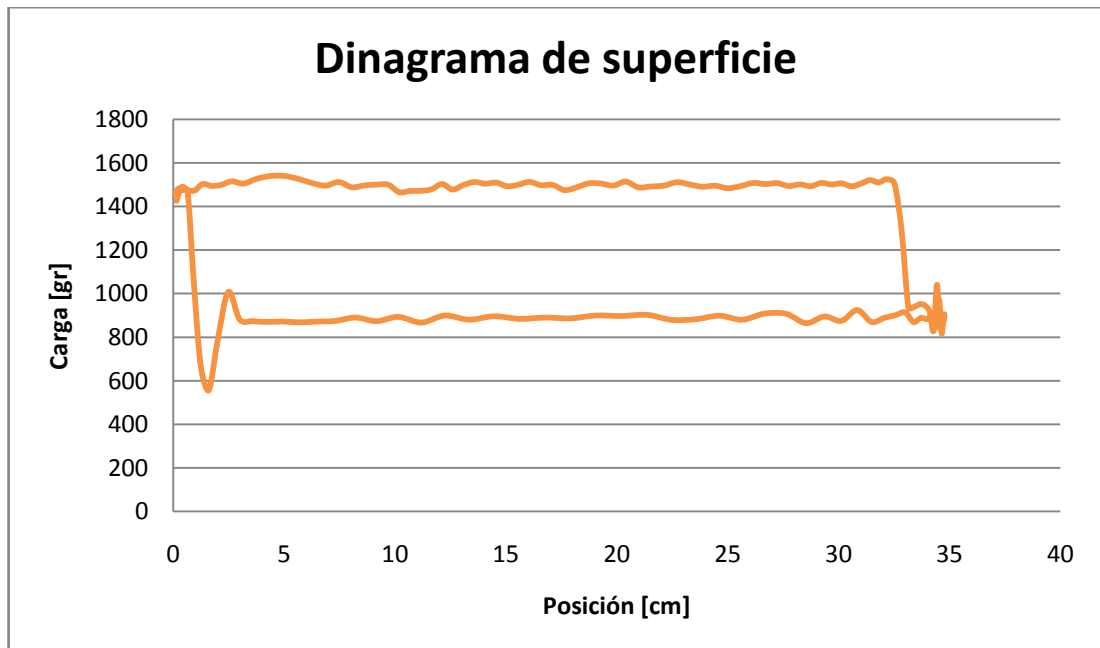
Figura 37. Grafica de Carga Vs Posición superpuestas



Fuente: Autores.

Posteriormente se procede a separar cada ciclo del sistema en graficas individuales para cada uno de ellos.

Figura 38. Gráfica de carga vs posición de un ciclo del sistema.



Fuente: Autores.

## 5 METODOLOGÍA DE REDUCCIÓN DE PUNTOS

En este capítulo se explica la metodología que se desarrolló e implementó para disminuir una función a sus puntos significativos y que de igual forma represente fielmente la función original.

Figura 39. Curva original y curva con únicamente puntos significativos.



Fuente: Neurofuzzy Interpolation: II – Reducing complexity of Description.

Con esta metodología se busca dar una alternativa de compresión para la información adquirida. Se debe almacenar la menor cantidad de datos que representen de una forma veraz el comportamiento de una serie de datos. Existen varios métodos para hacer dicha función, y este tema presenta gran interés en investigaciones por parte de la academia.

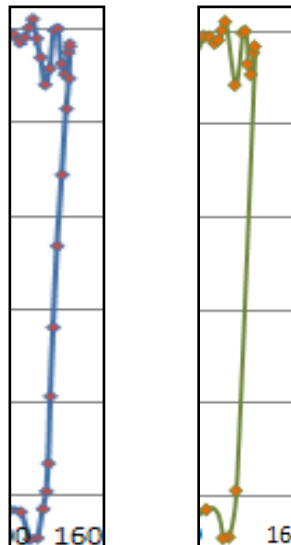
El almacenamiento de información es una etapa fundamental a la hora de trabajar con procesamiento de esta. La restricción de memoria está presente en muchas aplicaciones y se tiene en cuenta que se busca un monitoreo continuo, se hablan de cantidades importantes de memoria requerida. Para ello, depurar los datos obtenidos de tal forma que representen de una forma adecuada los datos originales es fundamental para el desarrollo de proyectos siguientes.

La comunidad científica tiene un gran interés en el tema, con lo cual existen especialización, maestrías, doctorados enfocados en el tema, por lo cual el alcance de la presente metodología es mostrar una solución sencilla al problema descrito.

### 5.1 DEFINICIÓN

Para poder reducir una función a únicamente significativos, se reconocen ciertos patrones que se representa por medio de muchos puntos, pero que si se tiene en cuenta puede ser representado únicamente por una fracción de ellos. El más evidente de estos es la línea recta. Se puede observar que para este caso particular se muestra una línea trazada por nueve datos, pero que se puede representar únicamente por dos puntos, ahorrando una cantidad considerable en la memoria de almacenamiento sin perder fiabilidad de la curva.

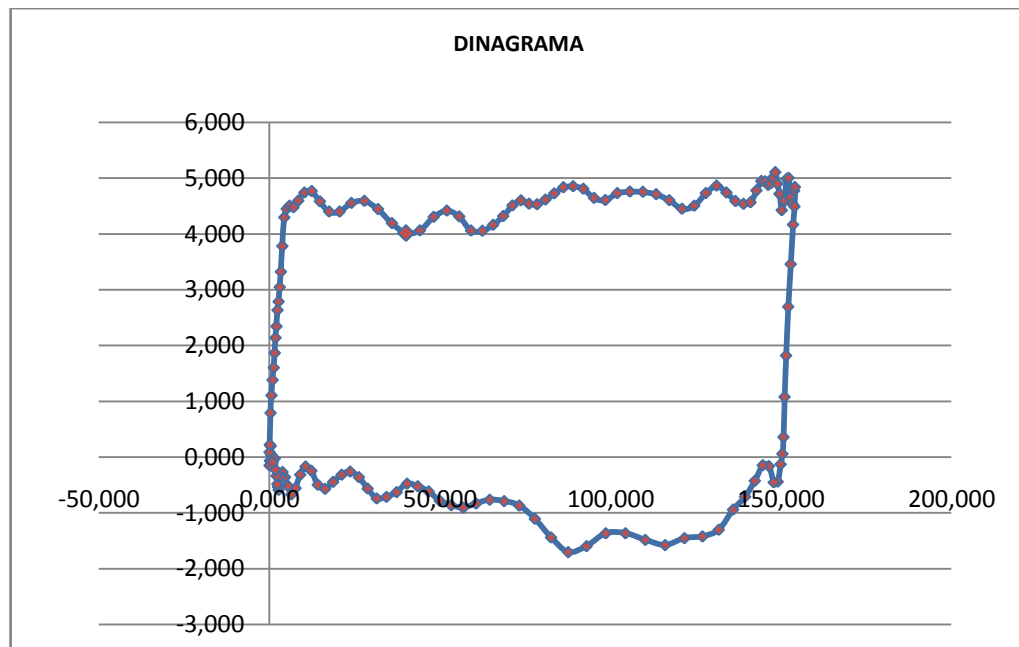
Figura 40. Ejemplo de reducción de puntos.



Fuente: Autores.

Las líneas no son los únicos patrones en las diferentes funciones, por lo cual es importante reconocer que patrones existen en la representación de curvas. Para el caso de estudio de los dinagramas, estas son unas curvas cerradas que muestran carga contra posición.

Figura 41. Dinagrama sin compresión.



Fuente: Autores.

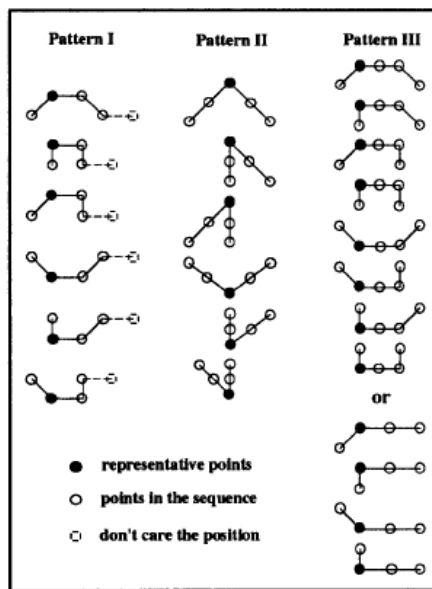
Los patrones más importantes son tratados en una publicación<sup>1</sup>, la cual trata de una metodología de reducción de puntos según sus patrones y a su vez propone una reconstrucción de la curva original, a partir de la curva comprimida, lo cual no

- 
- <sup>1</sup> **REGATTIERI, M.** Neurofuzzy Interpolation: II – Reducing complexity of Description. En: neural Networks, 1993. Vol. 3, p. 1835-1840.

es parte de los objetivos del presente proyecto, el cual esta enfocado únicamente en la reducción de puntos mediante comparaciones lógicas.

Con los patrones que son presentados por Regattieri se desarrollo un algoritmo basado en comparación lógicas de una serie de puntos con lo cual se determina si cumplen un patrón dado y con ello se procede a almacenar dicho punto.

Figura 42. Patrones que reconocen el punto significativo.

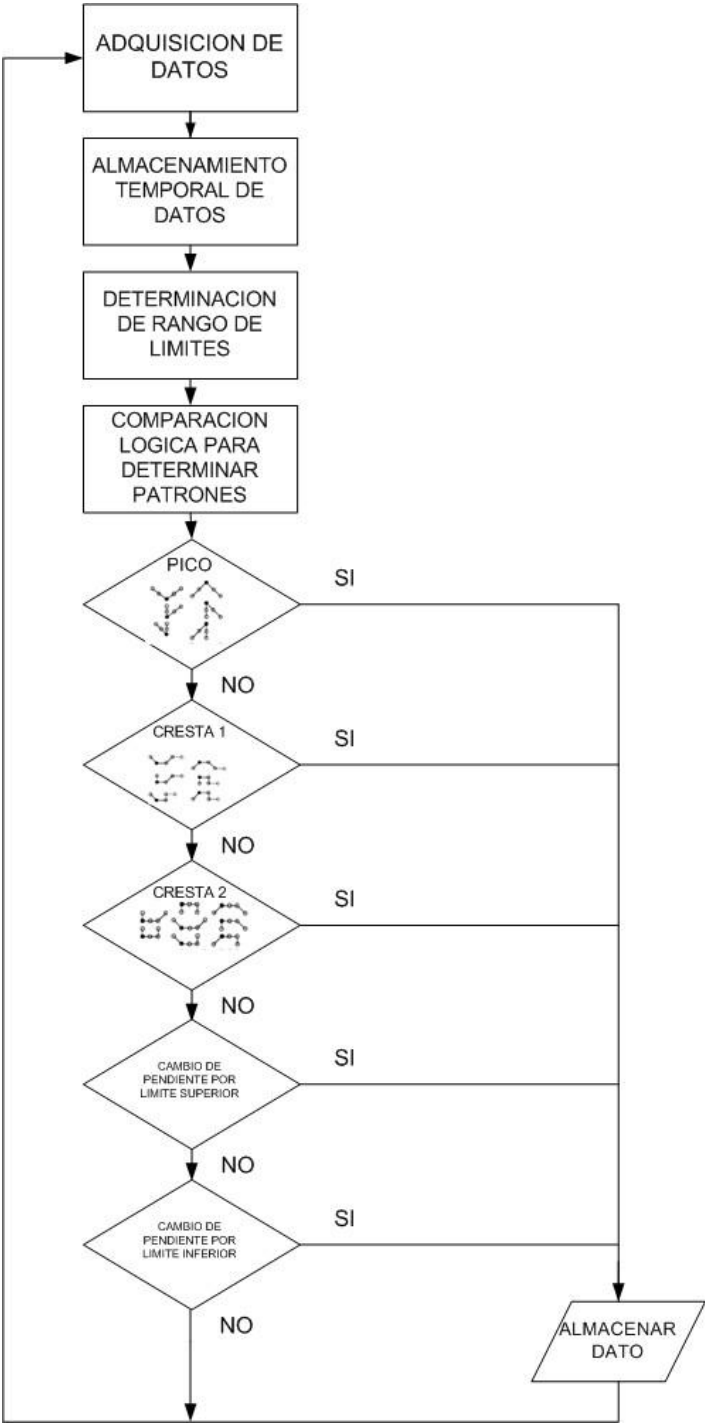


Fuente: Neurofuzzy Interpolation: II – Reducing complexity of Description.

## 5.2 METODOLOGÍA IMPLEMENTADA

La metodología desarrollada para reducir la función a puntos significativos cuenta con la siguiente estructura de programación. Parte de la captura de datos y procede a almacenar parcialmente seis de estos datos permanentemente. Luego se determinan los rangos y se procede a hacer una comparación lógica de una serie de casos que permite determinar si la secuencia de puntos representa un caso significativo y se almacena dicho punto.

Figura 43. Secuencia lógica de la metodología desarrollada.



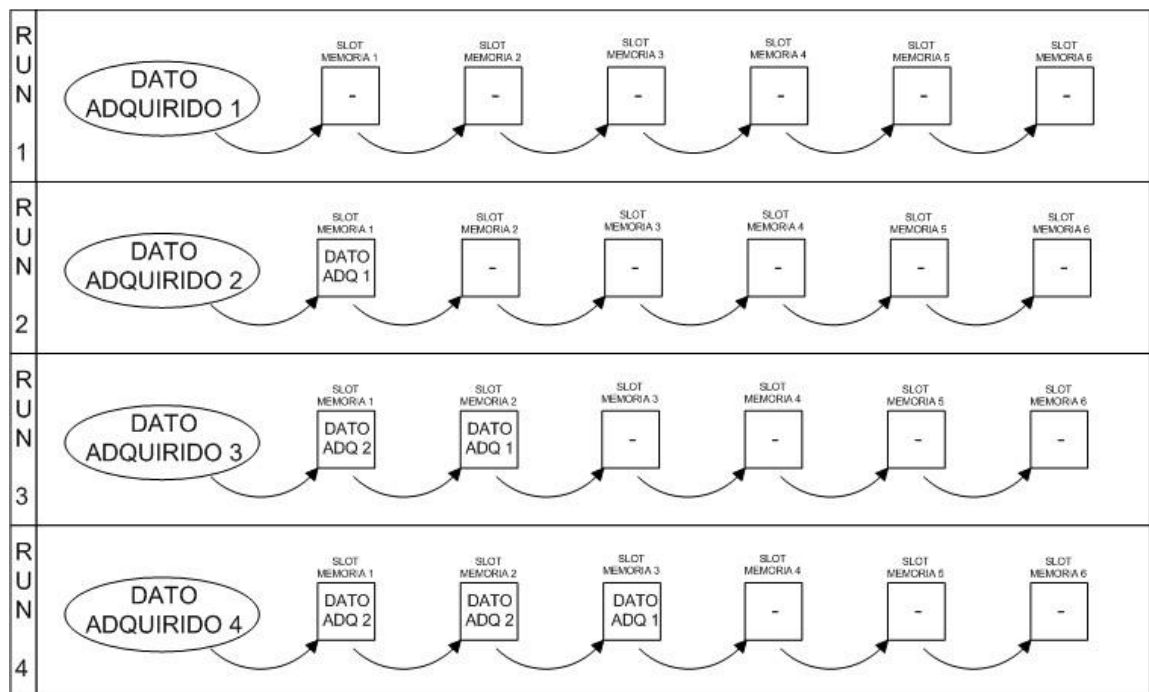
Fuente: Autores.

### 5.2.1 Almacenamiento temporal de datos

Para realizar la comparación de puntos, se requiere almacenar de manera temporal seis puntos los cuales son los que se compararan entre ellos para obtener el resultado de las operaciones lógicas.

Se almacenan permanentemente seis puntos, de forma que el dato adquirido se almacena en un slot de memoria. A la siguiente corrida, el dato previamente adquirido se moverá un slot y así sucesivamente hasta que el nuevo dato adquirido se guarda en el primer slot de memoria. Esta metodología se entiende mejor gráficamente según la figura presentada a continuación.

Figura 44. Almacenamiento temporal de datos.



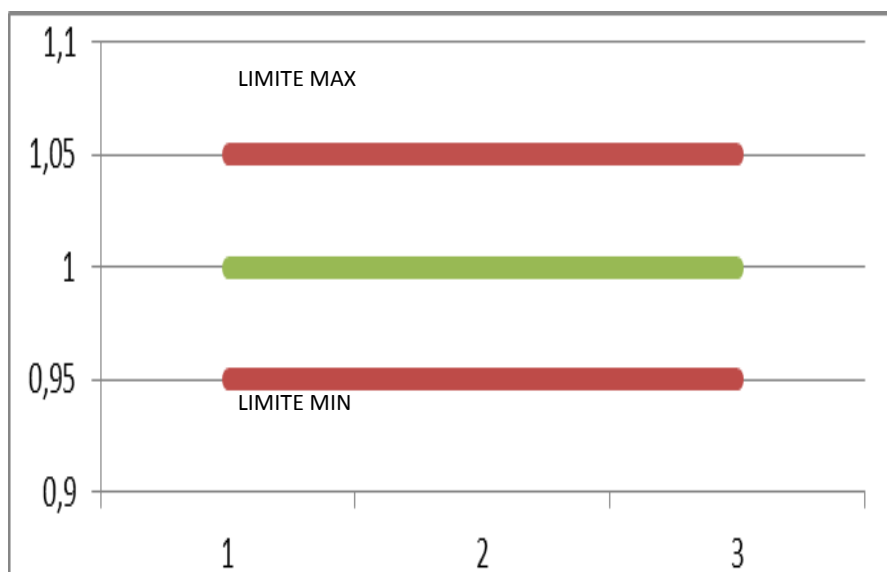
Fuente: Autores.

### 5.2.2 Determinación de rango de límites

En esta etapa se determinan los límites para los cuales se considera que el dato siguiente es aproximadamente igual al dato presente. Se acepta un 5% de variabilidad en el dato para considerarlo como similar.

Esto quiere decir que si se tiene por ejemplo dato con valor numérico de 1, el límite máximo será 1,05 y el límite mínimo será 0,95. Si el valor inmediatamente siguiente se encuentra en este rango, se dice que el valor es aproximadamente el mismo.

Figura 45. Límites de valores.



Fuente: Autores.

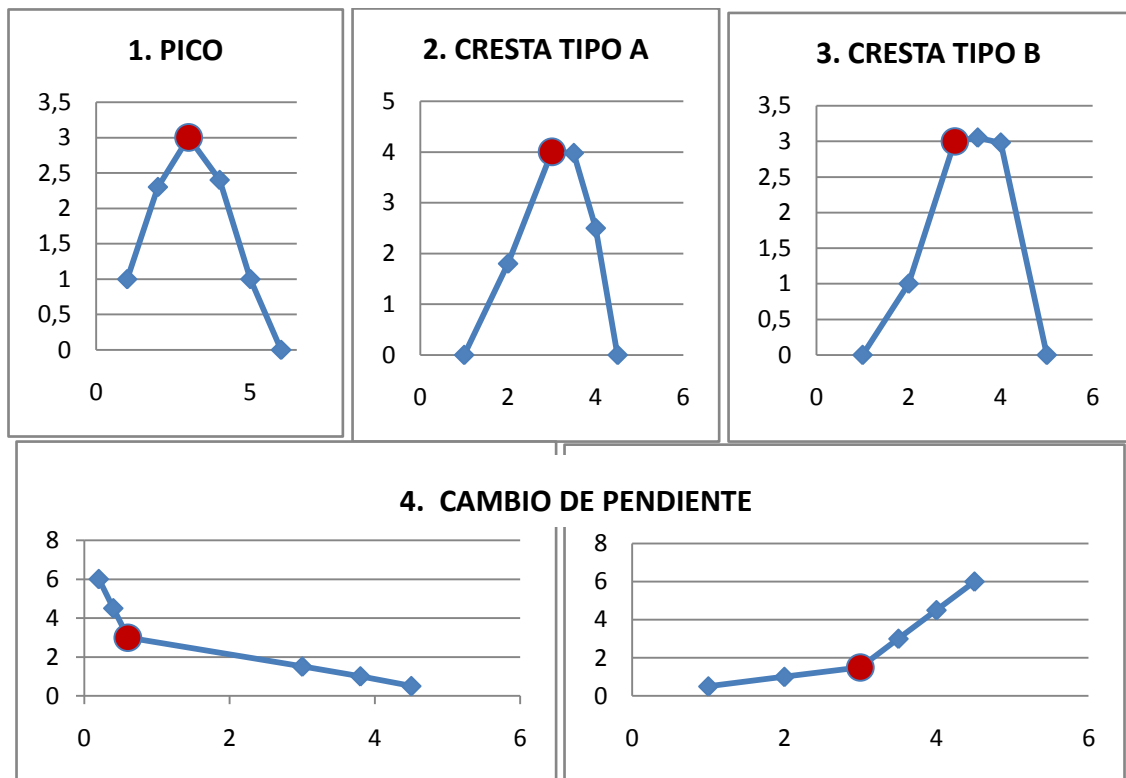
### 5.2.3 Comparaciones lógicas para determinación de patrones

La metodología implementada se basó en la determinación de cinco patrones principales que permiten la selección de los puntos significativos de la función y

que permiten recrear de una forma veraz la función original. Los cinco patrones que se implementaron son los siguientes:

- *Pico*: Cuando se tiene un punto de inflexión en la función.
- *Cresta Tipo A*: Hace referencia a una cresta pero no tan pronunciada.
- *Cresta Tipo B*: Cuando se encuentra una cresta un poco más pronunciada que el patrón anterior.
- *Cambio de pendiente*: Cuando hay un cambio significativo de la pendiente.

Figura 46. Ejemplo de patrones a reconocer.



Fuente: Autores.

En el Anexo C se muestran unos diagramas que muestran de una forma más esquemática, la lógica empleada para determinar el patrón específico.

### **5.2.3.1 Pico**

Este patrón corresponde a un máximo o mínimo local. Para ello reconocer este patrón consiste en comparar si los puntos anteriores y posteriores son menores o mayores según sea el caso. De esta simple comparación se obtiene que el punto tres (3) viene siendo un punto significativo.

### **5.2.3.2 Cresta Tipo A**

Consiste en un dato que viene acompañado por otro dato de aproximadamente el mismo valor, y estos a su vez son mayores y/o menores que los datos anteriores y posteriores a estos. Corresponde al patrón dos mostrado en la figura anterior.

### **5.2.3.3 Cresta Tipo B**

Este patrón es muy parecido al anterior, con la única diferencia que contiene un dato más que es aproximadamente igual, por lo cual cuenta con una zona llana más amplia que el caso inmediatamente anterior. Los valores posteriores y anteriores son mayores y/o menores según sea el caso del sentido en el que abre la gráfica.

### **5.2.3.4 Cambio de pendiente**

En este caso se analiza un cambio de pendiente pronunciado de una pendiente. Este cambio significativo de la pendiente corresponde a un punto significativo.

## **5.2.4 Almacenamiento de dato**

Una vez determinado si el punto correspondiente es un punto significativo se procede a guardar la posición de dicho dato dentro de la base de datos particular. Con la posición determinada, se graba en otra base de datos el dato correspondiente de posición y de carga. Siendo estos los datos que forman la dirección de cada punto del dinagrama, por lo cual es fundamental guardarlos.

Esta nueva base de datos contiene los datos de posición y carga con puntos reducidos que permite la representación fiel de la función original pero con una menor cantidad de memoria requerida para tal fin.

## **6 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS**

### **6.1 ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO DE SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DEL PROYECTO**

La estructura del sistema de adquisición de datos se puede dividir en seis subsistemas, los cuales son: los fenómenos físicos, los sensores, el acondicionamiento de la señal, el hardware de adquisición, el computador y el software empleado para el análisis. (Ver ANEXO A).

Para poder plantear adecuadamente la estructura de un sistema de adquisición de datos, primordialmente, se debe reconocer los fenómenos físicos que se deseen medir. Posteriormente se deben escoger los sensores aptos y que permitan la lectura pertinente de las variables que se van a medir. Una vez seleccionados los sensores, se debe realizar un acondicionamiento de la señal, lo cual consiste en procesar de forma adecuada la señal adquirida por los sensores para su posterior etapa de operación. Con el acondicionamiento de la señal ejecutado, el siguiente paso consiste en elegir el hardware de adquisición que se enlazará con el computador del usuario y que permitirán la manipulación de las variables por medio del software o la plataforma desarrollada para el hardware de adquisición de datos seleccionado.

Para el desarrollo de este proyecto, se propusieron dos hardware de adquisición que son: PLC y National Instruments USB 6009. La estructura de un sistema de adquisición de datos, indiferentemente de la aplicación a la cual va a ser instalada, debe coincidir con los subsistemas mencionados anteriormente, pero los componentes que se deseen usar pueden diferir dependiendo de la necesidad del usuario. En las siguientes figuras se muestran las dos estructuras propuestas para el desarrollo de este proyecto:

Figura 47. Estructura del sistema de adquisición de datos basado en National Instruments.



Fuente: Autores.

Figura 48. Estructura del sistema de adquisición de datos basado en PLC.



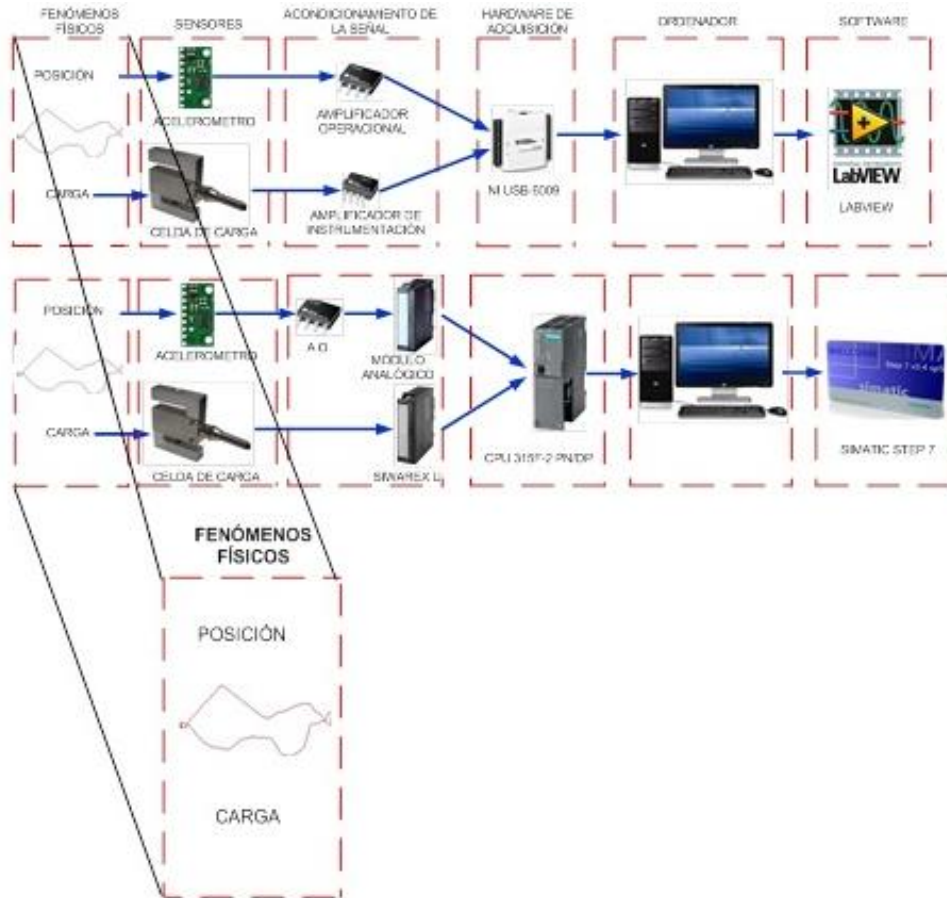
Fuente: Autores.

