

**AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE CALIBRACIÓN UNIVERSAL
DE CELDAS DE CARGA**

**JAIME DAVID ANGARITA SANTOS
JHON JAIRO NIÑO LEÓN**

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

2016

**AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE CALIBRACIÓN UNIVERSAL
DE CELDAS DE CARGA**

**JAIME DAVID ANGARITA SANTOS
JHON JAIRO NIÑO LEÓN**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ
Ingeniero Mecánico, Msc.**

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

2016

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	19
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	21
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	22
1.3.1 Objetivo general	22
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	23
1.5 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)	24
1.5.1 Requerimientos del consumidor	24
1.5.2 Matriz de calidad	25
1.6 PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	25
1.6.2 Alternativa 2. MCU con tarjeta de adquisición de datos programada con Control mediante Labview	30
1.6.3 Alternativa 3. MCU con tarjeta ARDUINO MEGA 2560	33
1.6.4 Evaluación de las alternativas	35
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA MCU	37
2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA MCU	39
2.2 COMPLEJIDAD	41
3. UNIDAD OPERATIVA	42
3.1 PAQUETE HIDRÁULICO	42
3.1.1 Tanque hidráulico	44
3.1.2 Bloque de control	45
3.1.3 Servo-válvula	47
3.1.4 Filtro de media presión	51
3.1.5 Filtro de retorno	53
3.1.6 Bomba	56

3.1.7 Motor	60
3.1.8 Manómetro	61
3.1.9 Válvula aisladora de manómetro	62
3.1.10 Mangueras	64
3.1.11 Aceite	67
3.2 ESTRUCTURA DE CALIBRACIÓN DE LA MCU	68
3.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DEL YUGO MOVIBLE	69
4. CELDA DE CARGA PATRÓN	70
4.1 ACCESORIOS DE ACOPLE CELDA DE CARGA PATRÓN	71
4.1.1 Bloque de apoyo de alineación	71
4.1.2 Botón de carga esférica	72
4.2 ENLACE CELDA DE CARGA-AUTÓMATA	75
4.2.1 Módulo de pesaje Siwarex U	76
4.2.4 Software Siwatool U	80
4.3 AJUSTE DE LA CELDA DE CARGA PATRÓN	80
4.3.1 Método de ajuste con peso patrón	81
4.3.3 Ajuste de la celda de carga patrón usando máquina universal de ensayos MTS 810	86
5. UNIDAD DE CONTROL	93
5.1 HARDWARE DEL CONTROLADOR	94
5.1.1 Módulo regulador de voltaje PS 307 5A	95
5.1.2 CPU 315F 2PN/DP V 2.6	95
5.1.3 Módulo de pesaje SIWAREX U	96
5.1.4 Módulo de salidas analógicas SM 332	96
5.1.5 Módulo de 16 entradas y 16 salidas digitales	97
5.2 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN EN LA MCU	98
5.2.1 STEP 7	98
5.2.2 Bloques de programación MCU	99
5.2.3 Bloque de función FB41 (CONT_C)	100
5.2.4 Interfaz humano máquina (HMI)	103

5.2.4.1 Modo control del Yugo	105
5.2.4.2 Modo control manual	107
5.2.4.3 Modo Calibración	109
5.2.5 Control de la MCU automatizada	111
5.2.5.1 Planificación de ganancias	112
5.2.5.2 Ajuste empírico del controlador usando Método de Ziegler-Nichols mejorado por Chien, Hrones y Reswick (CHR)	118
5.2.5.3 Ajuste de la MCU por el método Ziegler-Nichols mejorado CHR	121
6. CONCLUSIONES	124
7. RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFÍA	126

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Matriz QFD	25
Tabla 2. Matriz de ponderaciones para la evaluación de alternativas	36
Tabla 3. Características válvula aisladora de manómetro	64
Tabla 4. Conexión de los hilos de la celda en el Siwarex U	79
Tabla 5. Registro MTS vs CELDA FUTEK	87
Tabla 6. Datos para caracterización	89
Tabla 7. Diferencia de carga MTS y Futek	90
Tabla 8. Bloques de programación MCU	99
Tabla 9. Tabla de ajuste de los parámetros de un regulador PID	119

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Carga MTS vs CELDA FUTEK	88
Gráfico 2. Gráfica de caracterización	89
Gráfico 3. Diferencia de carga MTS y Futek	91
Gráfico 4. Comportamiento de la Kp	122
Gráfico 5. Comportamiento del Ti	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Máquina de Calibración Universal (MCU)	20
Figura 2. Control general de la MCU	26
Figura 3. Esquema del sistema de control en lazo cerrado	26
Figura 4. CPU 315F-2PN/DP	27
Figura 5. Modulo salidas analógicas	28
Figura 6. Autómata PLC S7-300	28
Figura 7. Entorno SIMATIC Step 7