Como se puede observar en las figuras 3 y 4, la estructura del sistema de adquisición de datos es la misma para cada uno de los hardware seleccionados, sin embargo, los componentes en el subsistema de acondicionamiento de la señal son diferentes, pues la plataforma NI USB-6009 no cuenta con módulos analógicos ni tampoco con módulos de pesaje como si lo hace la CPU 315F-2 PN/DP. Asimismo, la interfaz de programación es diferente para cada uno de los dos dispositivos.

## 6.2 FENÓMENOS FÍSICOS

Todo sistema de adquisición de datos inicia con la propiedad física que se desea medir.

Figura 49. Fenómenos físicos estudiados en el sistema de adquisición de datos.



Fuente: Autores.

Los fenómenos físicos que se desean medir (teniendo en cuenta la estructura del sistema de adquisición de datos propuesta) son la carga y la posición en tiempo real de un sistema emulador que represente el movimiento lineal de la barra pulida para poder obtener los dinagramas de superficie. Estas dos variables son registradas gracias a un acelerómetro y una celda de carga. En la siguiente figura

se observa un ejemplo de un dinagrama de superficie, lo cual es uno de los objetivos de este proyecto:

Figura 50. Dinagrama de superficie.

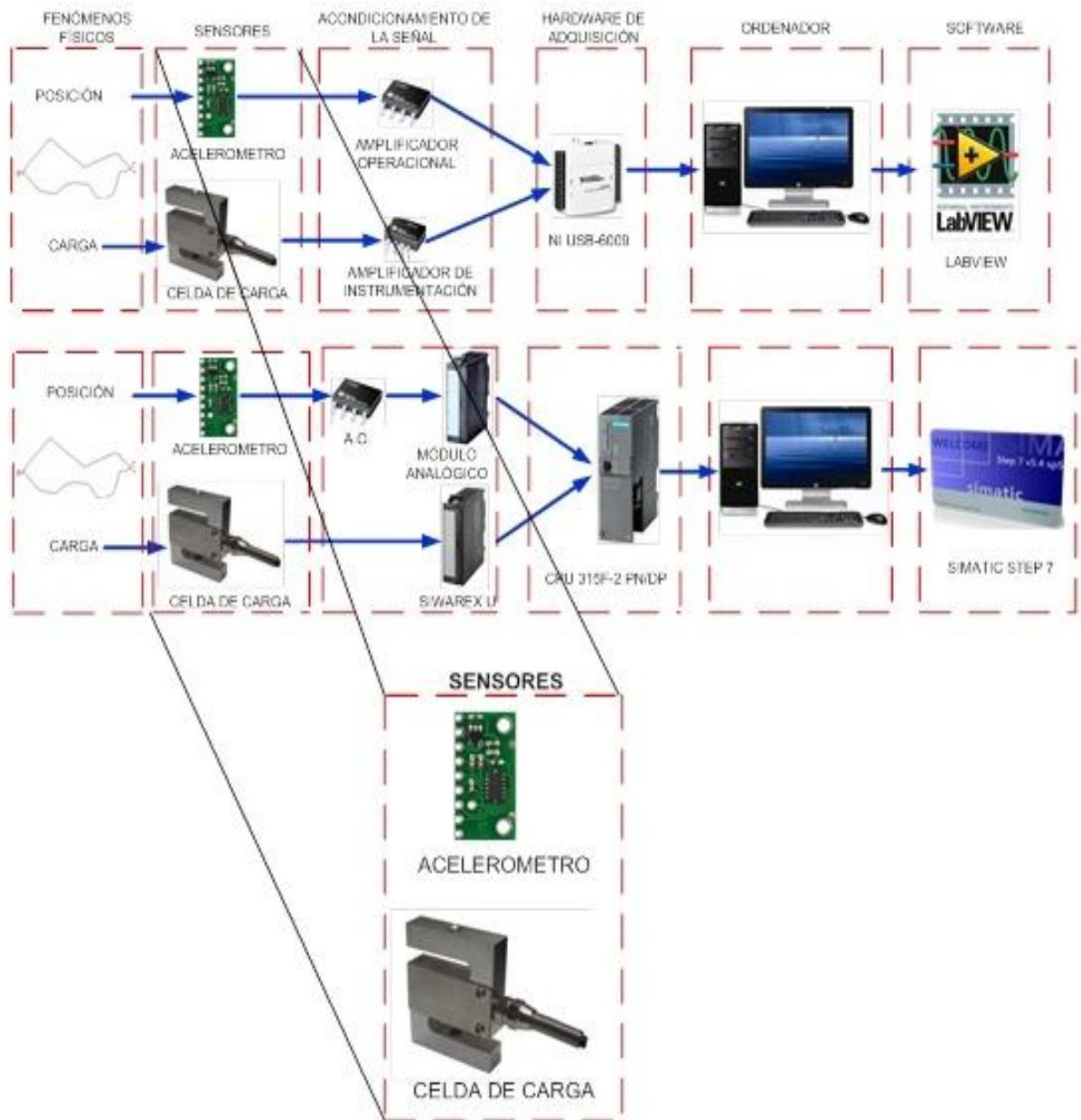


Fuente: Echometer.

### 6.3 SENSORES

Los sensores son elementos muy importantes en todo sistema de adquisición de datos, pues son estos los que convierten las propiedades físicas medidas en señales eléctricas y que son utilizadas para ser analizadas y permitir las correcciones necesarias donde sea que este instalado este sistema. No habría medición de variables con la ausencia de este eslabón en la estructura de un sistema de adquisición de datos, y por ende, no se podría establecer un sistema de adquisición de datos.

Figura 51. Ubicación de los sensores en la estructura de adquisición de datos.



Fuente: Autores.

Una variedad de defectos pueden ocurrir en los sistemas de levantamiento artificial tales como: desgaste en la bomba, varillas de bombeo deterioradas, válvulas trabadas, entre otros. Estos problemas son causados debido al uso y al desgaste normal del equipo, y se pueden acelerar y/o agravar por condiciones de

bombeo anormales. Una herramienta muy útil para evaluar estos estados de operación de un sistema de levantamiento artificial, es la carta dinagráfica, la cual muestra dos variables de interés que son la carga de la sarta de varillas en función de su posición y que además cuenta con dos tipos de dinagramas, el de superficie y el de fondo. Para hacer posible la visualización del dinagrama de superficie en este proyecto, hubo la necesidad de utilizar un sensor para cada variable. El prototipo emulador cuenta con una celda de carga y un acelerómetro, encargados de medir la carga y la aceleración, respectivamente.

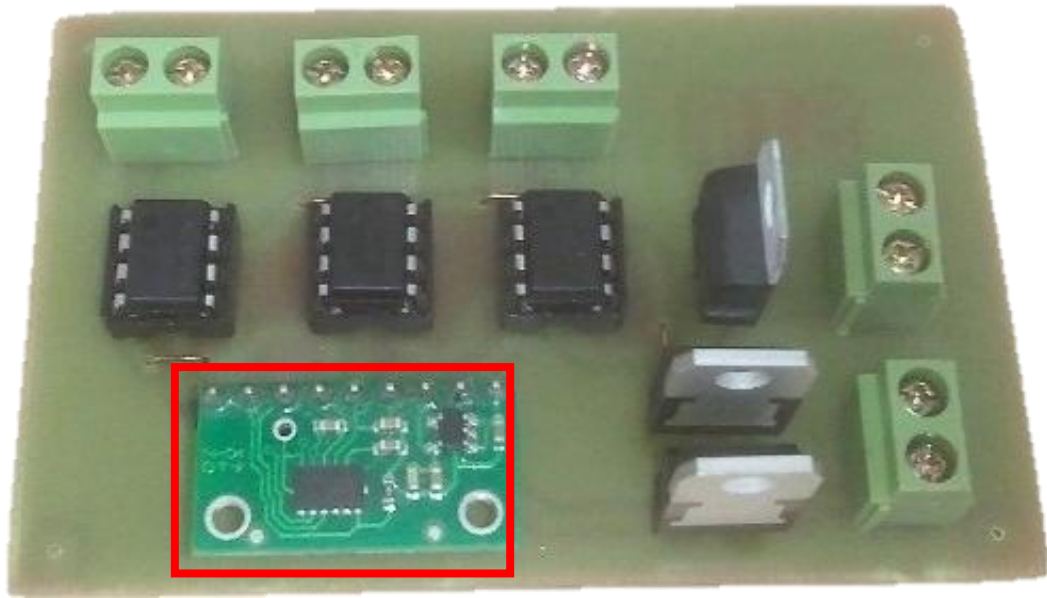
### **6.3.1 Acelerómetro MMA7361I**

Para la medición de la posición se utiliza un acelerómetro Freescale de referencia MMA7361L, el cual es un circuito integrado con una superficie micro mecanizada. El acelerómetro se encuentra instalado en la corredera del mecanismo y está ajustado con una sensibilidad de +/- 1.5 [G]. Este dispositivo electrónico está encargado de emular la aceleración de la barra pulida y su señal pasa por un posterior tratamiento (ver capítulo 4) para poder adquirir la posición de esta barra. Este sensor envía una señal eléctrica dependiendo de la aceleración a la cual está siendo sometido durante la carrera de ascenso y descenso de la corredera que se encuentra acoplada a la biela del mecanismo. La variable posición que se obtiene del acelerómetro se utilizó para emular y simular el dinagrama de superficie de un sistema de levantamiento artificial.

El dispositivo consiste de una célula sensible capacitiva (g-cell) y un acondicionador de señal ASIC contenidos dentro del mismo paquete. El g-cell es una estructura mecánica formada estructuralmente de materiales semiconductores (polisilicio). Se puede modelar como una serie de barras unidas a una masa movable central que se desplaza entre las barras fijas. Las barras móviles pueden

ser desviadas de su posición de equilibrio cuando se somete el sistema a una aceleración.

Figura 52. Acelerómetro MMA7361L en tarjeta.



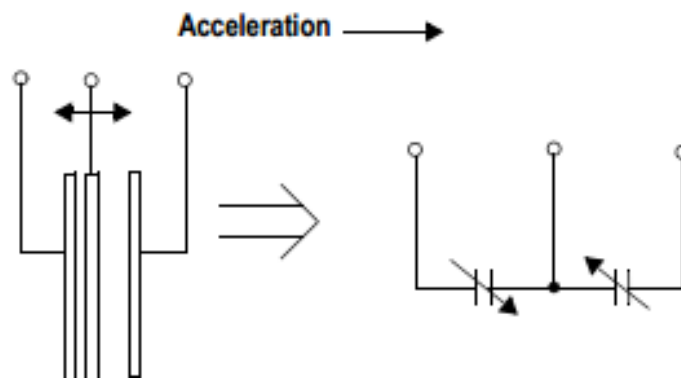
Fuente: Autores.

Tabla 1. Datos técnicos del acelerómetro MMA7361L con board reguladora.

ITEM	C	UNIDAD
Nº de ejes	3	-
Rango	+/-1.5g o +/-6	g
Voltaje alimentación	3.3-12V	V
Voltaje de salida	0-3,3	V
Corriente de consumo	0,5	mA
Tamaño:	1,3x2,5	mm
Rango de temperatura	-40 - 80	°C

Las barras g-cell forman dos capacitores “back-to-back”, es decir, las dos caras, positivas o negativas, hacia adentro. A medida que la barra del medio se mueve con aceleración, la distancia entre las barras cambia, así como también lo hace su capacitancia. El circuito integrado usa técnicas para medir los capacitores g-cell y extraer los datos de aceleración de la diferencia entre ambas capacitancias. En la siguiente figura se puede observar el funcionamiento de este sensor:

Figura 53. Modelo simplificado del transductor.



Fuente: Freescale.

La necesidad de usar un acelerómetro para este proyecto se encuentra en simular de forma real lo que desarrollan las tecnologías de punta, y así, contribuir al desarrollo propio de una metodología de adquisición de dinagramas de superficies. La señal de aceleración pasa por un posterior proceso, que primordialmente consiste en la doble integración de ésta para obtener la posición de la barra pulida.

### 6.3.2 Celda de carga Lexus tipo s

Para emular la carga de la barra pulida se utiliza una celda de carga tipo SM de referencia SP06-AL y que tiene una capacidad máxima de 10 kilogramos. Este

dispositivo cuenta con una alta precisión, estabilidad y confiabilidad. La celda de carga se encuentra instalada en la corredera del mecanismo y lleva consigo un peso fijo, en su carrera de ascenso y descenso, que emula la carga que representa la sarta de varillas. Asimismo, ella levanta por medio de un electroimán un segundo peso en su carrera de ascenso que simboliza el peso del crudo que se está levantando.

Tabla 2. Datos técnicos de Celda de Carga LEXUS SP06-AL.

ITEM	C	UNIDAD
Carga Nominal	10	kg
Máximo número de intervalos	2000	d
Valor Característico	2,0 +/- 0,02	mV/V
Balance de cero	1	% de salida nominal
Voltaje de alimentación	9~12	V
Voltaje Máximo	15	V

La celda de carga convierte la fuerza que es aplicada a ésta en una señal eléctrica y a la que posteriormente se hace un acondicionamiento para poder ser procesada y almacenada en el computador. Este sensor cuenta con cuatro galgas extensiométricas, que se deforman y convierten el desplazamiento en una señal eléctrica, y que se encuentran conectadas en una configuración tipo puente de Wheatstone. Esta celda se encuentra instalada en el mecanismo y registra un peso de 1.2kilogramosen su carrera ascendente más un peso fijo de 0.8 kilogramos. Durante su carrera descendente, la celda de carga se encuentra sometida bajo la fuerza del peso fijo. Por medio de este sensor, se emula la fuerza a la cual está expuesta la barra pulida durante su carrera ascendente y su carrera descendente.

Figura 54. Celda de carga instalada en el mecanismo.

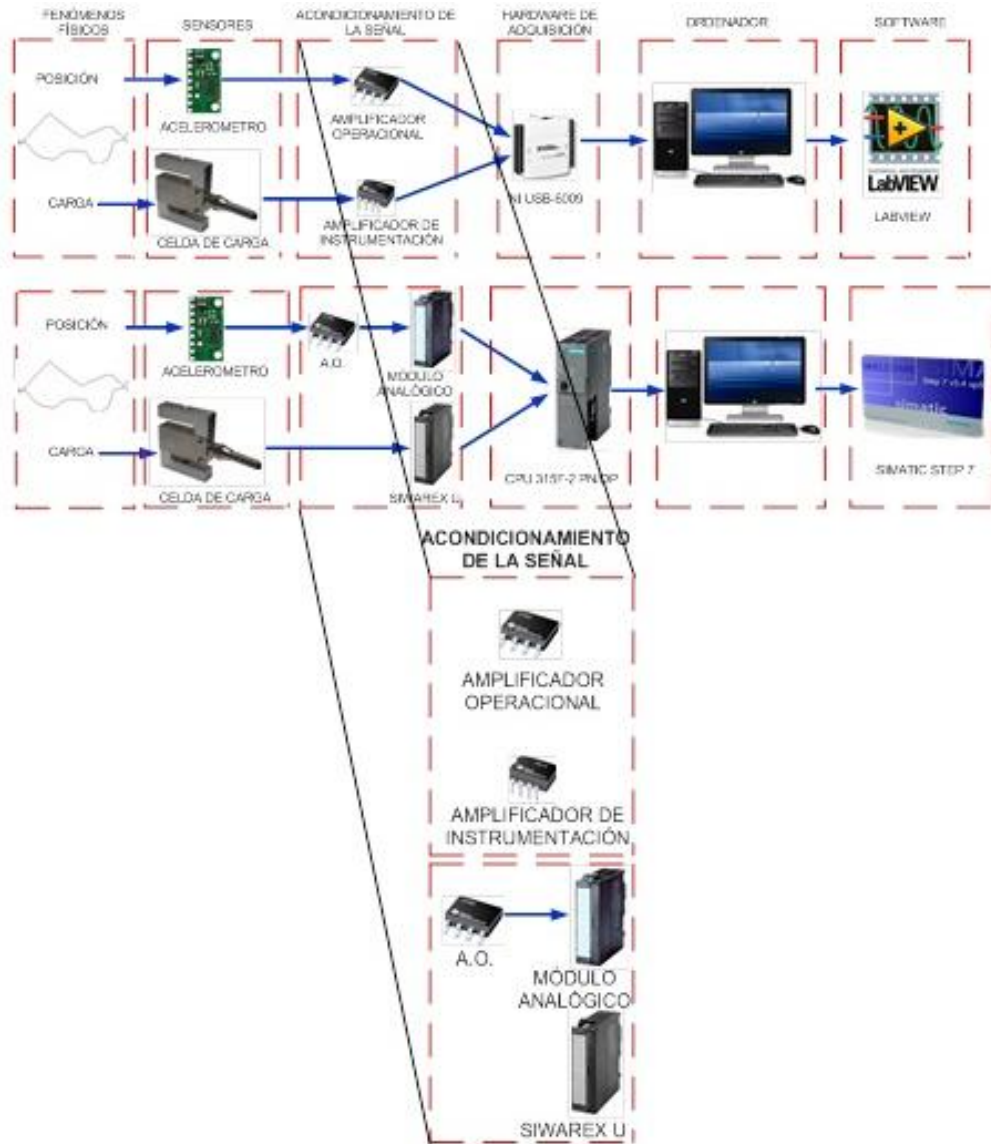


Fuente: Autores.

#### **6.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL**

El uso de amplificadores operacionales y amplificadores de instrumentación es común en la etapa de acondicionamiento de la señal. La señal de salida (analógica) de los sensores, en general, debe ser manipulada de tal manera que cumpla con los requerimientos de la siguiente etapa para su posterior procesamiento lo cual se lleva a cabo mediante el uso de un convertidor analógico-digital y un micro controlador. Por esta razón, para el acondicionamiento de la señal se usó un amplificador de referencia LF353 para tratar las señales de salida del acelerómetro y un amplificador de instrumentación para manipular la señal de salida de la celda de carga. Cabe resaltar que éste último sólo se usó con la tarjeta NI USB-6009, debido a que ésta no dispone de un módulo de pesaje como si lo hace el PLC.

Figura 55. Ubicación del acondicionamiento de señales en la estructura del sistema de adquisición de datos.



Fuente: Autores.

#### 6.4.1 Amplificadores

Según la figura 10, en la etapa de acondicionamiento de señales se utilizó dos tipos de amplificadores para cada hardware y sus funciones en el proceso de

adquisición de datos se describe en el siguiente numeral. Los amplificadores son dispositivos que utilizan energía con el propósito de magnificar la amplitud de un fenómeno. Como su nombre lo indica, amplificar consiste en agrandar la intensidad de algo, pero en este caso particular, lo que se quiere agrandar es la señal analógica de la celda de carga, debido a que el voltaje producido por este dispositivo, cuando es excitado, es del orden de mili voltios. Sin embargo, no solamente se hace uso de un amplificador electrónico para aumentar la intensidad de los sensores, sino para obtener una mejor lectura de las señales producidas por los mismos.

#### **6.4.1.1      *Amplificador operacional***

El amplificador operacional que se usó para esta aplicación es de referencia LF353, que además de su fácil adquisición en el comercio local, cumple con las funciones exigidas. Se instala este amplificador con configuración tipo seguidor de voltaje para poder adaptar impedancias, es decir, se utilizó esta configuración para conectar un dispositivo de alta impedancia (acelerómetro) a un dispositivo de baja impedancia (PLC y la tarjeta de National Instruments).

Figura 56. Amplificador operacional LF353.

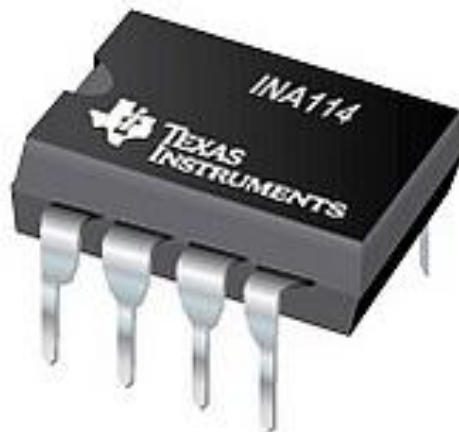


Fuente: Texas Instruments.

### 6.4.1.2 Amplificador de instrumentación

El amplificador de instrumentación usado para la lectura de la celda de carga es de referencia INA114AP. Similar al amplificador de operacional, este dispositivo es de fácil adquisición en el comercio local y también cumple con las funciones demandadas. La celda de carga es un transductor cuya señal de salida es muy pequeña, pero el bajo nivel de esta señal debe ser transmitida de alguna manera esta señal hacia el hardware de adquisición. Es por esta razón que el amplificador de instrumentación INA114AP es el adecuado para amplificar las señales de la celda de carga y así incrementar el nivel de resolución de la medida y mejorar la relación señal-ruido antes de su transmisión hacia el hardware

Figura 57. Amplificador de instrumentación INA114AP.



Fuente: Texas Instruments.

### 6.4.2 Módulo analógico

El módulo analógico utilizado en la estructura de adquisición basada en PLC es de referencia SM334 AI4/AO2x8/8Bit y es empleado para captar y adaptar la señal emitida por el acelerómetro. Este módulo se encarga de cuantificar y codificar la

señal del transductor; la cuantificación consiste en convertir muestras de amplitud continua en una sucesión de valores discretos preestablecidos y la codificación convierte un sistema de datos de origen a un sistema de datos de destino.

Sensores analógicos pueden ser conectados a una SIMATIC S7-300 por medio de los módulos analógicos. La señal producida por el acelerómetro, la cual es una señal analógica, será conectada a este modulo; esta señal es obtenida gracias al uso del modulo analógico y es enviada a través del bus de datos a la unidad de procesamiento de datos. La CPU es capaz de manipular la señal debido a que este módulo tiene la propiedad de convertir la señal analógica del acelerómetro en una señal digital por medio de un convertidor analógico-digital que se encuentra integrado dentro del mismo módulo. En la tabla se especifican los datos técnicos de este módulo.

Tabla 3. Datos técnicos del módulo analógico.

<b>Tensión de alimentación</b>	
Tensión de carga L+	
Valor nominal (DC)	24 V
<b>Intensidad de entrada</b>	
De la tensión de carga L+ (sin carga), máx.	110 mA
De bus de fondo 5 V DC, máx.	55 mA
<b>Entradas analógicas</b>	
Nº de entradas analógicas	4
Nº de entradas analógicas para medida de tensión	4
Tensión de entrada admisible para entrada de tensión (límite de destrucción), máx.	20 V
Intensidad de entrada admisible para entrada de corriente (limite de destrucción). Máx.	40 mA
<b>Rangos de entrada</b>	
Tensión	Sí
Intensidad	Sí
<b>Rangos de entrada (valores nominales), tensiones</b>	
0 a +10 V	Sí

<b>Rangos de entrada (valores nominales), intensidades</b>	
0 a 20 mA	Sí
Resistencia de entrada (0 a 20 mA)	50 $\Omega$
<b>Salidas analógicas</b>	
Nº de salidas analógicas	2
Salida de tensión, protección contra cortocircuito	Sí
Salida de tensión, intensidad de cortocircuito, máx.	11 mA
Salida de intensidad, tensión en vacío, máx.	15 V
<b>Rangos de salida, tensión</b>	
0 a 10 V	Sí
<b>Formación de valores analógicos</b>	
<b>Tiempo de integración y conversión/resolución por canal</b>	
Resolución con rango de rebase (bits incl. signo), máx.	8 bit
<b>Dimensiones</b>	
Anchura	40 mm
Altura	125 mm
Profundidad	120 mm

Figura 58. Módulo analógico SM334 AI4/AO2x8/8Bit.



Fuente: Siemens.

### 6.4.3 Siwarex U

El módulo Siwarex U es un dispositivo usado para recibir la señal emitida por la celda de carga al PLC. Este módulo permite capturar la señal en tiempo real a la cual está siendo sometida la celda de carga. Es un modulo de pesaje versátil usado para trabajos de pesaje y de fuerza, que registra y transfiere los datos al sistema de procesamiento con gran velocidad.

En este módulo se conecta una celda de carga tipo “S” que se encuentra instalada en la parte inferior del mecanismo de simulación del movimiento. A través de este dispositivo se puede medir el valor del peso actual y ofrece la ventaja de enviar esta señal a la unidad de procesamiento. Una característica excepcional de este módulo es la capacidad de hacer un ajuste teórico sin la necesidad de utilizar pesos de ajuste. En la tabla se muestran sus respectivas especificaciones técnicas y también las especificaciones técnicas de la interfaz de conexión.

Tabla 4. Datos técnicos del módulo Siwarex U.

<b>Tensión nominal</b>	Alimentación 24 V CC a través de enchufe frontal
<b>Límite superior e inferior estático</b>	CC 20,4 V/28,8V
<b>Límite superior e inferior dinámico</b>	CC 18,5 V/30,2 V
<b>Sobretensiones no periódicas</b>	CC 35 V para 500 ms
<b>Consumo máximo de corriente</b>	150 mA (un canal) / 240 mA (dos canales)
<b>Energía disipada del módulo habitual</b>	3,6W (un canal) / 5.8W (dos canales)
<b>Dimensiones Ancho x Alto x Fondo</b>	40 x 125 x 130
<b>Peso</b>	0,275 Kg

Tabla 5. Interfaz RS 232C del módulo Siwarex U.

<b>Velocidad de transferencia</b>	9600 baudios
-----------------------------------	--------------

<b>Bits de datos</b>	8
<b>Paridad</b>	par
<b>Bits de parada</b>	1
<b>Distancia máx.</b>	15m
<b>Nivel de señal</b>	según EIA-RS232C
<b>Separación potencial</b>	500V (CC)

## **6.5 HARDWARE DE ADQUISICIÓN**

El hardware de adquisición es la interface entre la señal y el computador. La tarjeta National Instruments se conecta con la computadora a través del puerto USB y el Autómata Programable Industrial (API) se conecta a través del estándar de redes de área local conocida como Ethernet. Estos dispositivos son encargados de guardar la información que producen los sensores, y asimismo, ejecutan las órdenes que se han configurado en su respectivo software. Este hardware ejecuta una secuencia de operaciones repetitivamente y que han sido programadas con anterioridad por el usuario en la interfaz de programación. El hardware de adquisición tiene la capacidad general de convertir voltaje analógico a señales digitales que pueden ser procesadas por el computador gracias a un convertidor analógico-digital. El hardware de adquisición esencialmente digitaliza señales analógicas, provenientes de los sensores, para que una computadora pueda interpretarlas.

### **6.5.1 PLC**

Para este trabajo de grado se hace uso de un PLC, que procesa las señales que se adquieren del acelerómetro y de la celda de carga y que, posteriormente, las almacena para poder realizar la emulación del dinagrama de superficie en uno de los paquetes del software SIMATIC STEP 7. Asimismo, se enlaza el PLC con un modulo analógico encargado de capturar la señal del acelerómetro y con un modulo de pesaje delegado para adquirir la señal de la celda de carga.

Figura 59. CPU315F-2 PN/DP.



Fuente: Autores.

Tabla 6. Datos técnicos del PLC.

CPU S7 315F-2 PN/DP	
Referencia 315 - 2FJ14-0AN0	
Voltaje de suministro	24.0 V
Límite inferior, rango permisible (DC)	20.4 V
Límite superior, rango permisible (DC)	28.8 V
Consumo de corriente	750 mA
Memoria RAM Integrada	512 Kbyte
Rango de temperatura operativa	0°C -60°C
Ancho	40 mm
Alto	125 mm
Largo	130 mm

### 6.5.2 National Instruments USB-6009

Esta tarjeta provee funciones básicas de adquisición de datos para aplicaciones como registro de datos, mediciones portables y experimentos académicos en general. Este instrumento, así como el PLC, permite el procesamiento de las señales adquiridas por el acelerómetro y la celda de carga. A diferencia del PLC, la tarjeta National Instruments no dispone de un módulo de pesaje, por lo cual es necesario adaptarle a la celda de carga tipo “S” un circuito adicional que le permita

la manipulación de la señal generada por la celda. En la figura se observa la tarjeta usada para este proyecto y en la tabla adyacente se muestran los datos técnicos de la misma.

Figura 60. National Instruments USB-6009.



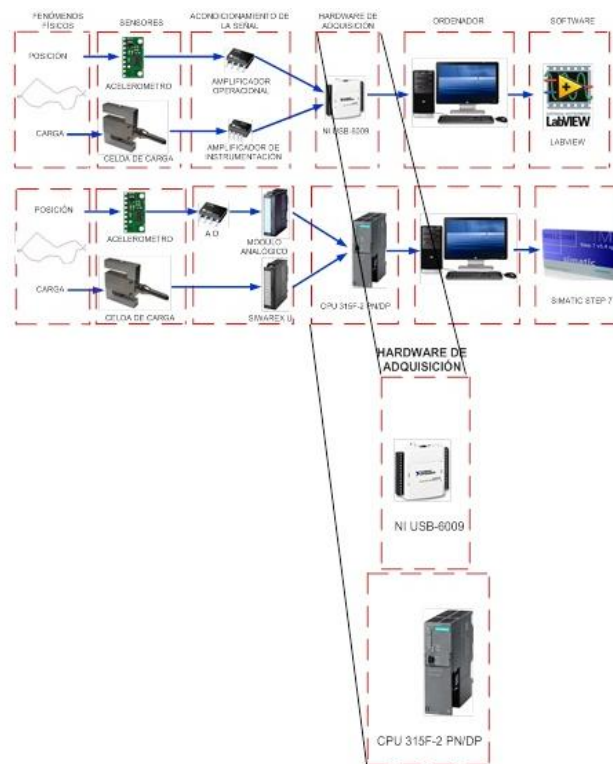
Fuente. National Instruments.

Tabla 7. Datos técnicos de la National Instruments USB-6009.

<b>Entradas analógicas</b>	
Canales	4 , 8
Canales diferenciales	4
Resolución	14 bits
Rata de muestreo	48 kS/s
Voltaje máximo	10 V
Rango máximo de voltaje	-10 V , 10 V
Rango mínimo de voltaje	-1 V , 1 V
Número de rangos	8
<b>Salidas analógicas</b>	
Canales	2
Resolución	12 bits
Voltaje máximo	5 V
Rango de voltaje máximo	0 V , 5 V
Rango de voltaje mínimo	0 V , 5 V

Entradas/salidas digitales	
Canales bidireccionales	12
Número de canales	0 , 12
Tipo de tecnología	TTL
Rango de entrada máximo	0 V , 5 V
Rango de salida máximo	0 V , 5 V
Especificaciones físicas	
Profundidad	8.51 cm
Ancho	8.18 cm
Alto	2.31 cm
Conector I/O	Terminales roscados

Figura 61. Ubicación del hardware de adquisición en la estructura de adquisición de datos.

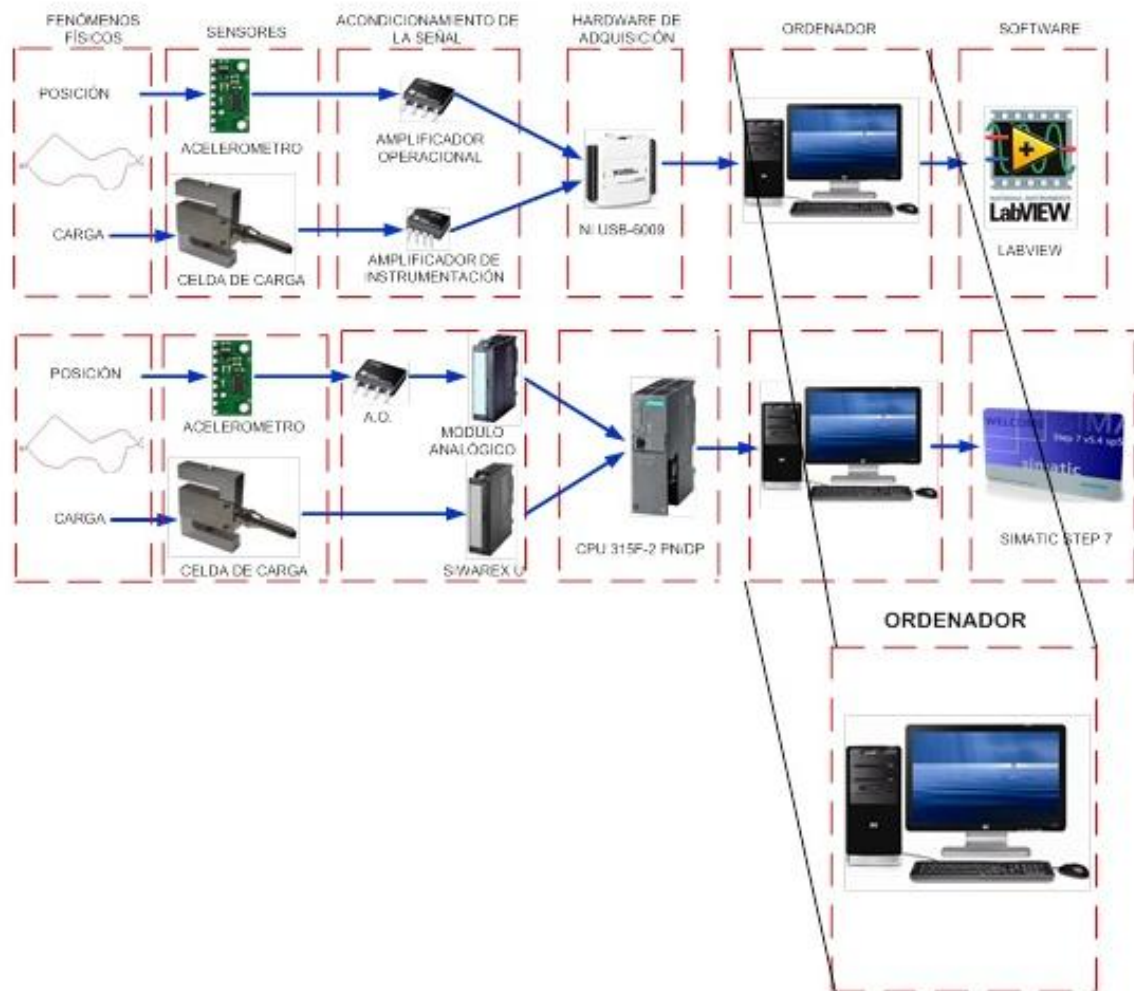


Fuente: Autores.

## 6.6 COMPUTADOR

Se utilizó una computadora Hewlett Packard (HP), con un disco duro de 300 GB, una memoria RAM de 3 GB, con procesador AMD Phenom y sistema operativo Windows XP. Esta computadora cuenta con el software LabVIEW y SimaticStep 7, en los cuales se realizó la configuración del hardware utilizado y la programación desarrollada para el proceso de adquisición de datos.

Figura 62. Ubicación del computador en la estructura de adquisición de datos.

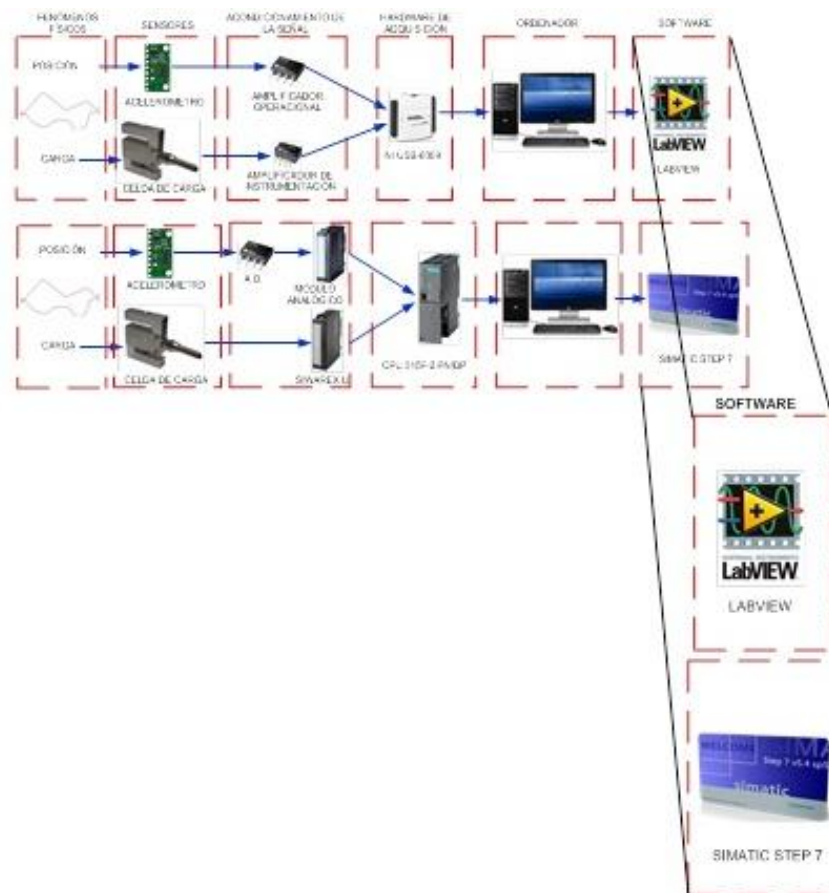


Fuente: Autores.

## 6.7 SOFTWARE

Para el sistema de adquisición de datos se hace uso de dos software los cuales son LabVIEW y SimaticStep 7. LabVIEW es una herramienta de programación gráfica utilizada para pruebas, control y diseño. Usa un lenguaje G que simboliza lenguaje gráfico. SimaticStep 7 es el software utilizado para la programación de controladores lógicos programables (PLC) de la familia Siemens, usado para configurar hardware, establecer comunicación con el PLC, proveer servicios, archiva y documenta, así como también tiene un gran número de funciones de diagnostico y operación.

Figura 63. Ubicación del software en la estructura de adquisición de datos.



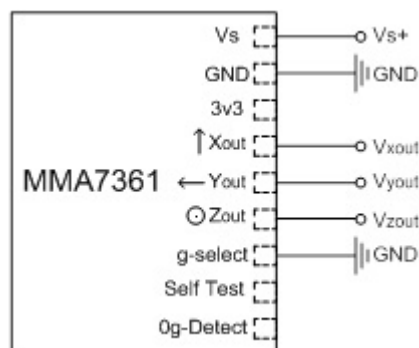
Fuente: Autores.

## 7. MONTAJE Y CONEXIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

### 7.1 CONEXIÓN DEL ACELERÓMETRO

El acelerómetro es el sensor principal para la obtención de la posición de la barra pulida y la referencia del dispositivo que se utilizó para este proceso se presenta en la figura.

Figura 64. Conexión del acelerómetro.



Fuente: Autores

Donde Vs+ es la alimentación positiva a +5V, GND es la conexión a tierra, Xout es la salida de lectura de aceleración en el eje X, Yout es la salida de lectura de aceleración en el eje Y, Zout es salida de lectura de aceleración en el eje Z y g-select es la conexión a tierra para una resolución de +/- 1.5 [g].

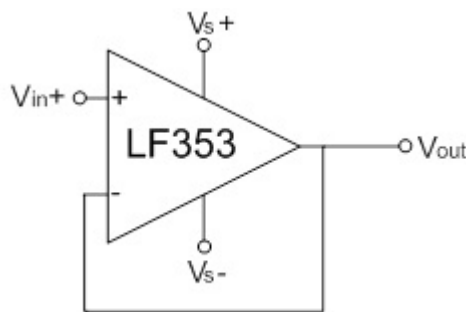
La señal de aceleración que produce este sensor pasa a través del amplificador operacional con configuración tipo seguidor para evitar la perturbación de la señal y permitir la adaptación de impedancias con el PLC o la tarjeta National Instruments, dependiendo de cual dispositivo se esté usando. Asimismo, se hace

uso de la señal emitida por el eje Y ( $V_{yout}$ ) para poder calibrar la señal del mismo y usarla para la obtención de la posición de la corredera.

### 7.1.1 Amplificador operacional con configuración seguidor

Es un amplificador operacional con una configuración especial y usada para adaptar impedancias, es decir, se usa con el propósito de no alterar la señal al conectar un dispositivo de alta impedancia a otro de baja impedancia. En la figura se observa un arreglo de esta configuración y la cual es de gran utilidad en la realización de este proyecto.

Figura 65. Configuración tipo seguidor de un amplificador operacional.



Fuente: autores.

Donde  $V_{s+}$  es la alimentación positiva a +10V,  $V_{s-}$  es la alimentación negativa a -5V,  $V_{in+}$  es la entrada inversora proveniente del respectivo eje del acelerómetro y  $V_{out}$ : salida con magnitud equivalente a  $V_{in}$ .

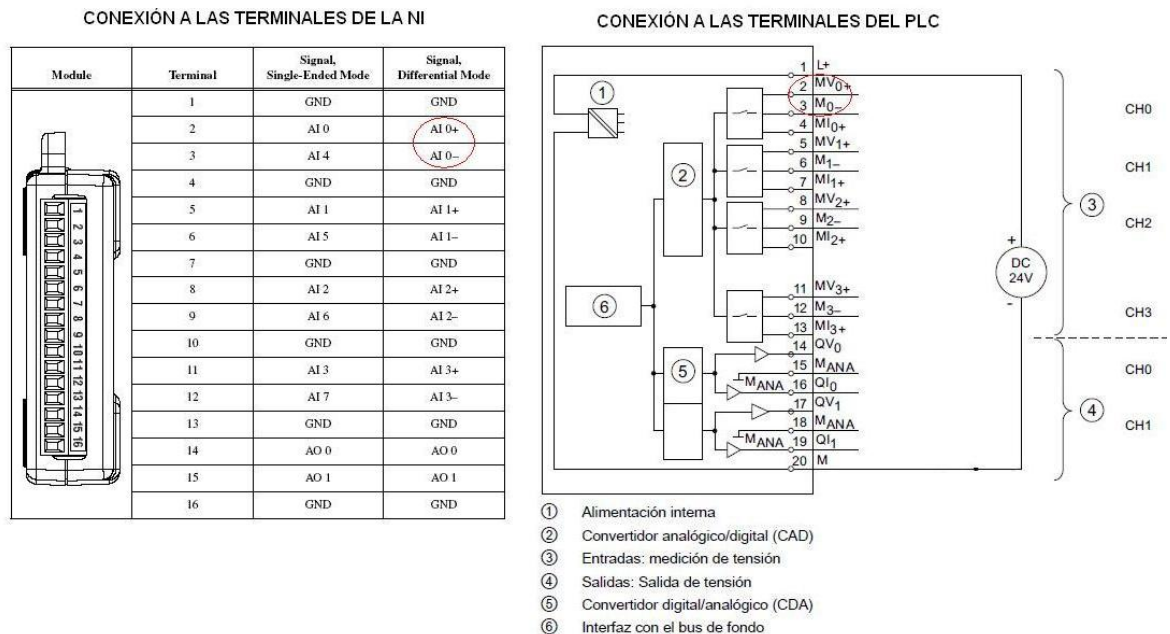
El seguidor de voltaje tiene la ventaja de tener una impedancia de entrada elevada y una impedancia de salida muy pequeña. Es conveniente para leer sensores con una intensidad muy pequeña y sin que perjudique la medición. Esta configuración es recomendada para hacer mediciones exactas de voltaje, pues la corriente pasa

desde el sensor hasta la unidad de procesamiento y el voltaje a la entrada de la unidad dependerá de la resistencia de dicha unidad y la resistencia de todo el sistema (cableado, sensor y conexiones).

### 7.1.2 Conexión del acelerómetro al hardware de adquisición

La conexión del acelerómetro, tanto al PLC como la tarjeta National Instruments es similar. Para el caso del PLC, la señal del acelerómetro se conecta al módulo analógico en la sección de entradas analógicas. Para la tarjeta National Instruments, la señal del acelerómetro se conecta en la sección de entradas analógicas. En la siguiente figura se presenta la conexión de la señal del acelerómetro a cada uno de los dispositivos de adquisición.

Figura 66. Conexión a las terminales del acelerómetro a la NI y al PLC.



Fuente: National Instruments y Siemens.

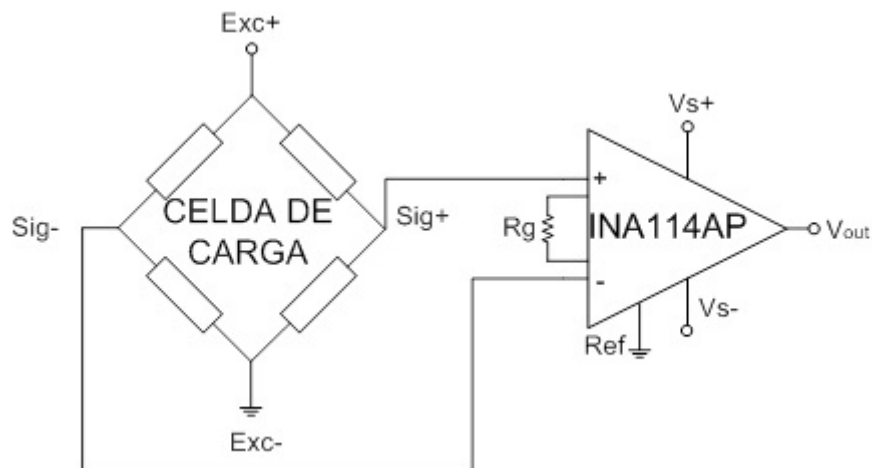
## 7.2 CONEXIÓN CELDA DE CARGA

### 7.2.1 Conexión de la celda de carga al amplificador de instrumentación para lectura de la National Instruments

Para este proyecto se quiere comprobar que la metodología propuesta sirve para cualquier dispositivo de adquisición de datos y para cualquier plataforma de programación a la cual está sometido cada dispositivo de adquisición de datos. Por esta razón, se debe hacer un arreglo especial con un amplificador de instrumentación como se muestra en la figura siguiente.

Donde Exc+ es la alimentación positiva a 5V+, Exc- es la conexión a tierra, Sig+ voltaje medido positivo, Sig- es el voltaje medido negativo, Rg es la resistencia que representa la ganancia, Vs+ es la alimentación positiva a 5V+, Ref es la conexión a tierra y Vout es la señal de salida amplificada.

Figura 67. Conexión de la celda de carga al amplificador de instrumentación.



Fuente: Autores.





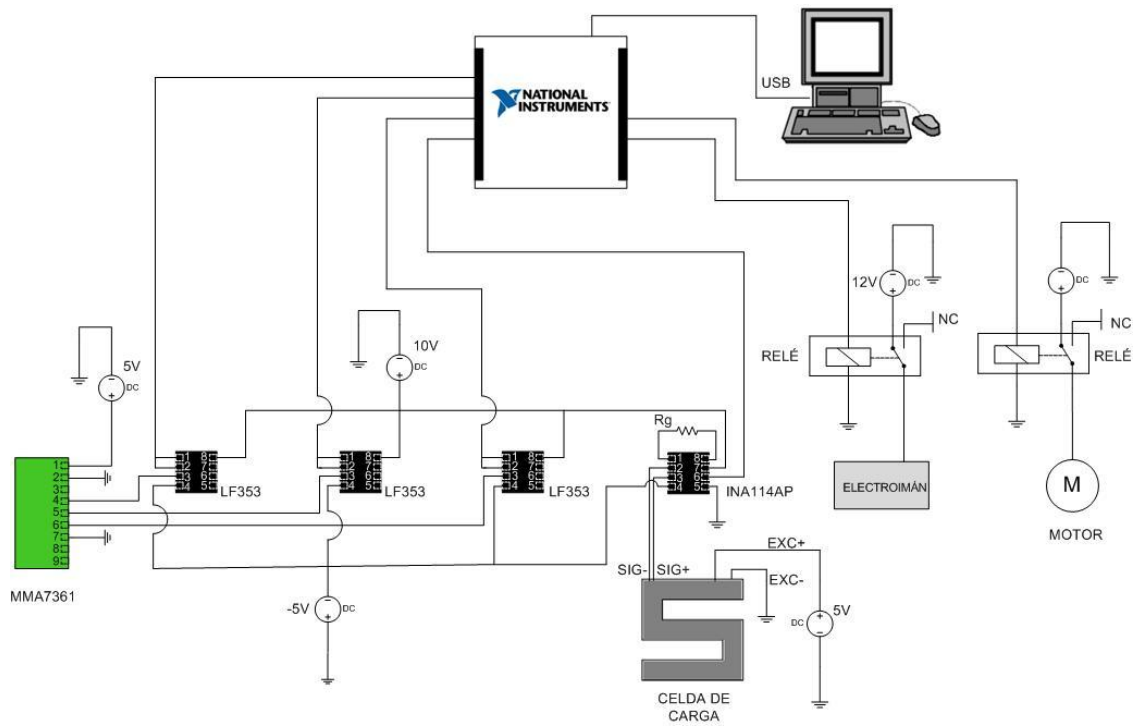
En la figura anterior se puede observar la conexión de los tres ejes del acelerómetro a su correspondiente amplificador operacional. Se hace uso de un electroimán que se encuentra conectado a un módulo digital del PLC y permitirá levantar o soltar la carga dependiendo del estado actual en el que se encuentre la manivela (punto muerto superior o punto muerto inferior). En este mismo módulo estará conectado el motor que está encargado empezar o detener el movimiento según la orden del operador. Por último, se encuentra conectada la celda de carga al módulo SIWAREX U que posibilita la lectura actual de la carga que sostiene tal sensor. La conexión del computador con la CPU del PLC se lleva a cabo mediante el protocolo TCP/IP, pues facilita una mayor transmisión de datos que una conexión tipo MPI y la conexión del módulo SIWAREX U al computador únicamente es posible mediante la interfaz estándar RS232.

### **7.3.2 Montaje general de los dispositivos a la tarjeta National Instruments**

El montaje que se lleva a cabo con la tarjeta National Instruments difiere del montaje al PLC, pues esta tarjeta no dispone de módulos y se tuvo la necesidad de hacer un arreglo especial para la celda de carga.

Como se puede observar en la figura posterior, el montaje de la tarjeta National Instruments difiere con el montaje del PLC en la celda de carga, puesto que se tuvo que instalar un amplificador de instrumentación que proporcionara una lectura adecuada de la celda de carga. Además, la conexión a cada uno de los dispositivos es directa, es decir, no se disponen de módulos y por ende tampoco hay existencia de bus de datos entre módulos. La conexión entre la tarjeta y el computador se da por medio del bus universal en serie (USB), el cual permite una alta tasa de transmisión de datos entre los dos dispositivos.

Figura 70. Montaje general de los dispositivos a la National Instruments.



Fuente: Autores.

## **8. ANALISIS DE RESULTADOS**

En el presente capítulo se procede a evaluar los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas. De esta manera, contrastar los resultados frente a los valores teóricos esperados.

### **8.1 DINAGRAMA SUPERFICIE**

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el prototipo de adquisición de datos mediante el PLC y el prototipo basado en PC (LabVIEW).

Los valores analizados corresponden a los valores de posición y carga, pues son estos los datos de interés para obtener el dinagrama de superficie. Estos datos son comparados con sus correspondientes teóricos para así hacer un análisis con respecto a estos.

#### **8.1.1 Posición**

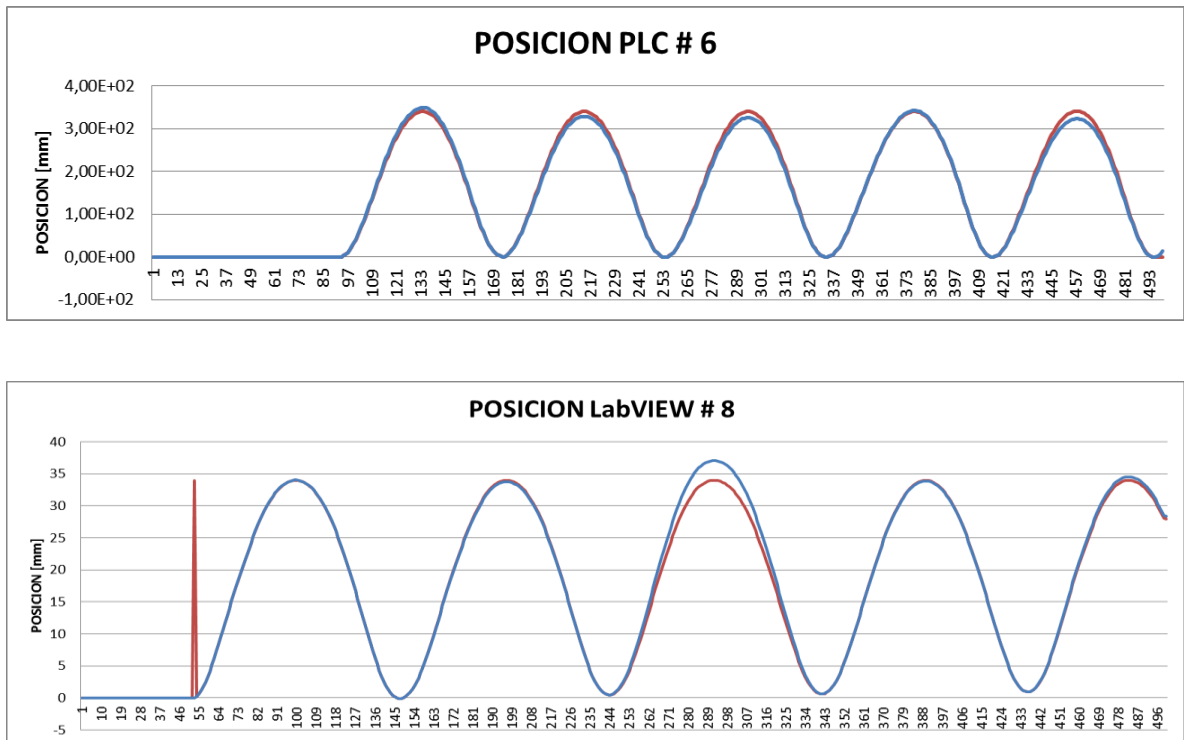
La posición medida por el prototipo es contrastada con la medición teórica para así obtener el error en su medida. Dicho análisis se hizo considerando la curva de posición teórica que proporcione el desplazamiento exacto según la construcción geométrica del dispositivo. Para el PEULA, dicho desplazamiento es de 340 mm.

Se realizaron diecinueve (19) mediciones las cuales contiene de alrededor de tres (3) a seis (6) ciclos a diversas velocidades de rotación. Cada ciclo es analizado con su respectivo teórico para así determinar el error en la medición de posición calculada.

Uno de los ciclos de API y otro de los basados en LabVIEW son mostrados a continuación, donde se puede observar que el comportamiento de la medición

esta dentro de los rangos aceptados y se observa una alta similitud en la curva teórica y en la curva medida antes de ser aplicado el ajuste final.

Figura 71. Posición



Fuente: Autores

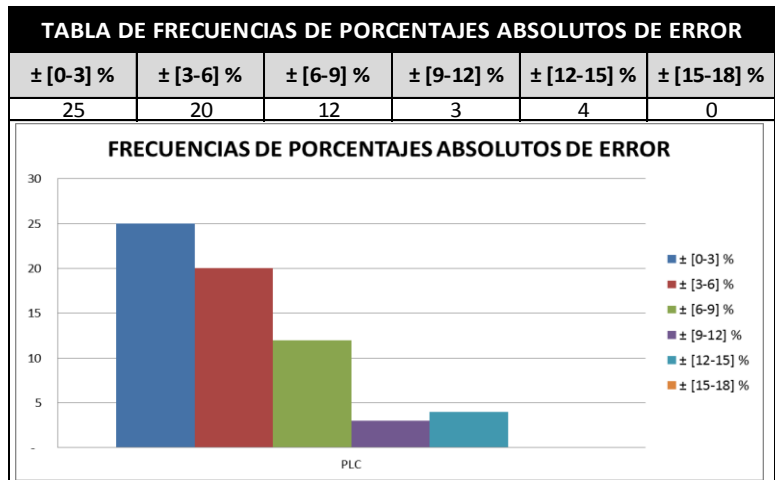
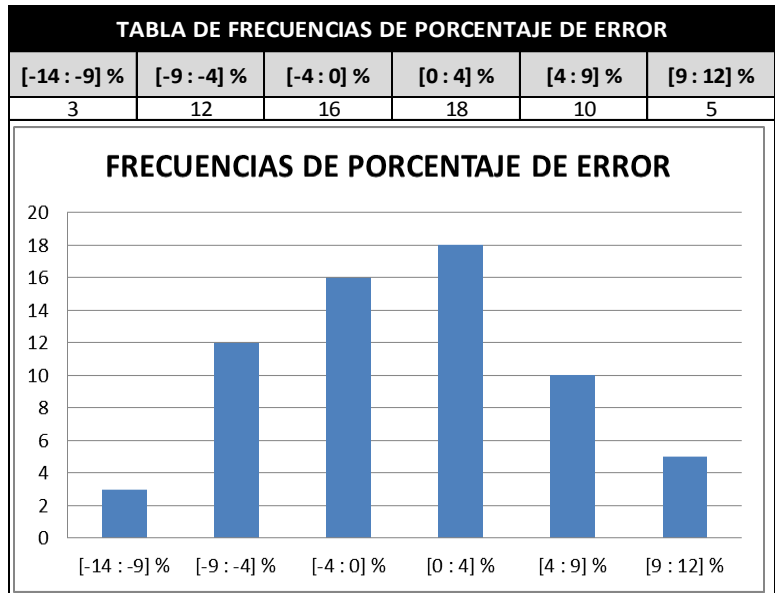
Como se observa en la graficas anteriores, es posible demostrar que la medición realizada, corresponde a los valores esperados.

En el ANEXO D, se encuentra las graficas adicionales para las diecinueve mediciones realizadas tanto para API como para LabVIEW.

Para el sistema basado en API se hicieron sesenta y cuatro (64) ciclos, mientras que para el sistema basado en plataforma PC (LabVIEW) se hicieron ciento diez (110) de los mismos. Estos datos son presentados en las siguientes tablas.

Tabla 8. Resultados de posición en la plataforma API.

MEDICION POSICION [mm]	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO
293,24	-46,76	-13,75%
293,97	-46,03	-13,54%
305,45	-34,55	-10,16%
309,99	-30,01	-8,83%
310,23	-29,77	-8,76%
311,39	-28,61	-8,41%
314,41	-25,59	-7,53%
314,73	-25,27	-7,43%
316,11	-23,89	-7,03%
317,79	-22,21	-6,53%
318,17	-21,83	-6,42%
319,47	-20,53	-6,04%
321,13	-18,87	-5,55%
322,32	-17,68	-5,20%
324,27	-15,73	-4,63%
326,49	-13,51	-3,97%
327,54	-12,46	-3,67%
327,74	-12,26	-3,60%
327,75	-12,25	-3,60%
327,86	-12,14	-3,57%
328,91	-11,09	-3,26%
331,12	-8,88	-2,61%
333,17	-6,83	-2,01%
334,51	-5,49	-1,61%
335,44	-4,56	-1,34%
336,11	-3,89	-1,14%
336,57	-3,43	-1,01%
337,83	-2,17	-0,64%
337,93	-2,07	-0,61%
338,66	-1,34	-0,39%
339,97	-0,03	-0,01%
343,79	3,79	1,11%
344,81	4,81	1,41%
345,27	5,27	1,55%
345,33	5,33	1,57%
345,94	5,94	1,75%
346,84	6,84	2,01%
347,03	7,03	2,07%
348,20	8,20	2,41%
349,05	9,05	2,66%
349,51	9,51	2,80%
349,70	9,70	2,85%
349,77	9,77	2,87%
350,00	10,00	2,94%
350,07	10,07	2,96%
350,73	10,73	3,16%
351,95	11,95	3,52%
353,23	13,23	3,89%
353,40	13,40	3,94%
354,68	14,68	4,32%
354,71	14,71	4,33%
354,93	14,93	4,39%
355,08	15,08	4,43%
356,14	16,14	4,75%
358,31	18,31	5,38%
360,25	20,25	5,96%
360,77	20,77	6,11%
361,82	21,82	6,42%
364,90	24,90	7,32%
371,36	31,36	9,22%
373,46	33,46	9,84%
381,49	41,49	12,20%
384,51	44,51	13,09%
388,90	48,90	14,38%



**ERROR EN LA MEDICION**

MEDIA PORCENTUAL	MODA PORCENTUAL
3,381%	± [0-3] %
MEDIA ABSOLUTA [mm]	MODA ABSOLUTA [mm]
11,496409	[0 - 10,2]

**MEDICION DE POSICION**

MEDIA ABSOLUTA [mm]	ERROR ABSOLUTO [mm]	ERROR RELATIVO [%]
340,25	0,25	0,07%

Tabla 9. Resultados de posición en la plataforma PC (LabVIEW)

MEDICION POSICION [mm]	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO	MEDICION POSICION [mm]	ERROR ABSOLUTO	ERROR RELATIVO
307,63	-32,37	-9,52%	359,49	19,49	5,73%
307,66	-32,34	-9,51%	359,88	19,88	5,85%
308,73	-31,27	-9,20%	360,15	20,15	5,93%
308,76	-31,24	-9,19%	361,71	21,71	6,39%
310,99	-29,01	-8,53%	361,79	21,79	6,41%
311,24	-28,76	-8,46%	362,30	22,30	6,56%
311,62	-28,38	-8,35%	362,33	22,33	6,57%
311,63	-28,37	-8,34%	364,34	24,34	7,16%
312,15	-27,85	-8,19%	364,79	24,79	7,29%
312,77	-27,23	-8,01%	365,03	25,03	7,36%
312,99	-27,01	-7,94%	366,86	26,86	7,90%
313,45	-26,55	-7,81%	367,55	27,55	8,10%
315,78	-24,23	-7,13%	367,96	27,96	8,22%
317,13	-22,87	-6,73%	368,23	28,23	8,30%
318,04	-21,96	-6,46%	368,32	28,32	8,33%
318,58	-21,42	-6,30%	368,38	28,38	8,35%
322,29	-17,71	-5,21%	368,67	28,67	8,43%
323,30	-16,70	-4,91%	368,89	28,89	8,50%
323,82	-16,18	-4,76%	368,90	28,90	8,50%
327,15	-12,85	-3,78%	371,32	31,32	9,21%
327,78	-12,22	-3,59%	371,66	31,66	9,31%
329,09	-10,91	-3,21%	371,68	31,68	9,32%
329,79	-10,21	-3,00%	371,98	31,98	9,41%
331,38	-8,62	-2,54%	374,14	34,14	10,04%
333,23	-6,77	-1,99%	374,14	34,14	10,04%
334,09	-5,91	-1,74%	376,44	36,44	10,72%
334,73	-5,27	-1,55%	376,47	36,47	10,73%
335,90	-4,10	-1,21%	377,13	37,13	10,92%
337,16	-2,84	-0,84%	378,76	38,76	11,40%
337,38	-2,62	-0,77%	379,31	39,31	11,56%
337,54	-2,46	-0,72%	380,41	40,41	11,89%
338,61	-1,39	-0,41%	381,10	41,10	12,09%
339,65	-0,35	-0,10%	383,49	43,49	12,79%
341,02	1,02	0,30%	384,04	44,04	12,95%
341,77	1,77	0,52%	385,20	45,20	13,30%
341,90	1,90	0,56%	385,72	45,72	13,45%
341,94	1,94	0,57%	386,76	46,76	13,75%
342,08	2,08	0,61%	388,18	48,18	14,17%
342,41	2,41	0,71%	391,14	51,14	15,04%
343,02	3,02	0,89%	393,54	53,54	15,75%
343,23	3,23	0,95%	393,62	53,62	15,77%
344,10	4,10	1,21%	395,64	55,64	16,36%
344,54	4,54	1,33%	396,27	56,27	16,55%
346,07	6,07	1,78%			
346,62	6,62	1,95%			
347,04	7,04	2,07%			
347,50	7,50	2,21%			
348,13	8,13	2,39%			
348,17	8,17	2,40%			
350,51	10,51	3,09%			
351,13	11,13	3,27%			
351,62	11,62	3,42%			
352,15	12,15	3,57%			
352,27	12,27	3,61%			
352,39	12,39	3,64%			
352,89	12,89	3,79%			
352,94	12,94	3,81%			
353,29	13,29	3,91%			
354,17	14,17	4,17%			
355,14	15,14	4,45%			
355,74	15,74	4,63%			
356,19	16,19	4,76%			
356,67	16,67	4,90%			
357,44	17,44	5,13%			
358,57	18,57	5,46%			
358,83	18,83	5,54%			
358,87	18,87	5,55%			
359,16	19,16	5,64%			

TABLA DE FRECUENCIAS DE PORCENTAJE DE ERROR					
[-14 : -9] %	[-9 : -4] %	[-4 : 0] %	[0 : 4] %	[4 : 9] %	[9 : 14] %
3	15	14	30	29	19

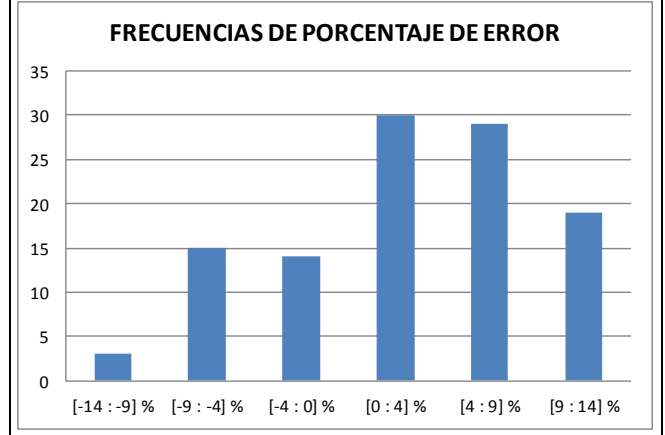
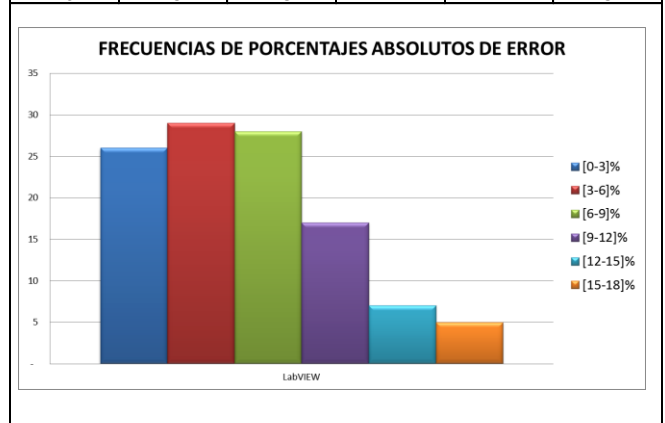


TABLA DE FRECUENCIAS DE PORCENTAJES ABSOLUTOS DE ERROR					
± [0-3] %	± [3-6] %	± [6-9] %	± [9-12] %	± [12-15] %	± [15-18] %
26	29	28	17	7	5



ERROR EN LA MEDICION	
MEDIA PORCENTUAL	MODA PORCENTUAL
4,012%	± [3-6] %
MEDIA ABSOLUTA [mm]	MODA ABSOLUTA [mm]
13,6395	[0 - 10,2]

MEDICION DE POSICION		
MEDIA ABSOLUTA [mm]	ERROR ABSOLUTO [mm]	ERROR RELATIVO [%]
351,31	11,31	3,33%

Se obtiene que para la plataforma API se tiene una media de 3.381% de error en la medición, es decir, se obtiene un error de aproximadamente  $\pm 11$  mm, con respecto a la teórica esperada. Además de esto se tiene que la frecuencia más alta de resultados se obtendrán dentro del rango de 0-3 % de error, lo cual satisface plenamente la metodología implementada.

Para la plataforma PC (LabVIEW), el error obtenido en la medición es un poco más alto, alcanzando valores de 4.012% que corresponden a aproximadamente  $\pm 14$  mm frente a la teórica esperada. Para esta plataforma se tiene que los resultados estarán con mayor frecuencia dentro del rango de 3-6 % que equivale a 10.2-20.4 mm, lo cual es un poco mayor que el encontrado en la plataforma API, pero que de igual manera satisface como resultado de medición.

### **8.1.2 Carga**

Los valores de carga muestran el comportamiento de las cargas aplicadas al PEULA, por lo cual dicha comprobación se hace mediante la verificación de los valores obtenidos corresponden a los valores reales de carga del sistema y que a su vez corresponden a un sistema que presente la carga de bombeo y sarta de varillas en ascenso y una carga de sarta de varillas en descenso. Los pesos teóricos son los siguientes:

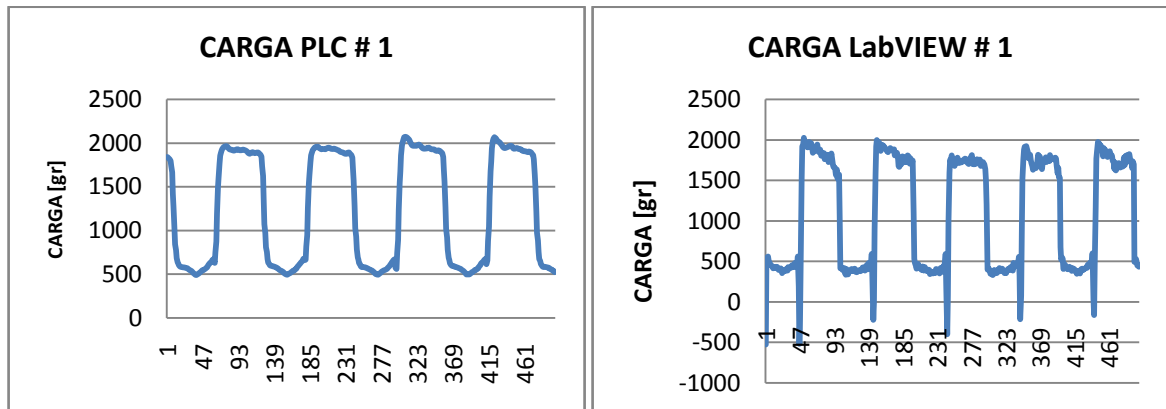
- PESO 1 (SARTA DE VARILLAS): 605 gr.
- PESO 2 (BOMBEO): 1190 gr.

Con esto se tiene que el peso total en ascenso es de 1895 gr. En descenso el peso total es de 605 gr. Debido a que es un sistema móvil y su aceleración fluctúa a lo largo del recorrido se tiene que el peso medido se encuentra en un rango cercano a dichos valores.

Como se observa a continuación ambos sistemas de hardware muestran los valores esperados de una forma efectiva, con la diferencia que el sistema de PLC

al usar un modulo especial para dicha función muestra los valores con mayor definición dicho que el modulo especial para ello compensa la señal, mejorando el ruido presente en esta, a diferencia de lo que sucede en LabVIEW que se utilizo como señal análoga el cual presenta mayor ruido en la señal.

Figura 72. Carga



Fuente: Autores

El pico presente en la grafica correspondiente a LabVIEW es un pico que se presenta en ocasiones cuando el acople entre el peso 2 y el electroimán ejerce una fuerza de compresión a la celda.

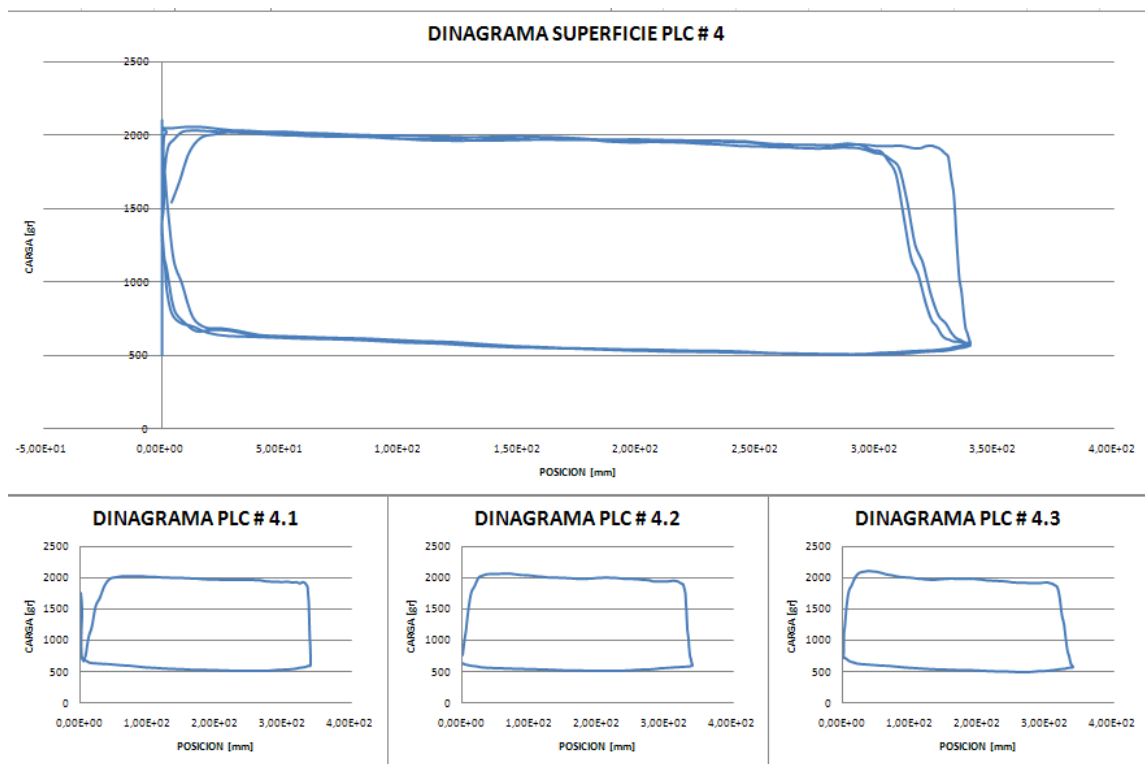
Otras graficas de carga se presentan en el ANEXO D correspondiente a resultados adicionales.

### 8.1.3Dinagrama

Una vez con los resultados de posición y carga, estos datos son usados para la construcción de los dinagramas superficiales del sistema emulador. Para ellos se hicieron una serie de pruebas para cada arquitectura, con la cual se evalúan de 3-4 ciclos por prueba. De cada prueba se muestra los dinagramas de cada ciclo superpuestos en una grafica general, donde se muestra que los resultados

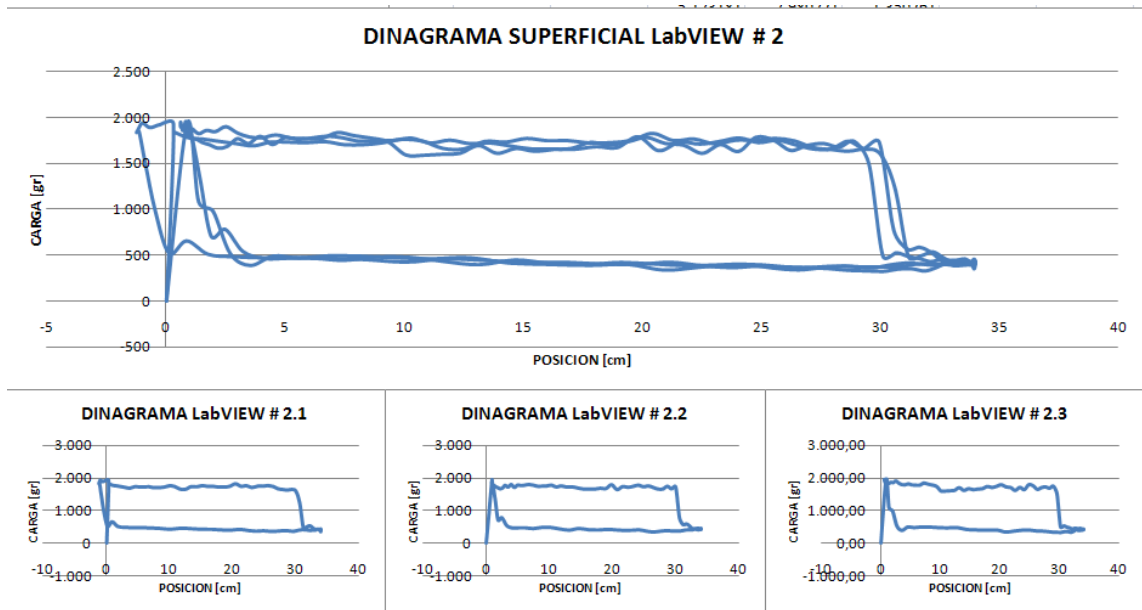
obtenidos son similares para dicha prueba, mostrando que no son muy diferentes los unos de los otros. Adicionalmente a esta grafica se muestran graficas particulares del dinagrama de cada ciclo individualmente.

Figura 73. Dinagrama PLC



Los dinagramas obtenidos por medio de PLC, son mucho más suaves frente a los obtenidos mediante LabVIEW. Este fenómeno se debe principalmente a la ausencia de un modulo especializado para dicha función en la plataforma PC, con lo cual dichos valores fluctúan de una forma que el modulo especializado de PLC no lo permite. Sin embargo, ambas arquitecturas representan los resultados esperados logrando así la obtención de dinagramas superficiales del sistema emulador.

Figura 74. Dinagrama LabVIEW



Cabe recordar que los dinagramas superficiales deben ser analizados por medio de una serie de ecuación para poder diagnosticar el pozo. Pero dicho diagnostico de dinagramas de fondo, no puede hacerse para el sistema emulador PEULA, pues dichas ecuaciones requieren una serie de incógnitas que no son propuestas en el presente proyecto, algunas de estas son:

- Profundidad del pozo
- Densidad del fluido
- Peso de la sarta de varillas

Los resultados adicionales de dinagramas pueden ser encontrados en el ANEXO D correspondiente a resultados adicionales.

## 8.2 REDUCCIÓN DE PUNTOS

El software implementado consta de cuatro niveles de reducción, siendo el nivel 1 el de mayor reducción pero a su vez el menos exacto y el nivel 4 el de menor reducción, pero el de mayor exactitud con la función original.

Se muestran tres resultados de la implementación de la metodología de reducción de puntos aplicados a tres dinagramas diferentes: El primero dinagrama corresponde a un dinagrama obtenido por el PEULA y los dos dinagramas adicionales obtenidos del software TOTAL WELL MANAGEMENT (TWM), para tener un referente adicional a los dinagramas propuestos por el PEULA.

A continuación se muestra la tabla de resultados de los porcentajes de reducción de los diversos niveles para los diferentes ejemplos.

Tabla 10. Tabla de resultados de porcentajes de reducción de los diversos niveles.

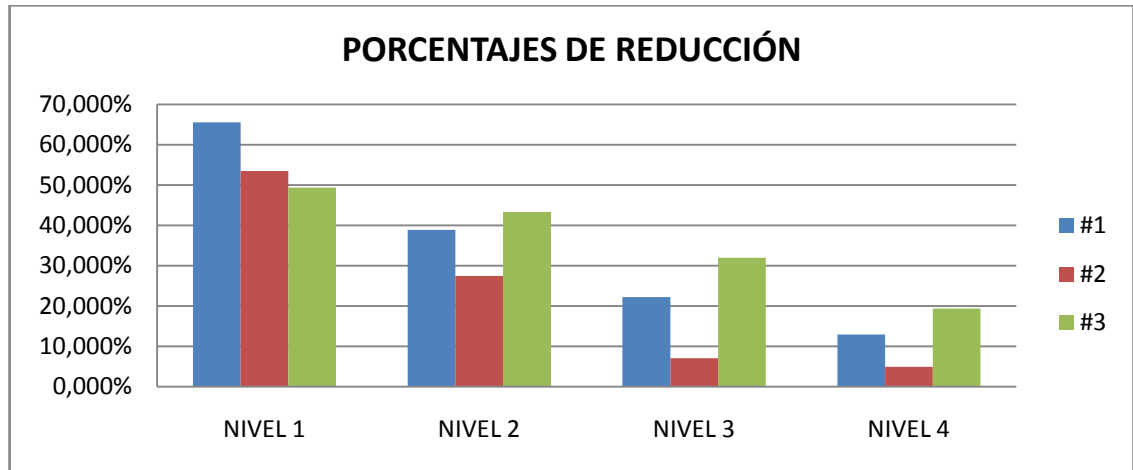
<b>RESULTADOS DE METODOLOGIA DE REDUCCION DE PUNTOS</b>										
<b>RESULTADO</b>	<b>FUENTE</b>	<b>PTOS ORIGINALES</b>	<b>NIVEL 1</b>		<b>NIVEL 2</b>		<b>NIVEL 3</b>		<b>NIVEL 4</b>	
			<b>PUNTOS</b>	<b>% REDUCCION</b>	<b>PUNTOS</b>	<b>% REDUCCION</b>	<b>PUNTOS</b>	<b>% REDUCCION</b>	<b>PUNTOS</b>	<b>% REDUCCION</b>
# 1	PEULA	108	34	65.519%	66	38.889%	84	22.222%	94	12.963%
# 2 <sup>2</sup>	TWM	142	66	53.521%	103	27.465%	132	7.042%	135	4.930%
# 3 <sup>3</sup>	TWM	150	76	49.333%	85	43.333%	102	32.000%	121	19.333%

Se obtiene para cada nivel un rango de reducción de puntos que se puede caracterizar:

- Nivel 1: 49.333% - 65.519%
- Nivel 2: 27.465% - 43.333%
- Nivel 3: 7.042% - 32.000%
- Nivel 4: 4.930% - 19.333%

<sup>2</sup> y <sup>3</sup> Los resultados gráficos correspondientes a estos ejemplos pueden ser encontrados en el ANEXO D.

Figura 75. Porcentajes de reducción.



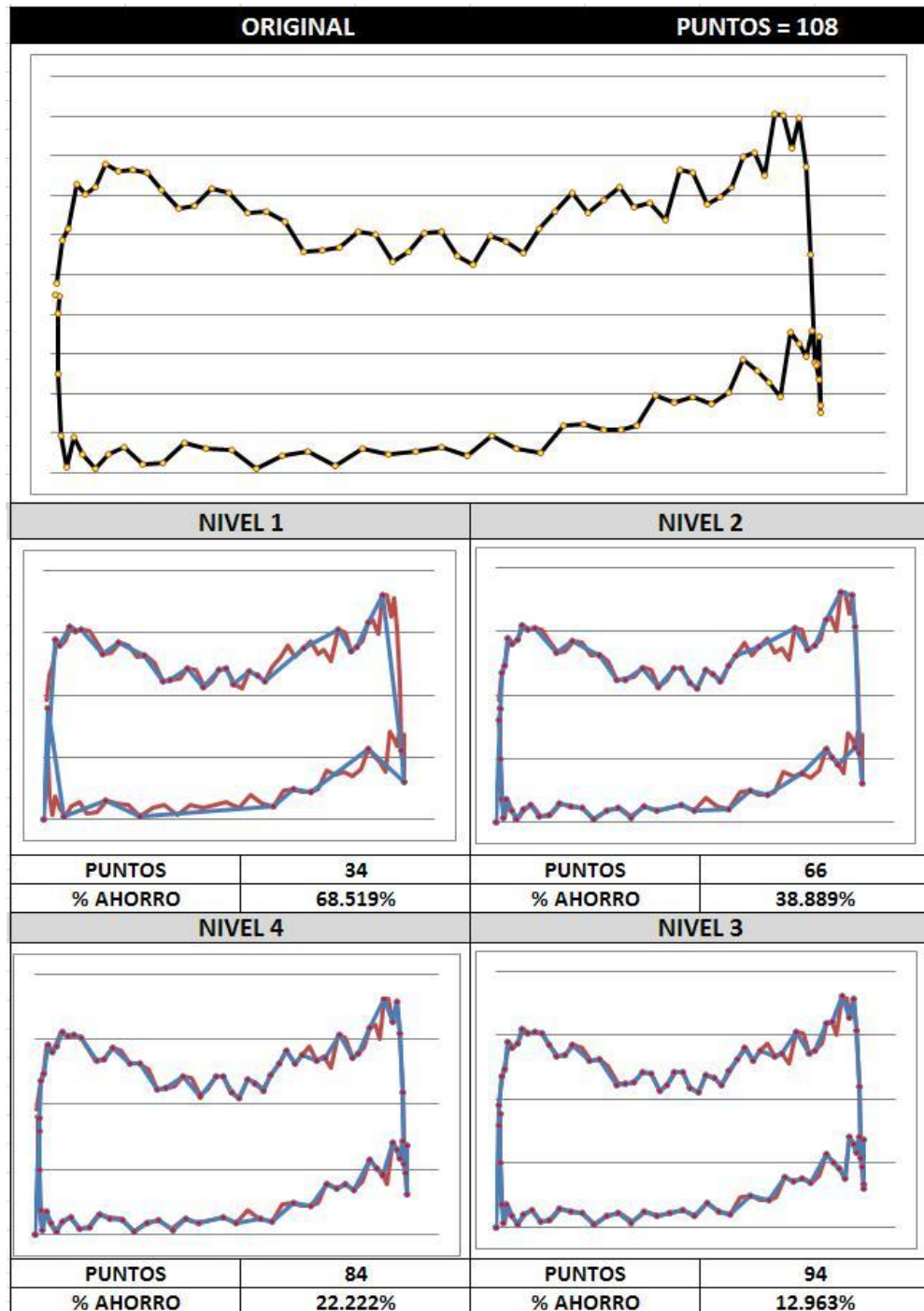
Fuente: Autores

Para el Resultado # 1 se tiene que los niveles de reducción 1 y 2 tienen un gran reducción de puntos (68.52% y 38.89% respectivamente) pero que tienen cierta dificultad de representar fielmente la curva original. Representan la tendencia a grandes rasgos de la composición de la curva original, por lo cual dichos niveles no llegan a ser satisfactorios.

Los niveles 3 y 4 tienen una reducción porcentual mucho menor que los dos niveles previamente descritos pero logran satisfacer la representación particularmente idéntica a la curva original, con lo cual estos niveles de reducción son aceptados.

La siguiente grafica pertenece al Resultado # 1, muestra la curva original y las curvas obtenidas de los diversos niveles de reducción contrastadas con la original (rojo).

Figura 76. Resultado # 1 – Reducción de puntos de dinagrama obtenido del PEULA.



Fuente: Autores

## CONCLUSIONES

Se lograron avances en materia de desarrollo propio y autónomo de diferentes conceptos que permiten un acercamiento a nivel interno a los conceptos de pozo y campo inteligente. Estos conceptos adquiridos para próximas etapas de desarrollo son en materia de:

- Metodologías de cálculo: En el desarrollo realizado se concluyó que los errores acumulativos producidos en la integración deben ser reducidos al máximo y se realizó una alternativa para reducir estos, a su vez que recomendaciones importantes para la siguiente fase de desarrollo de la metodología de cálculo.
- Arquitecturas de hardware: Se evaluó arquitecturas tipo PLC y plataforma PC, donde se concluyó que arquitecturas tipo PLC instaladas en cada pozo, representan un elevado costo en equipos que lo vuelve poco viable. A su vez, dicha adquisición se comprobó que puede ser realizada por otras arquitecturas basadas en plataforma PC, que permiten de igual manera obtener resultados altamente satisfactorios con menor costo.

El prototipo emulador de unidad de levantamiento artificial logró emular de la manera esperada las condiciones de movimiento propuestas, representado el movimiento alternativo presentado en las unidades reales, y a su vez representó de forma adecuada las condiciones de carga presentes en las mismas. El mecanismo desarrollado es un primer modelo de emulación de las unidades de levantamiento, con el cual se pueden hacer futuras pruebas y futuras etapas de desarrollo sobre estas temáticas en la Universidad Industrial de Santander.

Los dinagramas de superficie obtenidos corresponden a los valores esperados, con lo cual se puede asegurar que el sistema de adquisición de datos planteado cumple los requerimientos esperados en esta etapa de desarrollo.

La metodología desarrollada e implementada permitió determinar las condiciones dinámicas (Aceleración, Velocidad y Posición) a partir de un acelerómetro y basado tanto en plataforma PC como en API, mostrando de esta forma la versatilidad de la metodología desarrollada.

La metodología de reducción de puntos desarrollada e implementada a partir de comparación lógicas, permitió lograr ahorros de hasta un máximo de 32% en memoria según sea los diversos tipos de curva y que de igual manera logra representar con alto grado de satisfacción las curvas originales de los dinagramas evaluados.

## RECOMENDACIONES

Para mejorar en la precisión de la metodología de posicionamiento, sería conveniente hacer un proceso independiente para cada ciclo del sistema, en vez de trabajar con todo el set de datos de una medición. Considerar individualmente cada ciclo, permitiría reducir aún más los errores acumulativos en el proceso de cálculo.

Para el caso de la medición de carga, se recomienda usar hardware especializado para dicha función, debido a que presenta resultados más precisos según lo evaluado con el PLC y su módulo de pesaje Siwarex U. Aunque se reconoce que la trabajar dicha señal como una señal análoga no es una limitante, si presenta mayor dificultad en el tratamiento de dicha señal que con tarjetas electrónicas de un desarrollo mucho más robusto.

La reducción de funciones a puntos significativos es un campo de investigación bastante amplio y que puede permitir reducciones en memoria de almacenamiento mucho mayores a los encontrados por el algoritmo propuesto en este trabajo y que adicionalmente permitan la reconstrucción original de las curvas a partir de las curvas reducidas.

## BIBLIOGRAFÍA

- **ALMEIDA, Manuel.** Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Universidade Estadual de Campinas. Diciembre 1993.
- **JENTSCH Jr., W.A. y MARSS, R.D.** Computerized Automation of Oilfield Production Operations: An Extensive 5-Year Study into the Costs and Benefits. En: SPE Production Engineering. Agosto, 1988. Vol. 3, No. 3, p. 299-304.
- **McCOY, James N.** Method and Apparatus for measuring pumping rod position and other aspects of a pumping system by use of an accelerometer. 1995.
- **REGATTIERI, M.** Neurofuzzy Interpolation: II – Reducing complexity of Description. En: neural Networks, 1993. Vol. 3, p. 1835-1840.
- **RODRIGUEZ, Aquilino.** Sistemas SCADA. México: Ed. Marcombo y Ed. Alfaomega, 2007. 447 p.
- **SEIFERT, Kurt y CAMACHO, Oscar.** Implementing positioning algorithms using accelerometers. Application Note. Freescale Semiconductor. Rev. 0, 02/2007.
- Portal de Automatización industrial, <http://infopl.net/>.
- Portal de siemens, <http://supoport.automation.siemens.com/>

# **ANEXOS**

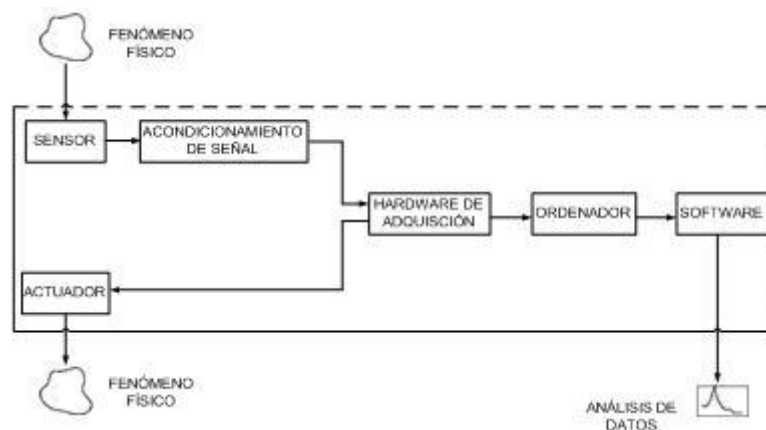
## Anexo A. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Es el proceso que consiste en el muestreo de un fenómeno físico para producir datos que potencialmente pueden ser manipulados por un computador. Los sistemas de adquisición de datos convierten una señal analógica en valores digitales. Los componentes principales de un sistema de adquisición de datos son:

- Sensores que se encargan de convertir las propiedades físicas en señales eléctricas.
- Circuitos de acondicionamiento de señales que convierten las señales provenientes del sensor en señales limpias, es decir, libre de ruidos y componentes que no se desean.
- Convertidores analógicos-digitales que convierten la señal acondicionada en valores digitales.

En la figura se observa el ciclo básico de un sistema de adquisición de datos y cada uno de sus componentes.

Figura 77. Proceso de adquisición de datos.



Fuente: MATLAB.

## SENSORES

Un sensor es un convertidor que mide una cantidad física y la convierte en una señal que puede ser leída por un instrumento electrónico. Es un dispositivo que recibe y responde a una señal. Su sensibilidad indica qué tanto varía la salida del sensor cuando el fenómeno físico cambia, es decir, sensores que miden cambios muy pequeños deben tener alta sensibilidad. La señal de salida de un sensor está diseñada para ser proporcionalmente lineal al valor de la propiedad medida, entonces la sensibilidad se puede definir como el ratio entre la señal de salida y la propiedad medida. Estos dispositivos cuentan con un número de desviaciones que se deben tener en cuenta cuando se interactúa con ellos y las cuales son:

- En la práctica la sensibilidad puede diferir del valor especificado. Esto se llama error de sensibilidad, pero el sensor puede seguir siendo lineal.
- Debido a que el rango de la señal de salida es limitado, ésta eventualmente llega a un mínimo o máximo cuando la propiedad a medir excede tales límites.
- Si la señal de salida del sensor no es cero cuando la propiedad medida es cero, entonces el sensor dispone de un “offset”. Éste se define como la magnitud de la señal de salida del sensor cuando la señal de entrada es cero.
- El ruido es una desviación aleatoria de la señal que cambia en el tiempo.
- El sensor puede ser sensible a otras propiedades a parte de la propiedad a medir. Muchos de los sensores son influenciados por la temperatura del ambiente que los rodea.

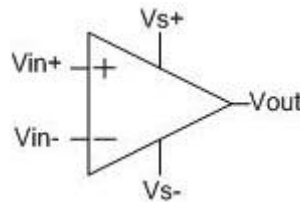
Todas estas desviaciones se pueden clasificar como errores sistemáticos o errores aleatorios. Los errores sistemáticos pueden, algunas veces, ser compensados por medio de alguna estrategia de calibración. El ruido es un error

aleatorio que puede ser reducido mediante el procesamiento de la señal, como el filtrado, usualmente a expensas del comportamiento dinámico del sensor.

## AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Es un acoplamiento DC de alto voltaje de ganancia con una entrada diferencial y, usualmente, con una sola salida. Un amplificador operacional produce un voltaje de salida que corresponde a la diferencia del voltaje que se encuentra entre los dos terminales de entrada y que se multiplica por una ganancia. La salida de un amplificador operacional es normalmente más grande que la diferencia de voltaje de entrada. A continuación se presenta la forma cómo se representa de este tipo de circuito electrónico:

Figura 78. Representación de un amplificador operacional.



Fuente: Enciclopedia Wikipedia.

De acuerdo al circuito anterior, se pueden definir cada una de las variables como:  $V_{in+}$  es la entrada no inversora del sensor,  $V_{in-}$  es la entrada inversora del sensor,  $V_{out}$  es el voltaje de salida del amplificador,  $V_{s+}$  es la alimentación positiva y  $V_{s-}$  es la alimentación negativa.

## SEGUIDORES DE VOLTAJE

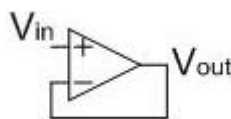
Los seguidores de voltaje son usados para transferir un voltaje de un primer circuito, que contiene un alto nivel de impedancia de salida, a un segundo circuito

con un bajo nivel de impedancia de entrada. Este dispositivo evita que el segundo circuito se cargue de manera inaceptable e interfiera con la operación deseada.

Si el voltaje transferido no cambia, se dice que el amplificador tiene una ganancia correspondiente a una unidad; se conoce como seguidor de voltaje debido a que el voltaje de salida rastrea o sigue al voltaje de entrada. Aunque la ganancia de voltaje de un amplificador operacional tipo seguidor pueda ser aproximadamente una unidad, éste provee una ganancia considerable de corriente, y por ende, una ganancia de potencia. Sin embargo, es común decir que un seguidor de voltaje tiene una ganancia unitaria refiriéndose a una ganancia de voltaje.

Un amplificador operacional tipo seguidor puede ser construido conectando su salida a la entrada inversora y conectando la señal de interés a la entrada no inversora. En esta configuración, todo el voltaje de salida es puesto contrario y en serie con el voltaje de entrada. Esta conexión hace forzar al amplificador operacional a ajustar su voltaje de salida igual al voltaje de entrada. La importancia de este circuito no se encuentra en el cambio de o no del voltaje, sino en las impedancias de entrada y salida del amplificador operacional. La impedancia de entrada al amplificador operacional es muy alta, lo que significa que la entrada de este dispositivo no sobrecargue la fuente de la señal y extraiga una pequeña porción de corriente. Debido a que la impedancia de salida del amplificador operacional es muy baja, conduce a la carga como si fuese una fuente de voltaje casi perfecta. A continuación se presenta un circuito de esta configuración y sus respectivas variables:

Figura 79. Configuración tipo seguidor de un amplificador operacional.



Fuente: Enciclopedia Wikipedia.

## **Anexo B. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE DINAGRAMAS**

El uso de levantamiento artificial se alude al incremento del flujo de líquidos, tales como el petróleo o agua, de un pozo de producción. Esto se logra mediante el uso de dispositivos mecánicos dentro del pozo (tal dispositivo es la bomba de subsuelo) o mediante el decremento de la columna hidrostática del líquido que se lleva a cabo cuando se inyecta gas a una profundidad definida del pozo. El levantamiento artificial es de vital importancia en pozos cuando la presión en la reserva es insuficiente para conducir los fluidos a la superficie, pero son usados frecuentemente en pozos donde el flujo se da naturalmente para incrementar la rata de flujo por encima del flujo natural. El fluido producido puede ser petróleo, agua o una mezcla de petróleo y agua, frecuentemente mezclado con un poco de gas.

### **DINAGRAMAS**

El dinagrama es una herramienta imprescindible cuando existe bombeo mecánico como levantamiento superficial. Su función consiste en registrar ininterrumpidamente las cargas y las deformaciones que tolera el vástago pulido, mostrando dos variables, que son Carga vs. Posición, que se obtienen sabiendo la carrera perteneciente del vástago balancín y se registra en lo que se conoce como una carta dinamométrica, que posteriormente debe ser estudiada para identificar los inconvenientes que pueden existir en el fondo del pozo y así plantear soluciones pertinentes dependiendo del tipo de falla.

Hoy en día se podría decir que el método de levantamiento artificial más utilizado es el bombeo mecánico y por tal razón es importante el estudio del dinagrama, pues es un elemento del cual se puede inferir el desempeño de un sistema de bombeo mecánico y que genera una grafica en la que se puede visualizar la carga

de la varilla lisa en función de la posición. Asimismo, tal grafica se puede interpretar como el trabajo hecho en superficie por la unidad de bombeo mecánico por “stroke”.

- **Dinagrama de superficie**

El dinagrama de superficie es la obtención de cargas que se presenta en la barra pulida para precisar en superficie el desempeño de la bomba por cada ciclo de bombeo.

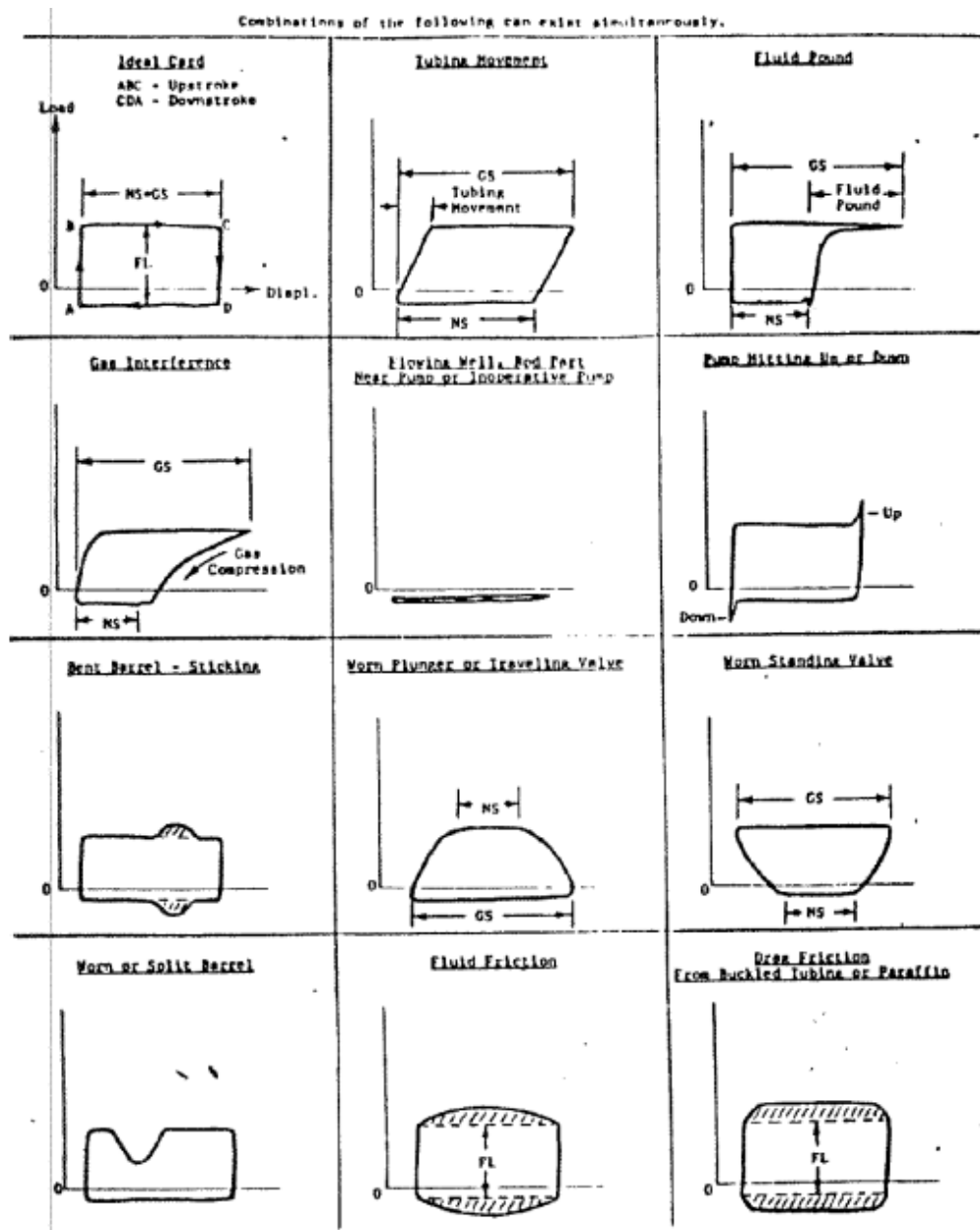
- **Dinagrama de Fondo**

El dinagrama de fondo es la representación grafica de Carga vs. Posición de la primera varilla por encima de la bomba y se obtiene por medio de la ecuación de onda que se aplica al dinagrama de superficie. Una vez aplicada la ecuación de onda de manera correcta al dinagrama de superficie, se elabora la carta dinamométrica de fondo de la bomba y se definen la carga sobre los tramos de la varilla.

## **ANÁLISIS DE DINAGRAMAS**

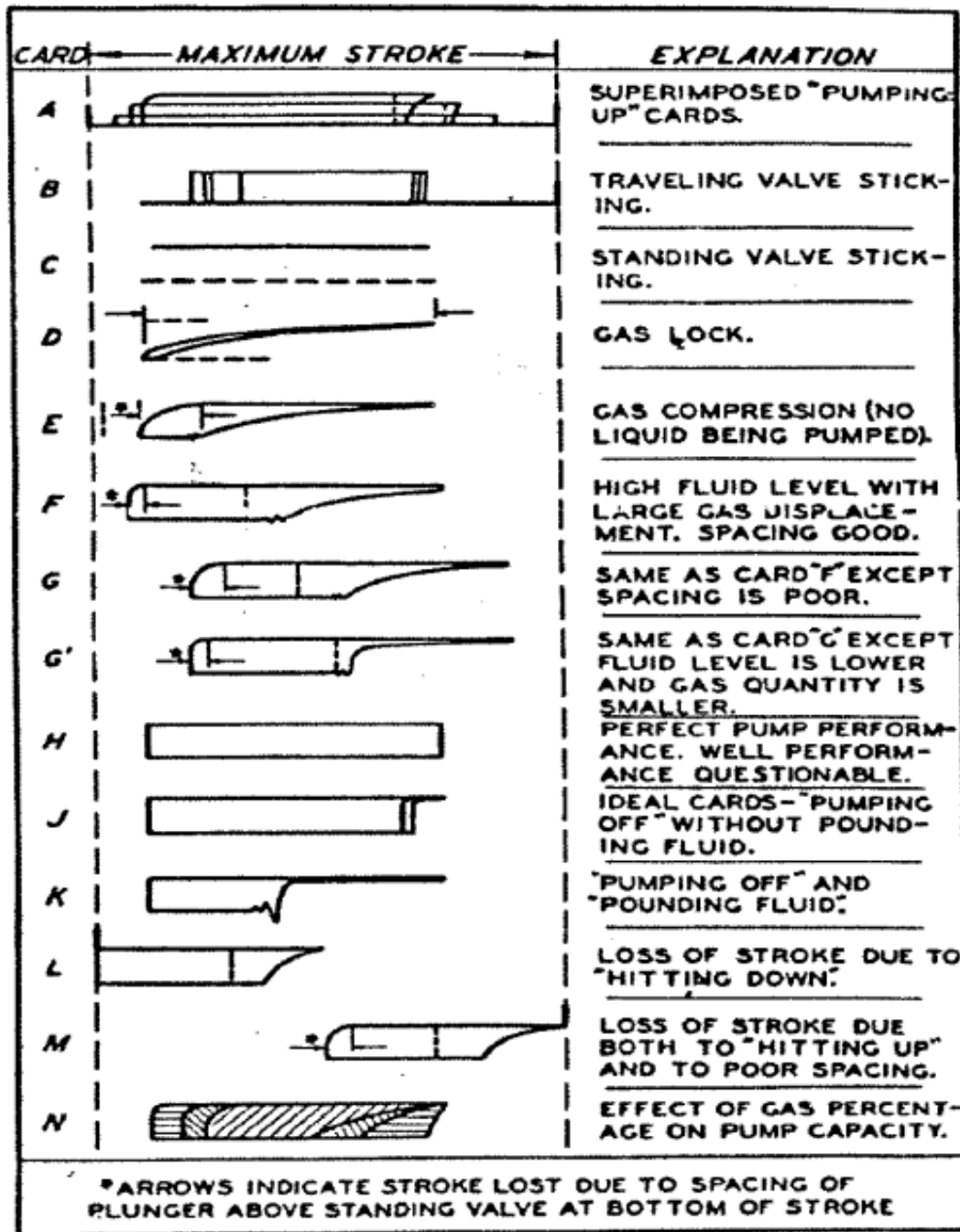
Para el análisis de los dinagramas de fondo se conocen unas cartas de fallas que permiten reconocer las diversas fallas presentes en el pozo. A continuación se muestran dos de estas cartas.

Figura 80. Patrones de las cartas dinamométricas de fondo según Gibbs&Nolen



Fuente:ALMEIDA, Manuel. Geração de carta dinamométrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Pág. 167

Figura 81. Patrones de las cartas dinamo-métricas de fondo según Gilbert



Fuente: ALMEIDA, Manuel. Geração de carta dinamo-métrica de fundo para diagnóstico do bombeio mecânico em poços de petróleo. Pág. 166

## Anexo C. DIAGRAMAS DE CASOS PARA REDUCIR PUNTOS

Figura 82. Esquema de la prueba lógica para determinar picos.

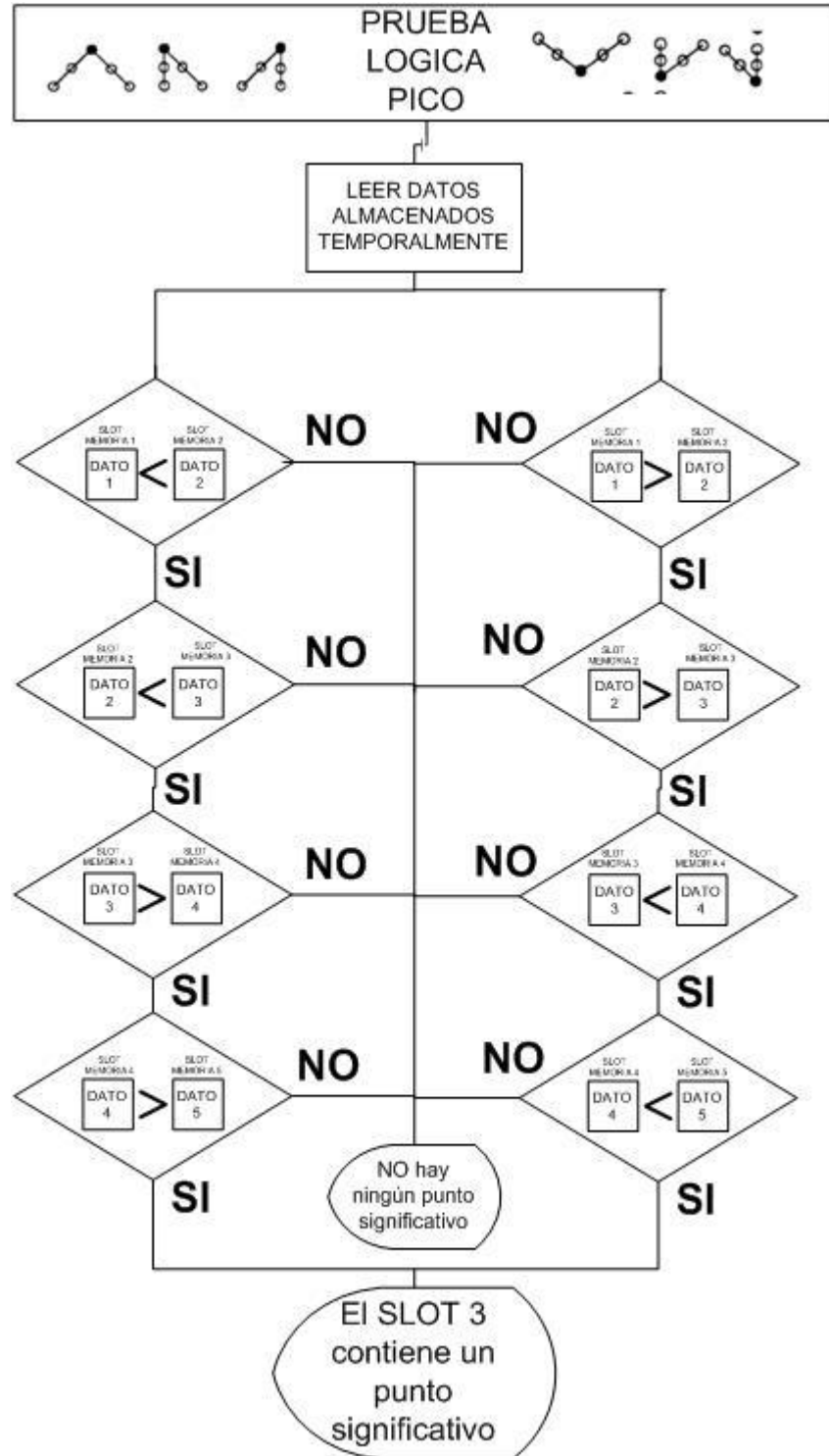


Figura 83. Esquema de la prueba lógica para determinar las crestas tipo A.

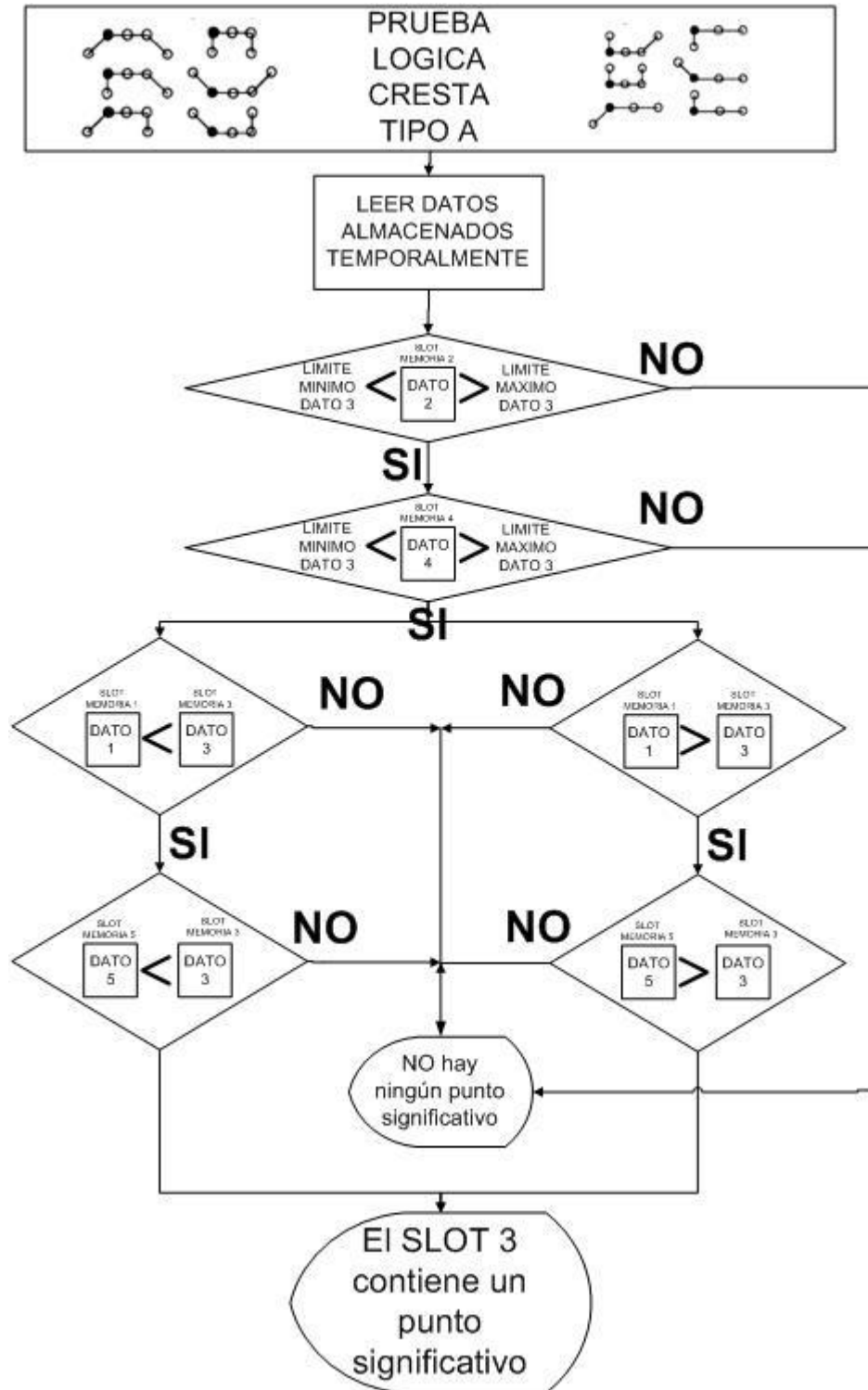


Figura 84. Esquema de la prueba lógica para determinar las crestas tipo B.

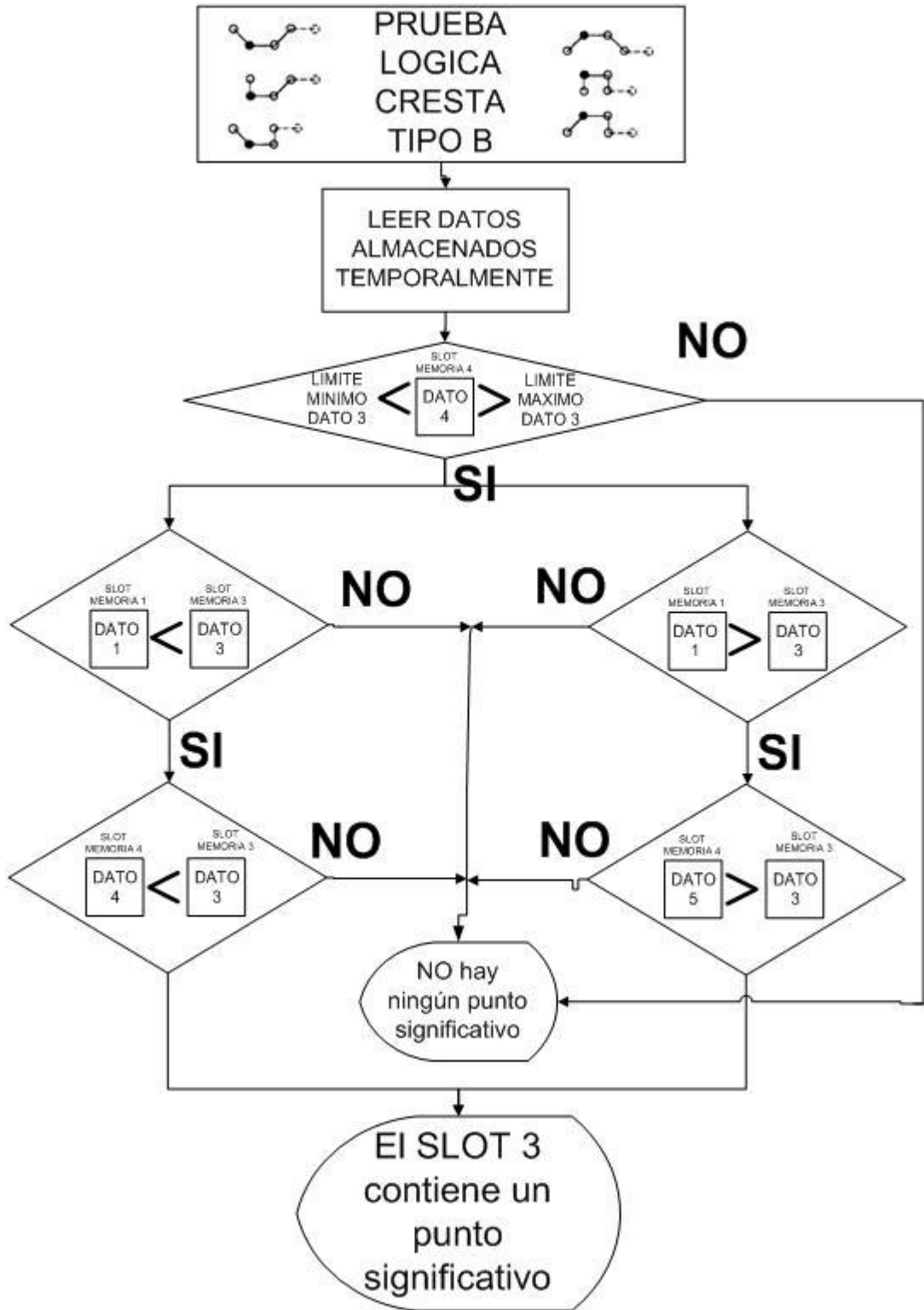
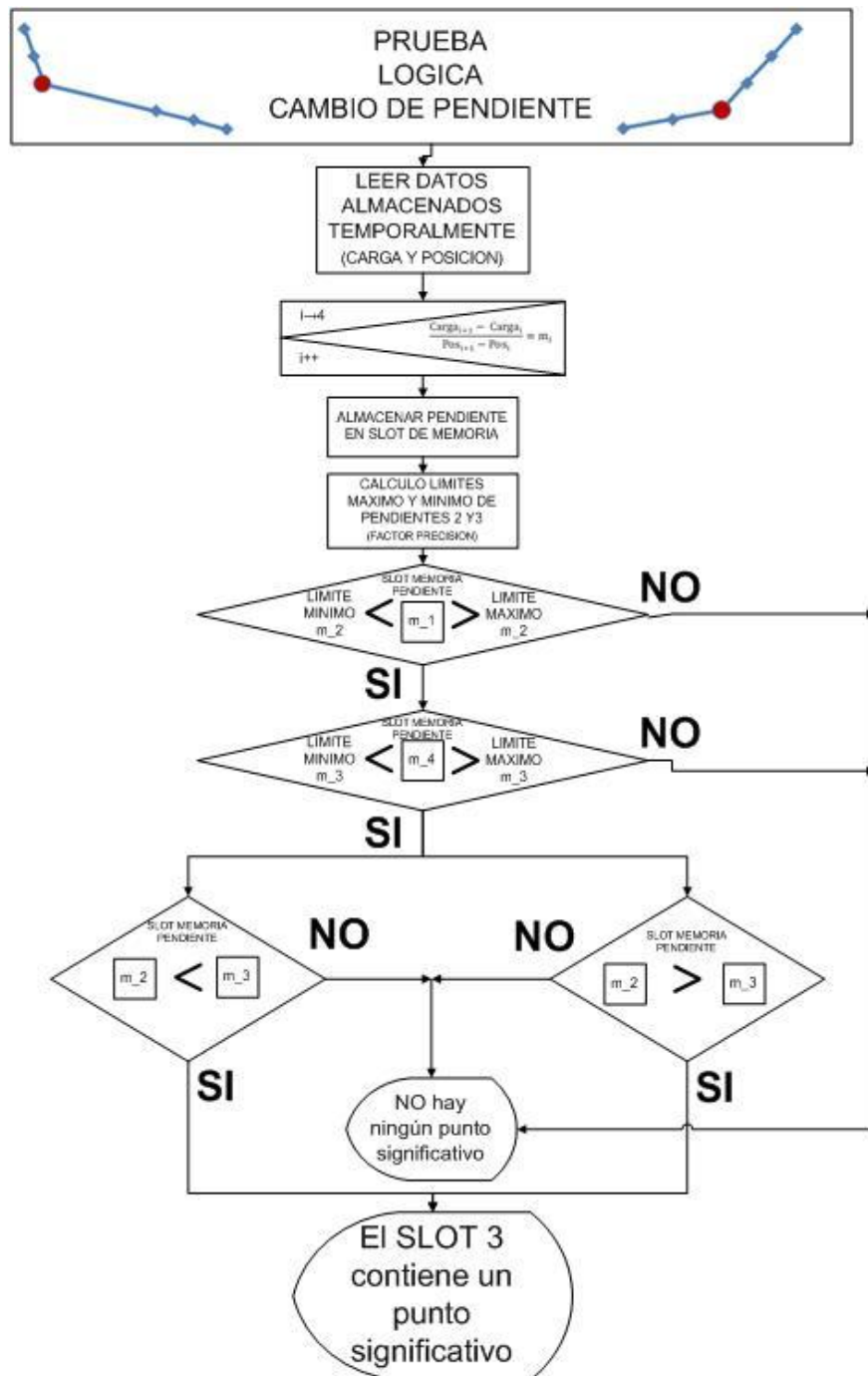


Figura 85. Esquema de la prueba lógica para determinar los cambios significativos de pendiente.



FACTOR DE PRECISION: Es un porcentaje que determina el rango de los límites inferiores y máximos. Se establecen definidos 4 de ellos. Entre menor sea el factor, el sistema reconoce menos puntos significativos.

# Anexo D. RESULTADOS ADICIONALES

## POSICION

Figura 86. Resultados adicionales posición PLC

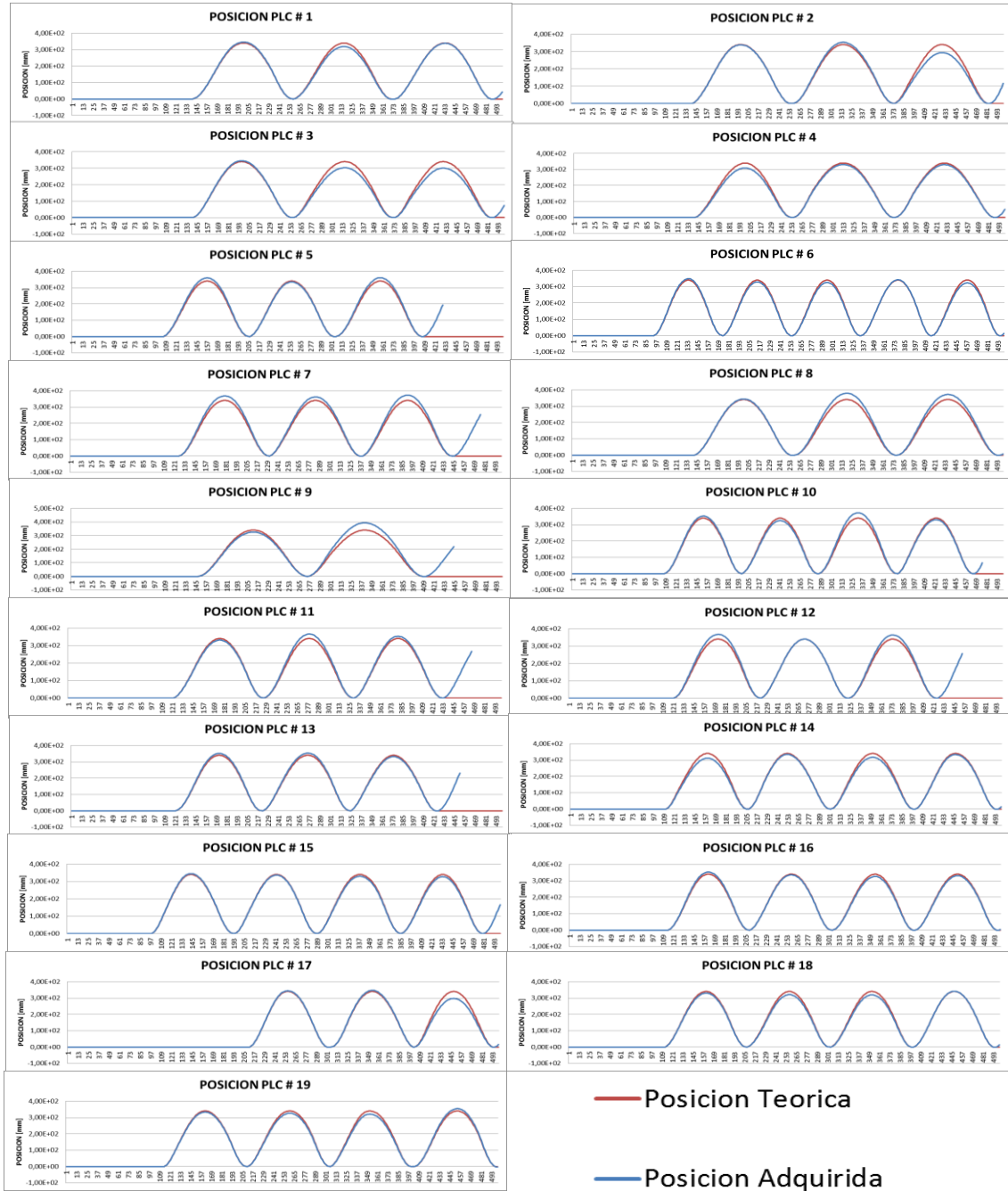
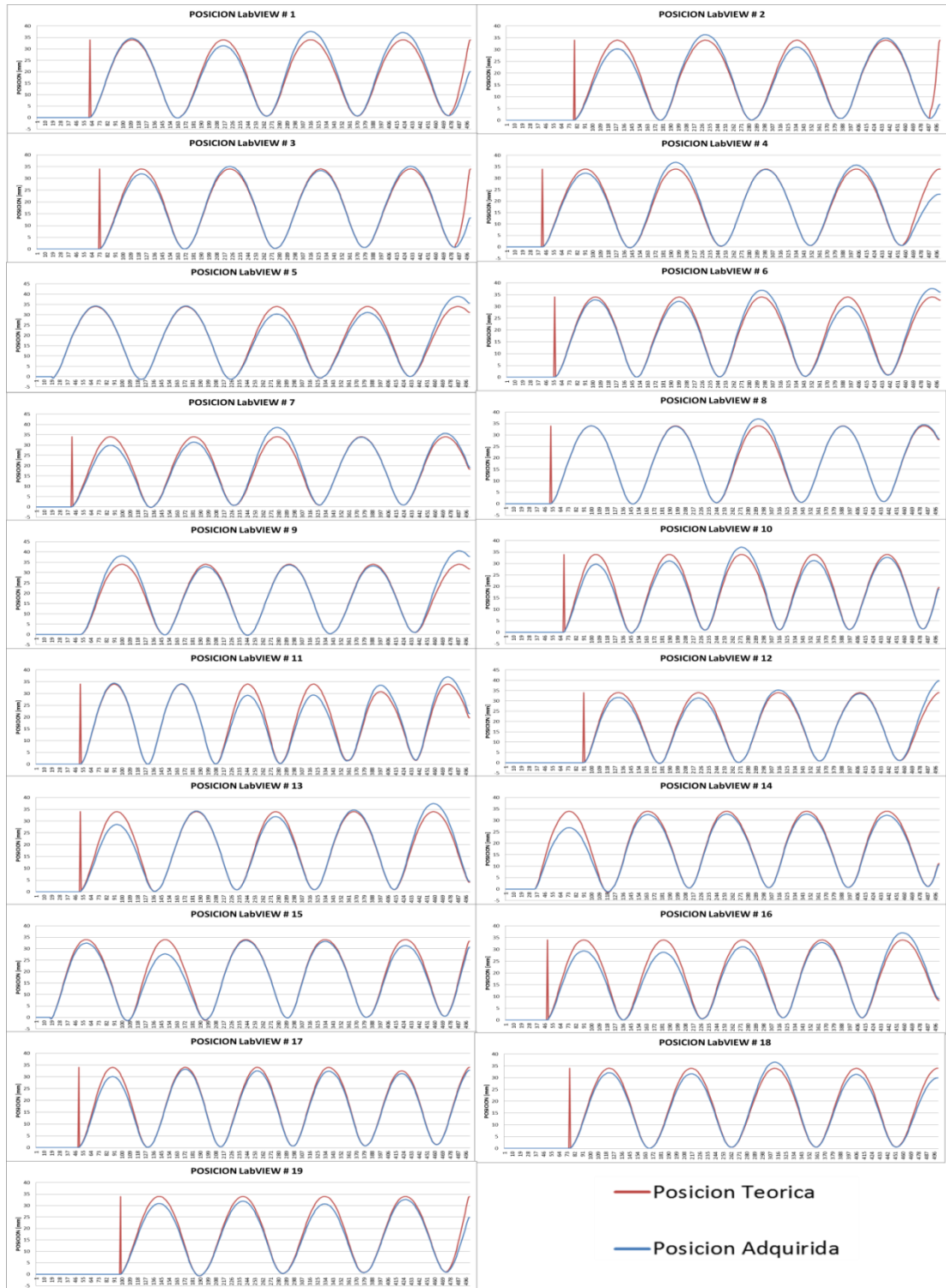


Figura 87. Resultados adicionales posición LabVIEW



# CARGA

Figura 88. Resultados adicionales carga PLC

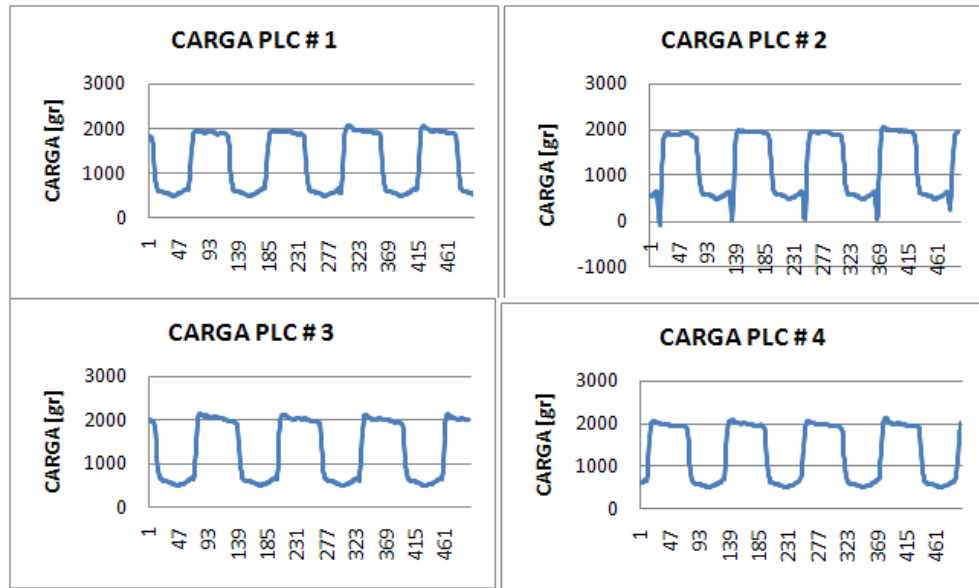
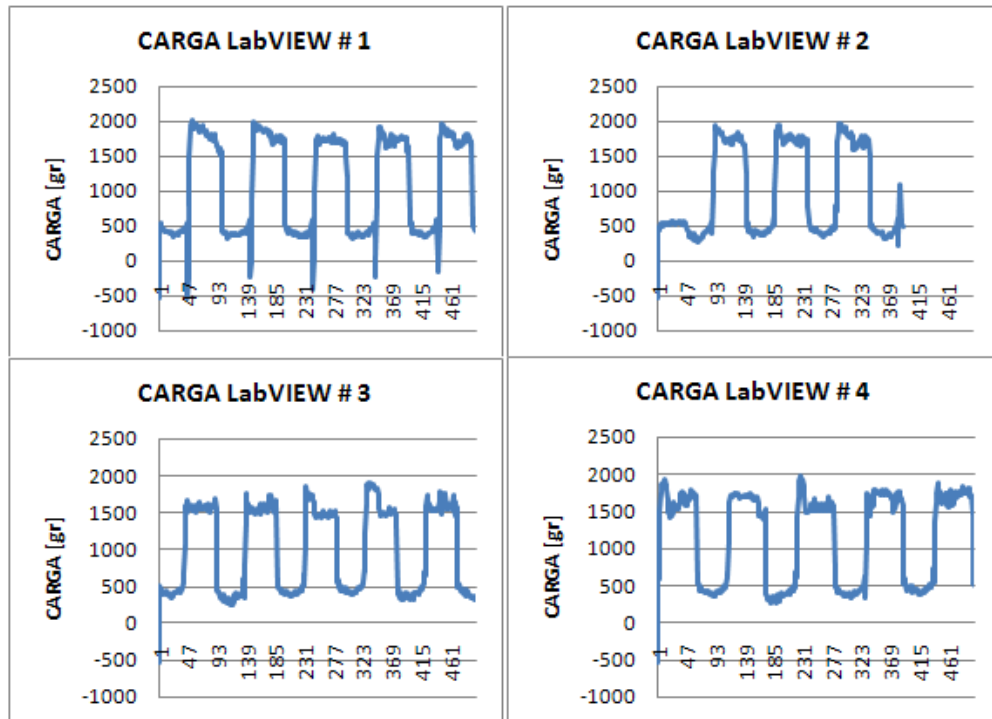


Figura 89. Resultados adicionales carga LabVIEW,



# DINAGRAMA SUPERFICIALES PLC

Figura 90. Resultados adicionales dinagrama PLC #1.

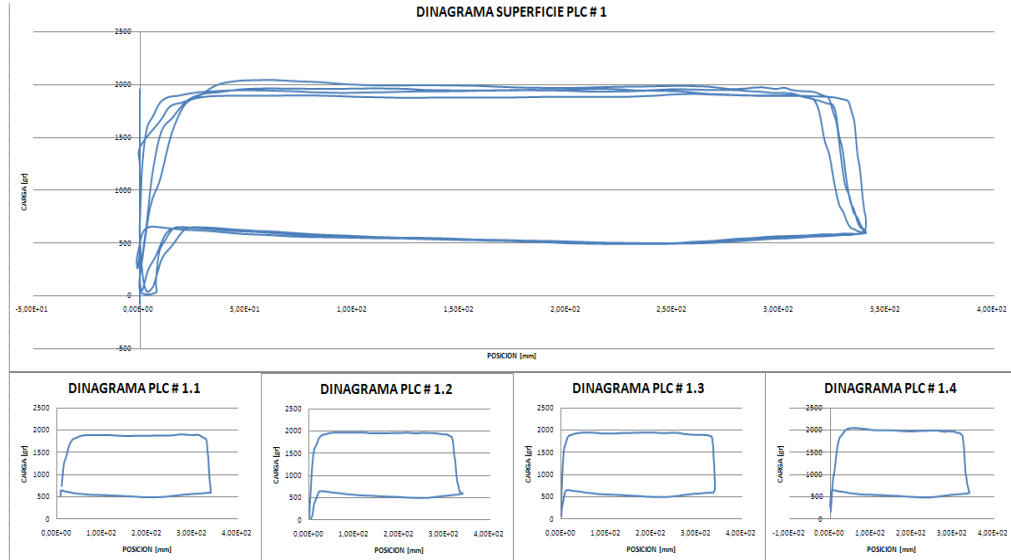


Figura 91. Resultados adicionales dinagrama PLC #2

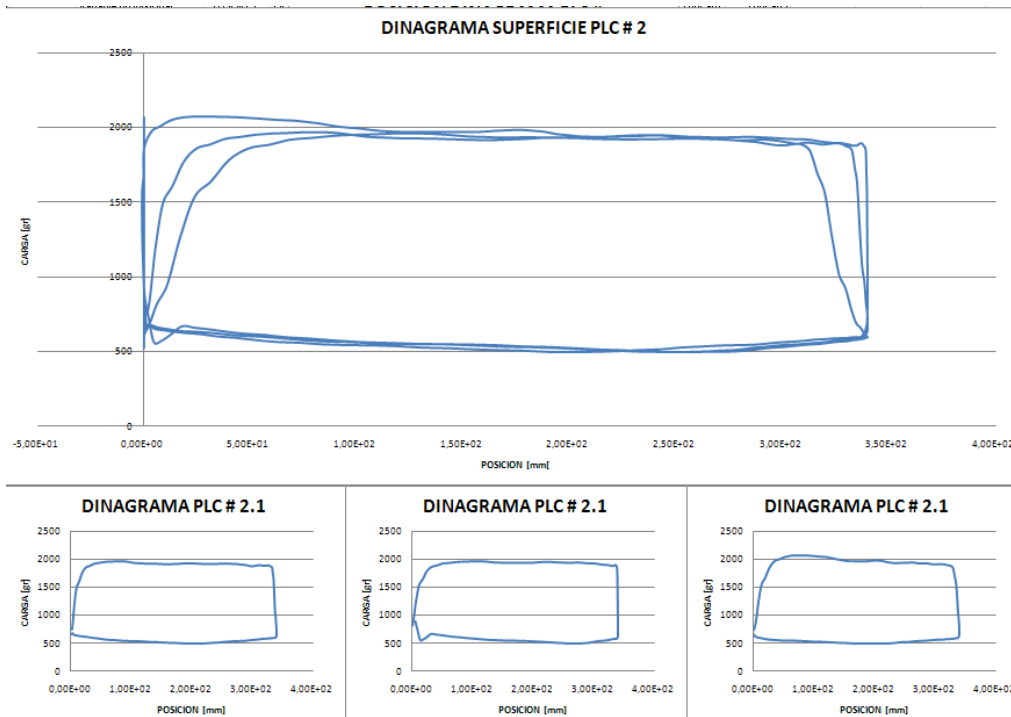
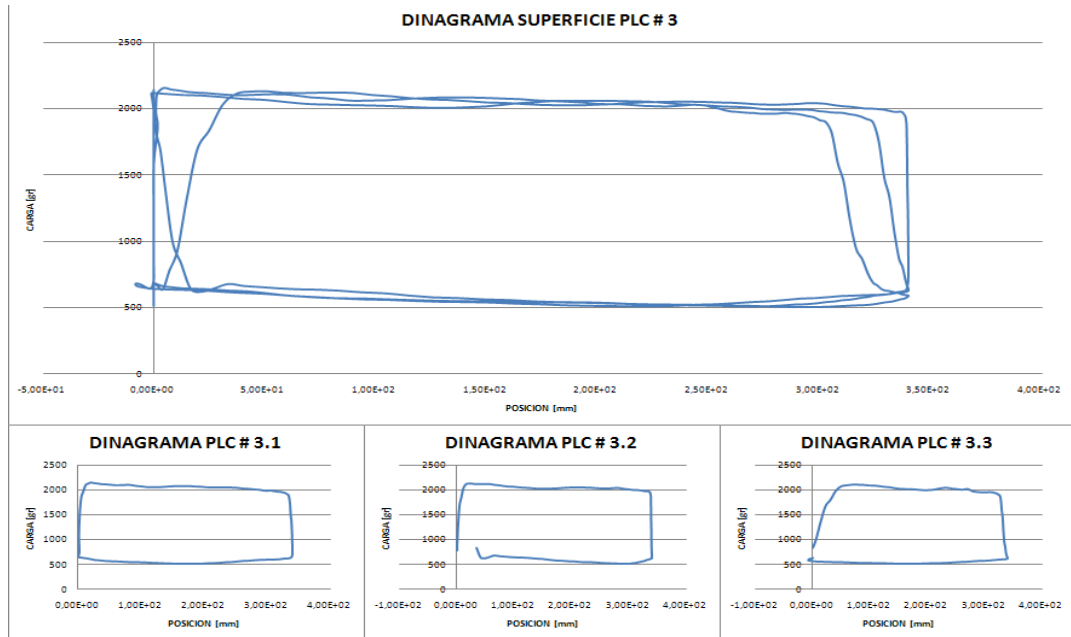


Figura 92. Resultados adicionales dinagrama PLC #3



## DINAGRAMAS SUPERFICIALES LabVIEW

Figura 93. Resultados adicionales dinagrama LabVIEW #1

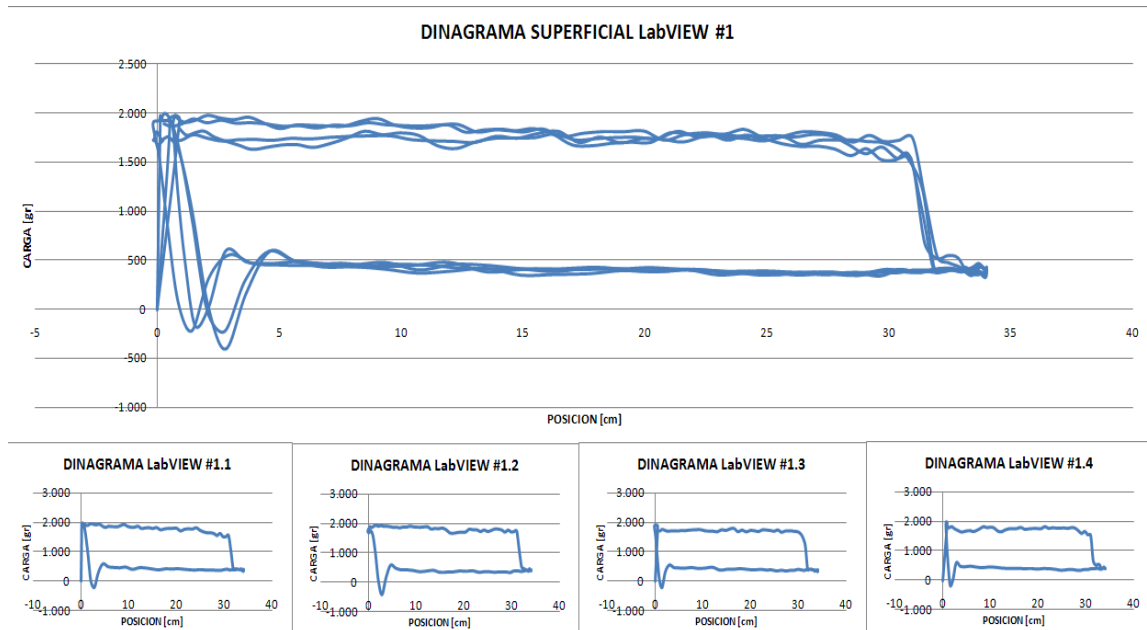


Figura 94. Resultados adicionales dinagrama LabVIEW #3

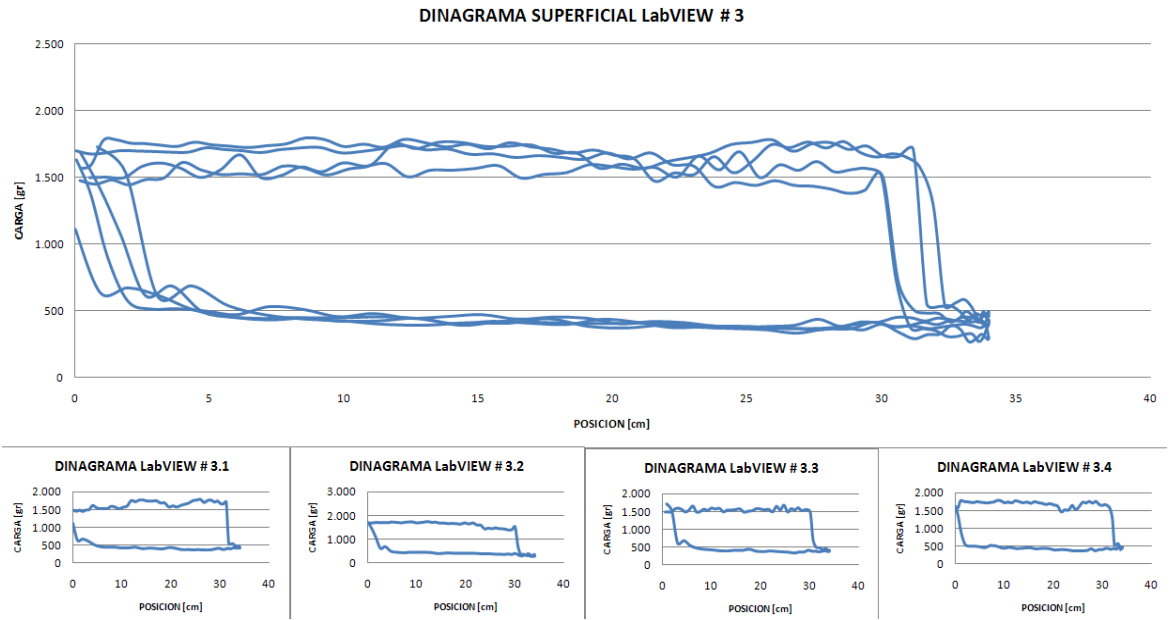
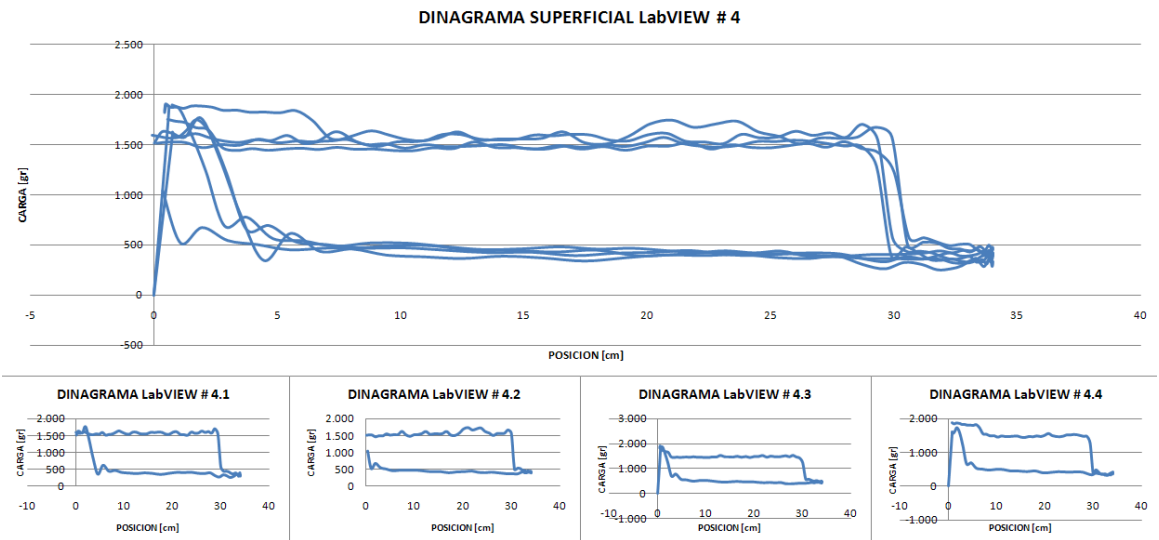
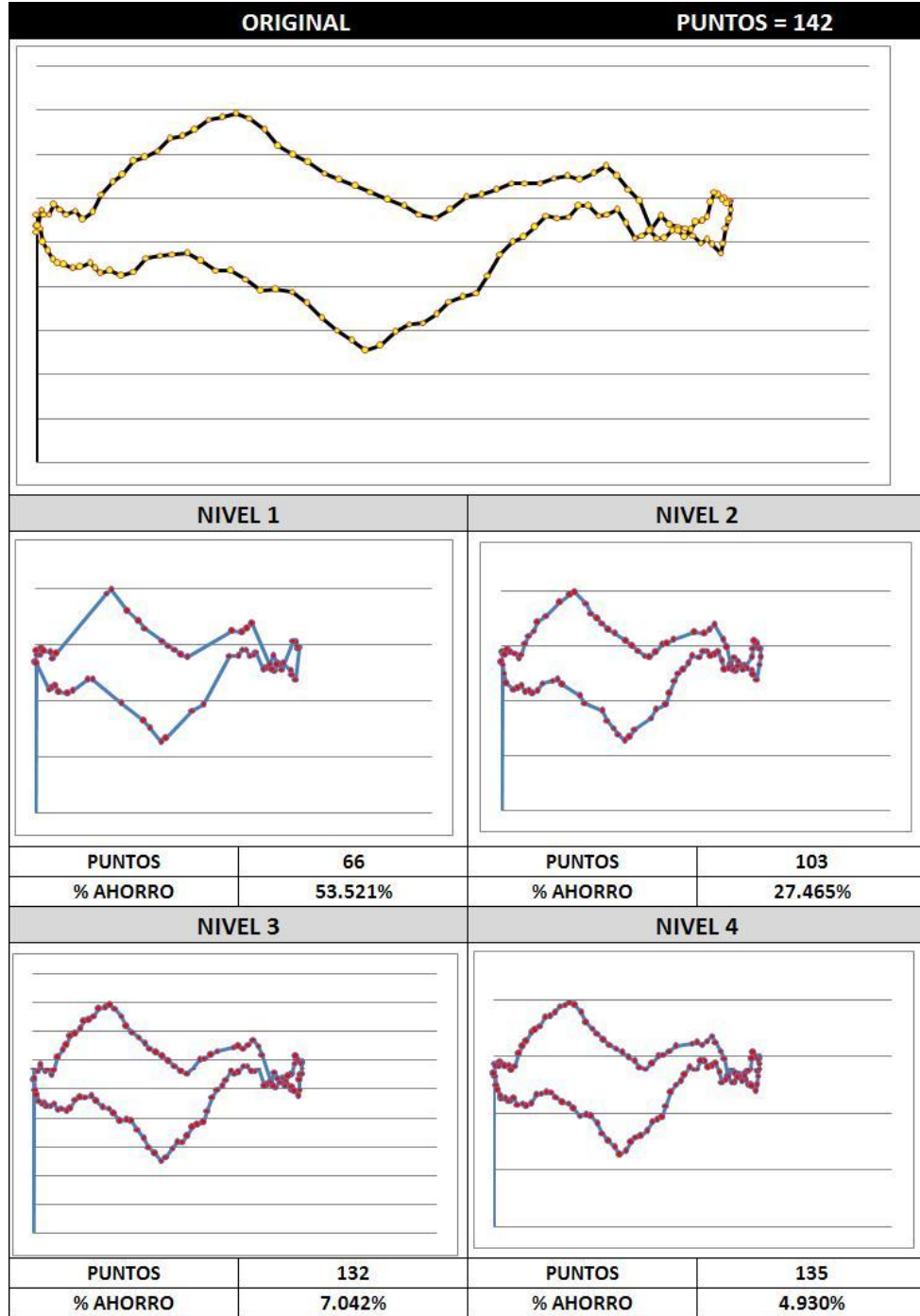


Figura 95. Resultados adicionales dinagrama LabVIEW #4



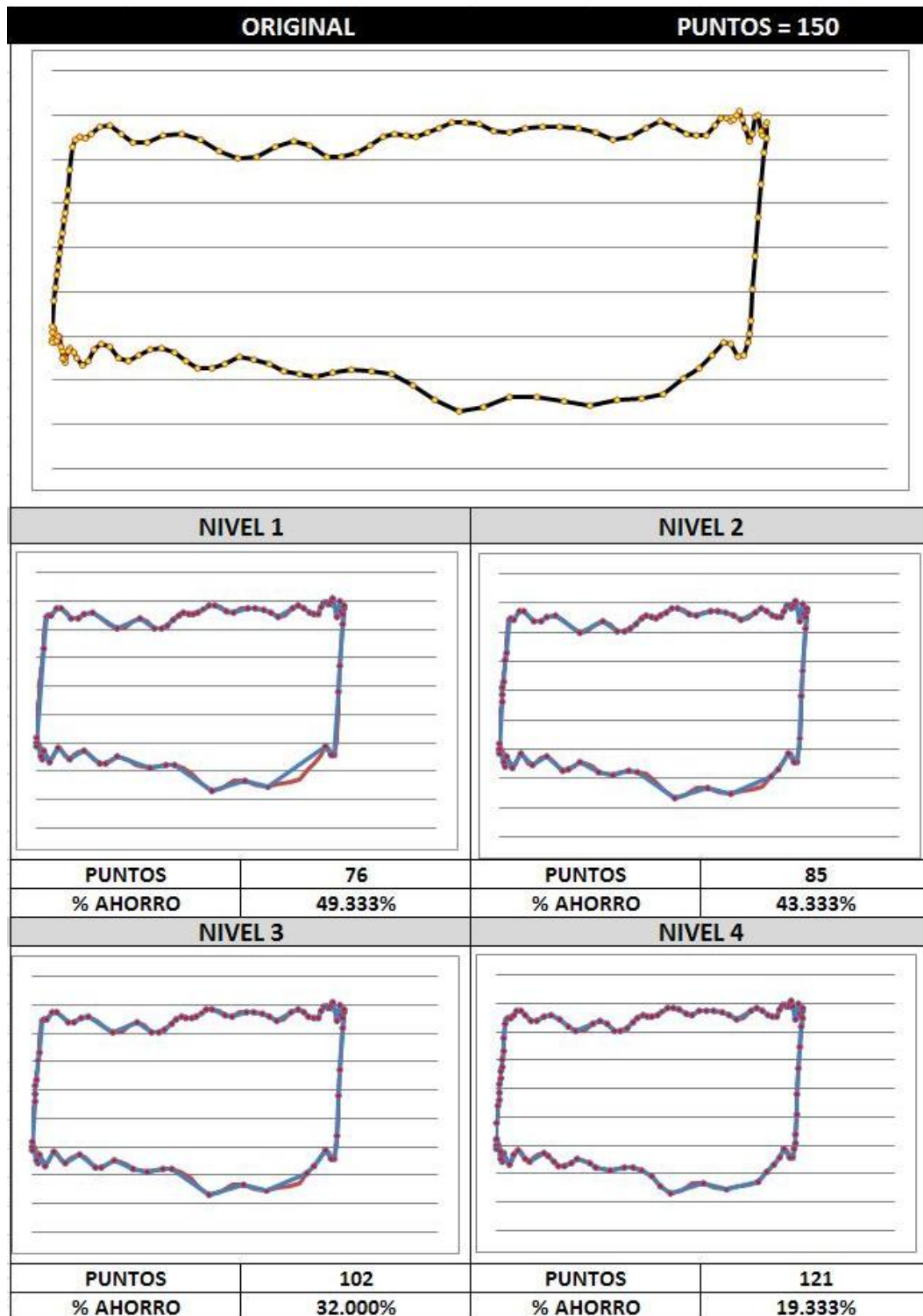
## REDUCCION DE PUNTOS

Figura 96. Resultado # 2 - Reducción de puntos de dinagrama obtenido del TWM.



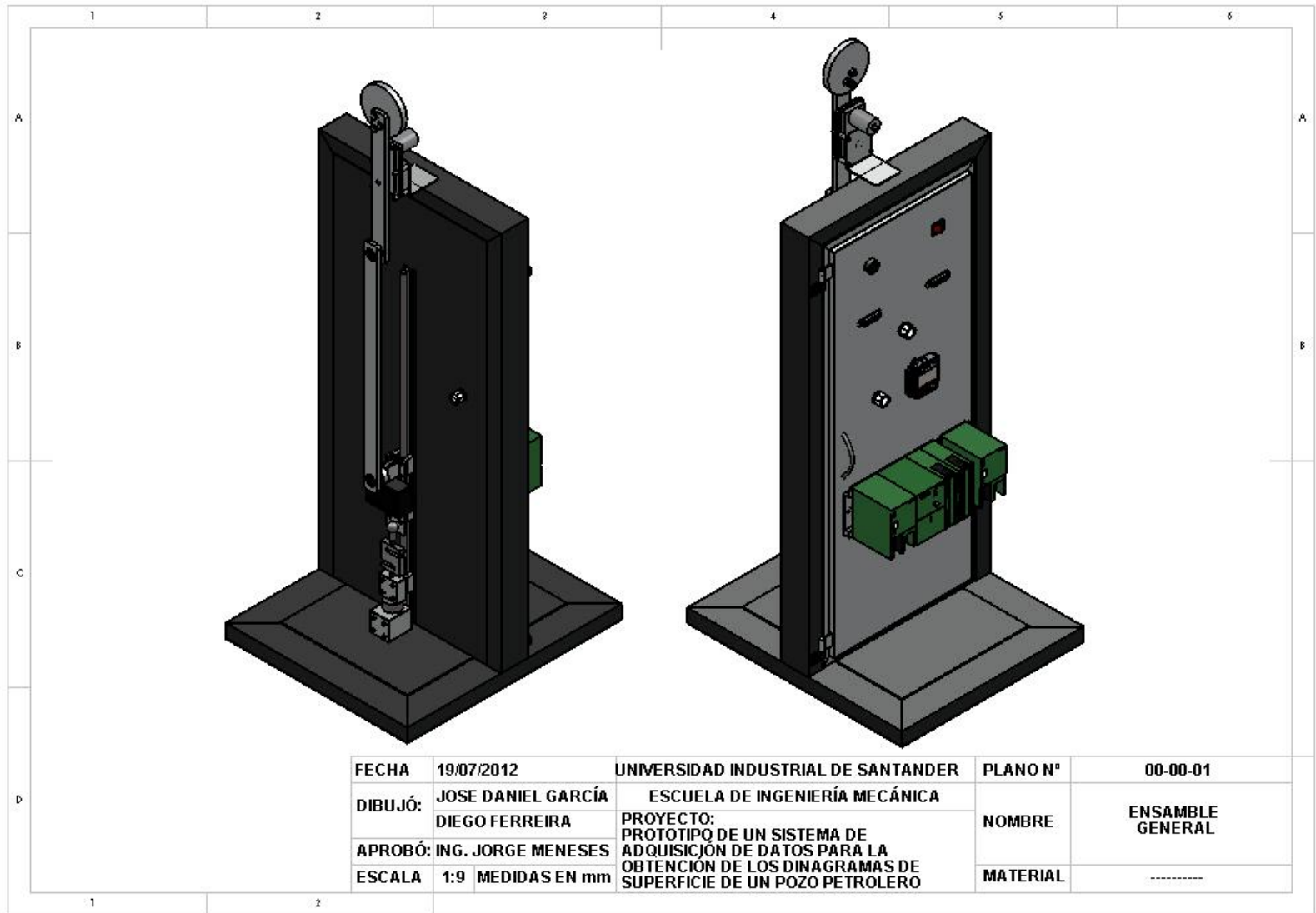
Fuente: Autores

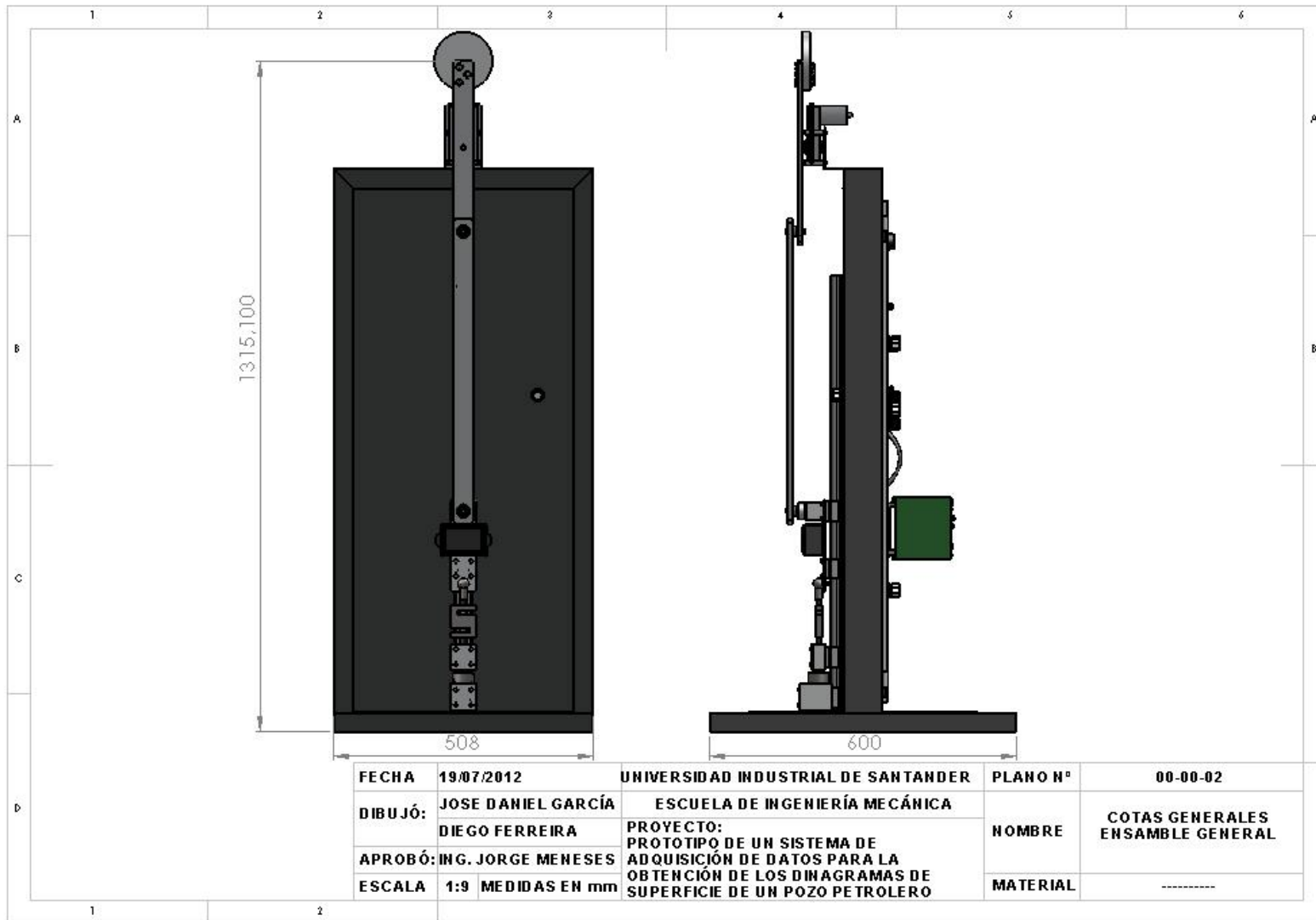
Figura 97. Resultado # 3 - Reducción de puntos de dinagrama obtenido del TWM.

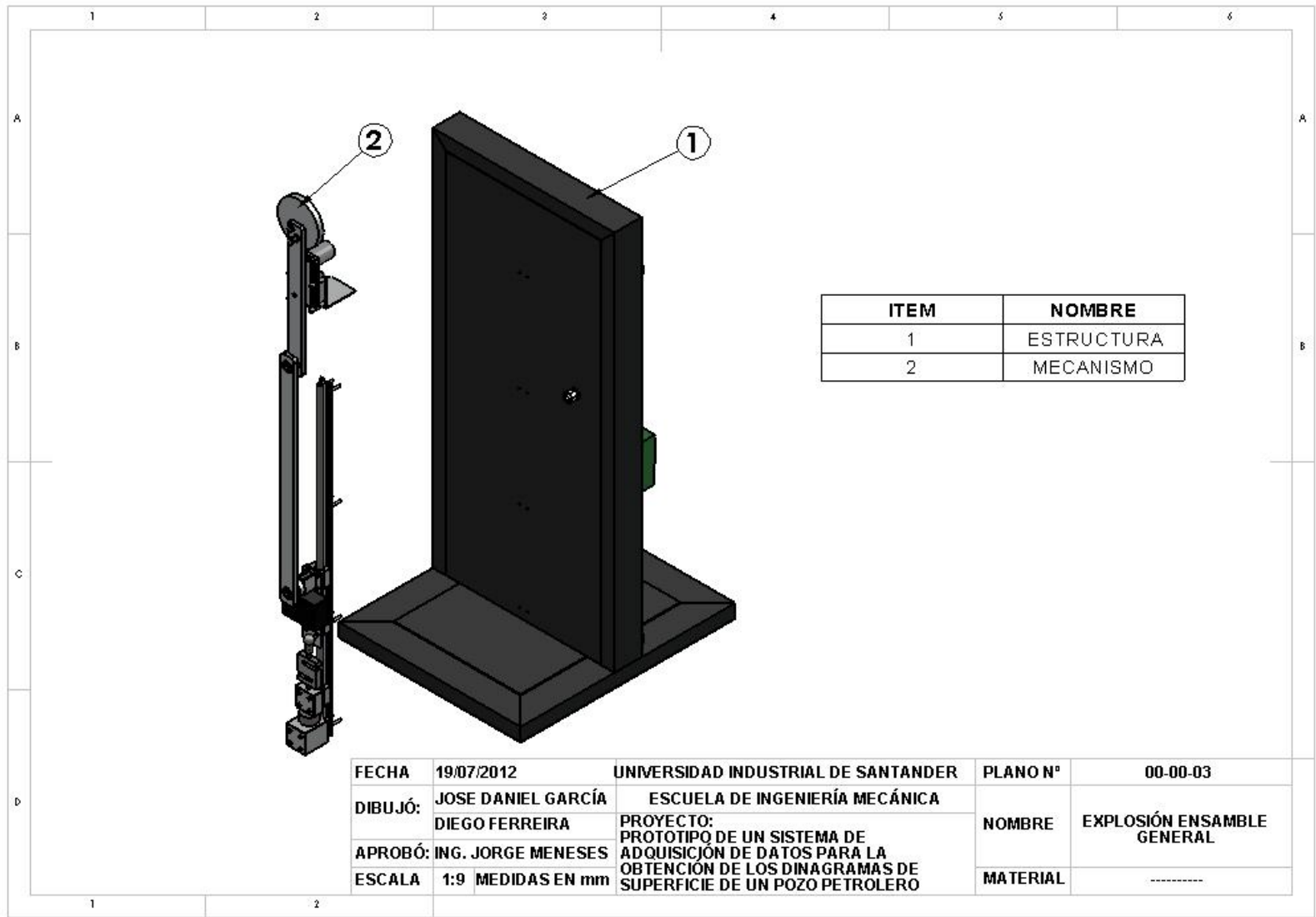


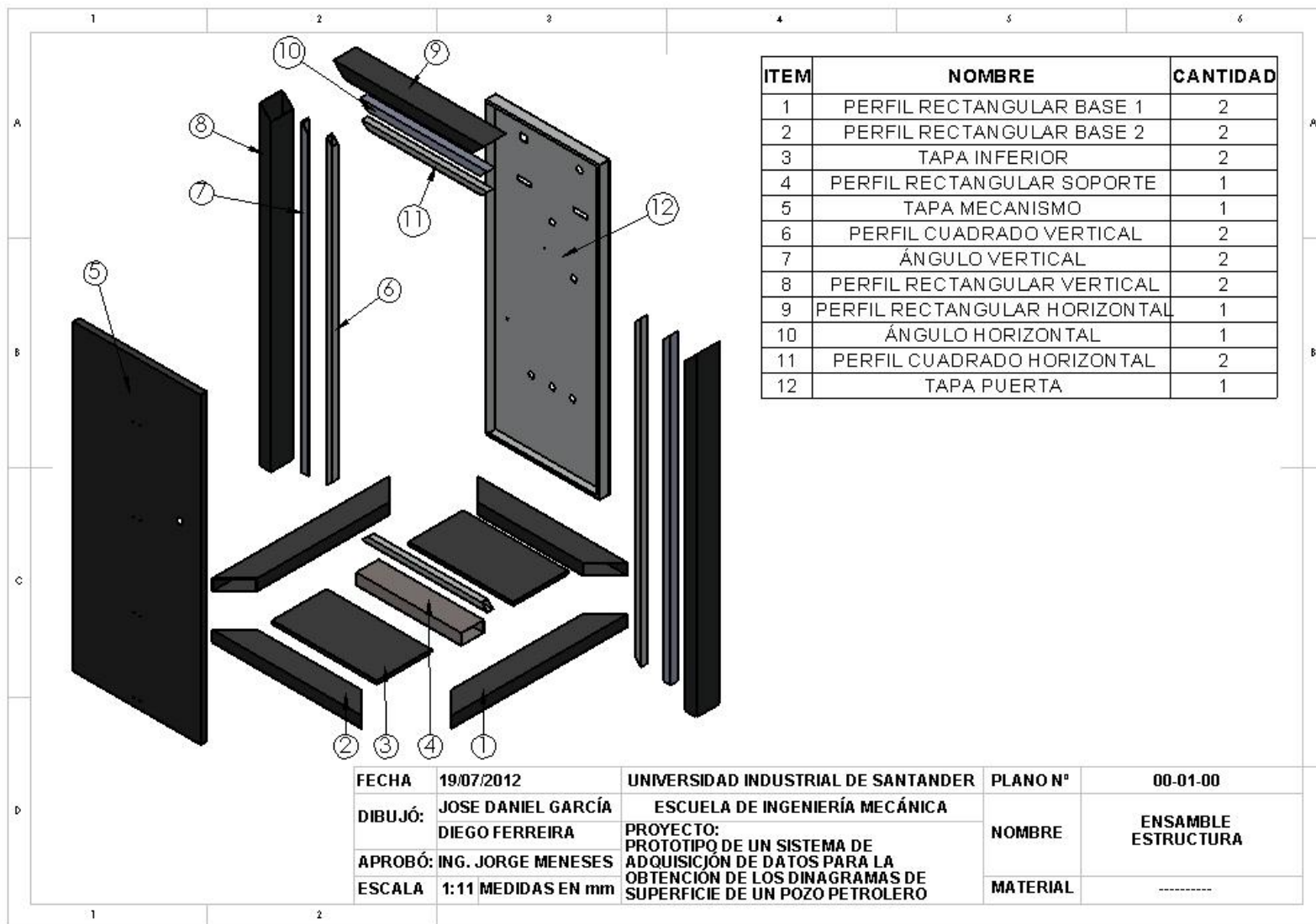
Fuente: Autores

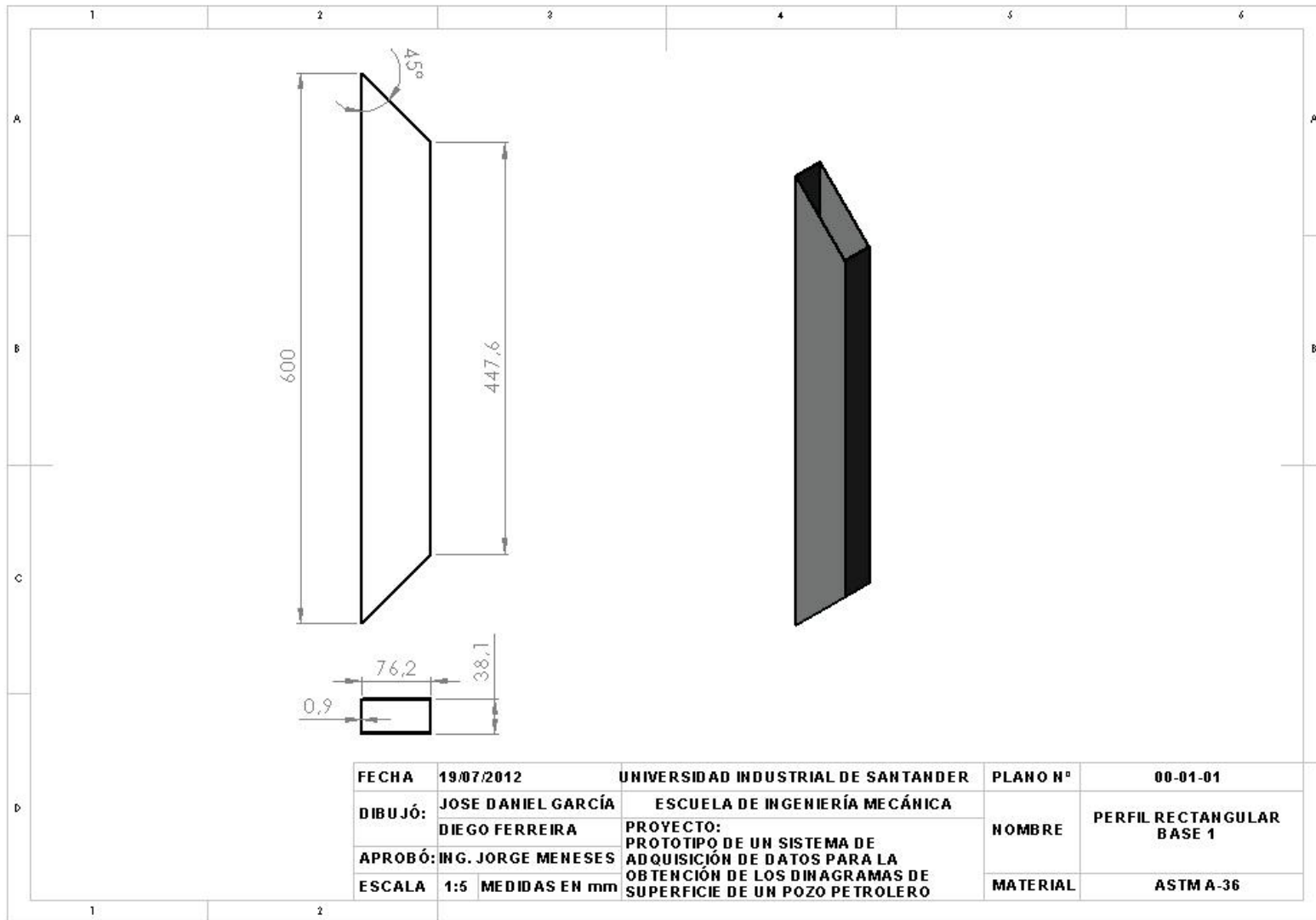
## **ANEXO E. PLANOS**

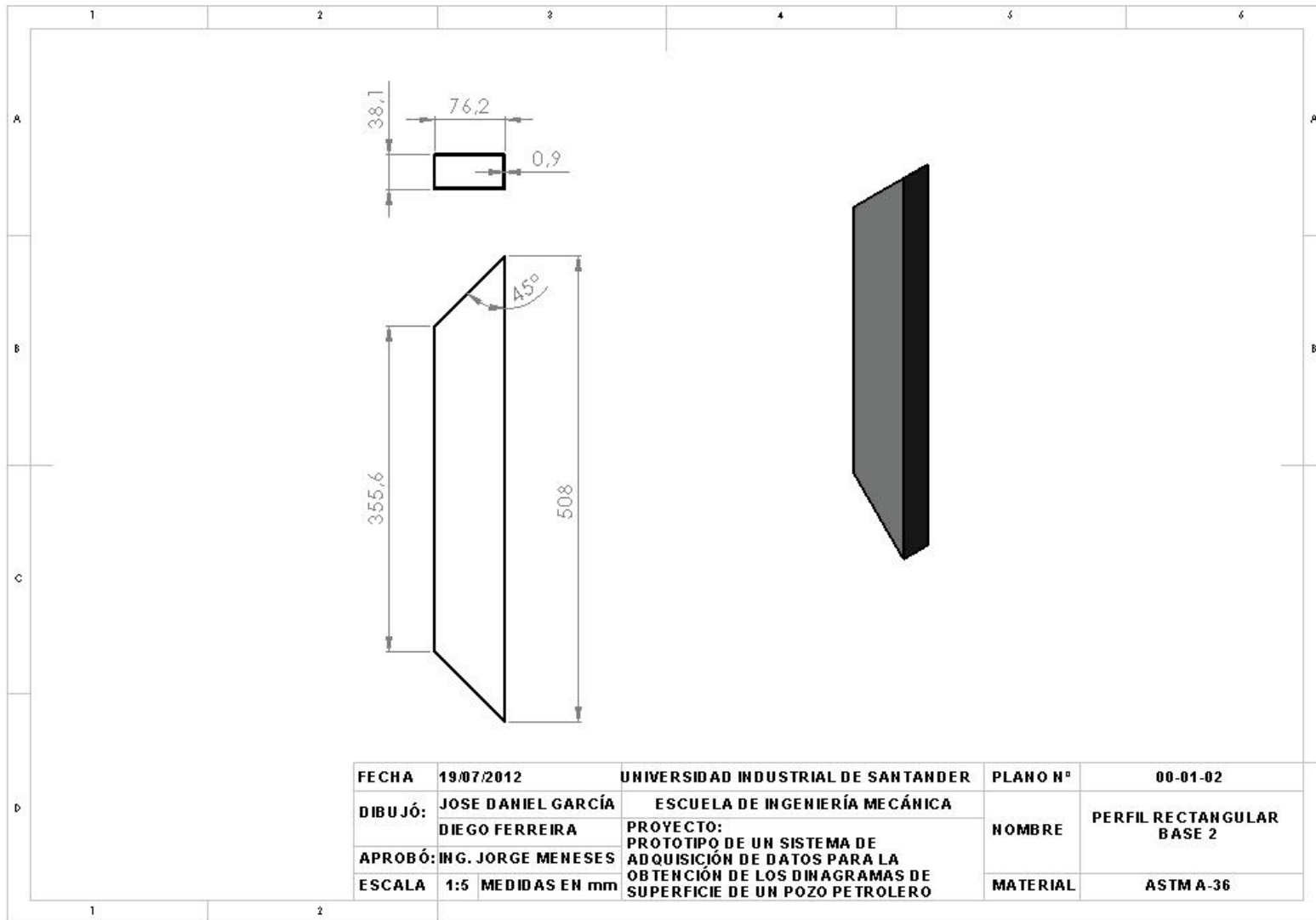


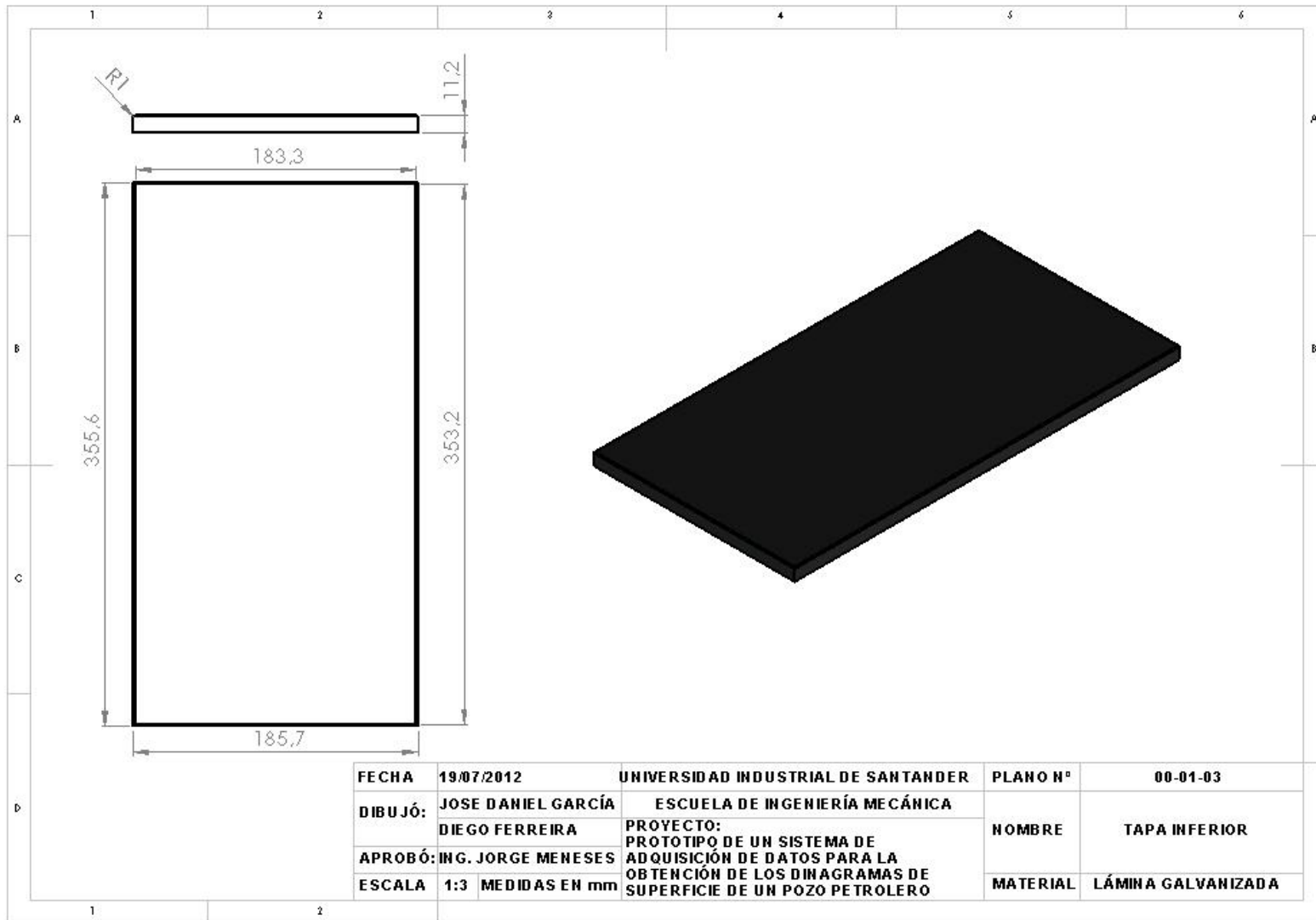


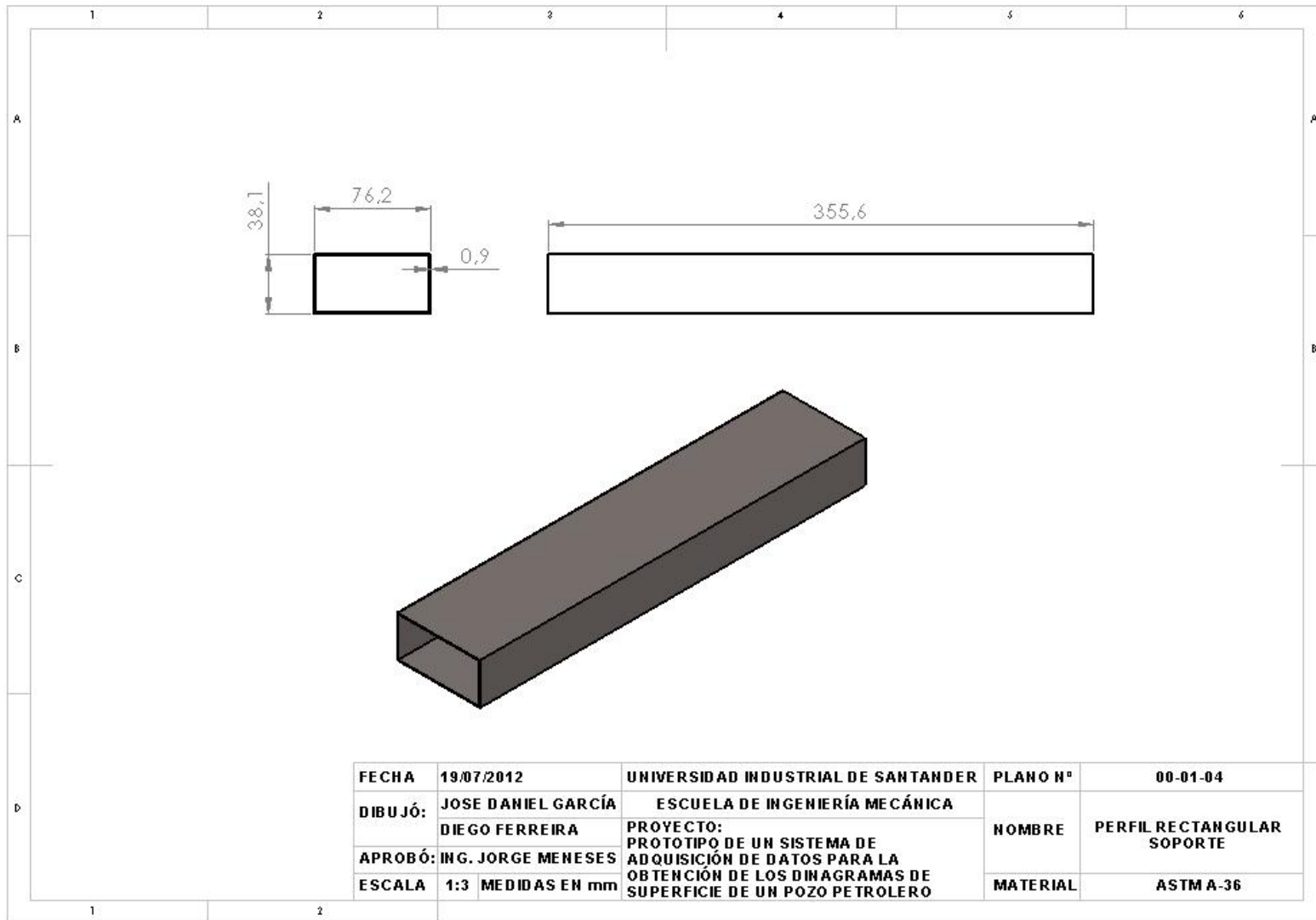




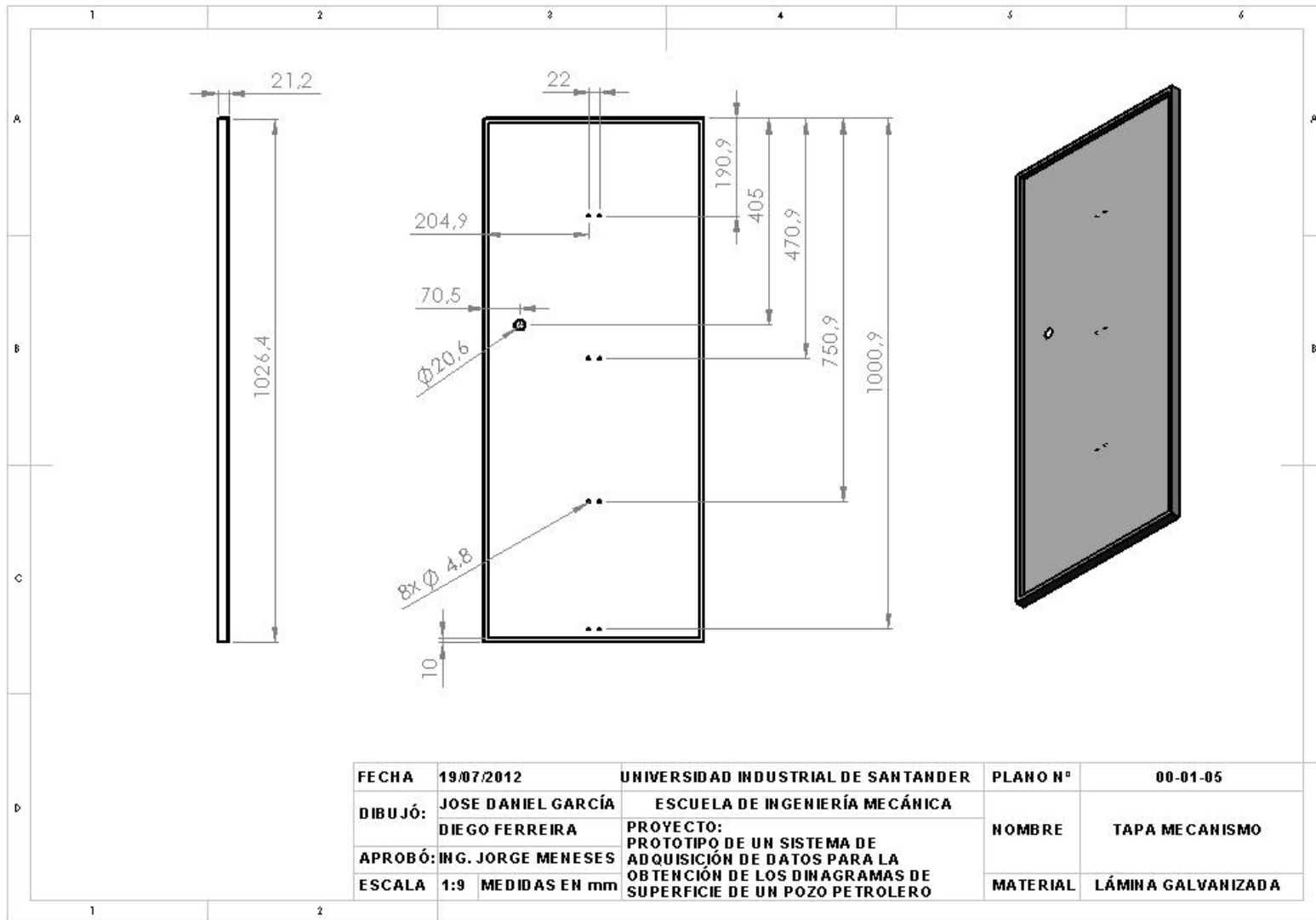


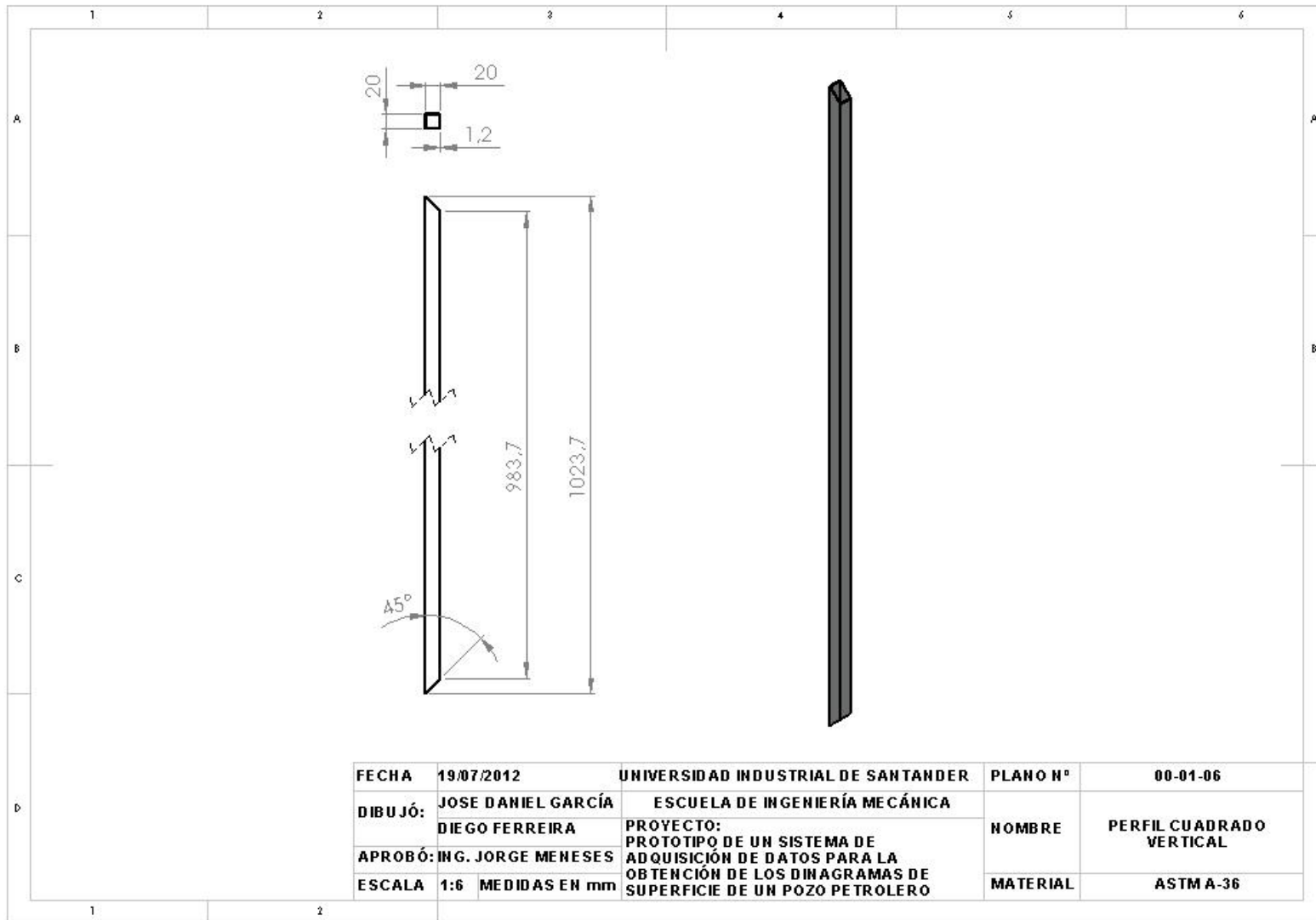






FECHA	19/07/2012	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	PLANO N°	00-01-04
DIBUJÓ:	JOSE DANIEL GARCÍA	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA	NOMBRE	PERFIL RECTANGULAR SOPORTE
	DIEGO FERREIRA	PROYECTO:		
APROBÓ:	ING. JORGE MENESES	PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DINAGRAMAS DE SUPERFICIE DE UN POZO PETROLERO	MATERIAL	ASTMA-36
ESCALA	1:3	MEDIDAS EN mm		





<b>FECHA</b>	<b>19/07/2012</b>	<b>UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER</b>	<b>PLANO N°</b>	<b>00-01-06</b>
<b>DIBUJÓ:</b>	<b>JOSE DANIEL GARCÍA</b>	<b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>PERFIL CUADRADO VERTICAL</b>
	<b>DIEGO FERREIRA</b>	<b>PROYECTO:</b>		
<b>APROBÓ:</b>	<b>ING. JORGE MENESES</b>	<b>PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DINAGRAMAS DE SUPERFICIE DE UN POZO PETROLERO</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>ASTM A-36</b>
<b>ESCALA</b>	<b>1:6</b>	<b>MEDIDAS EN mm</b>		

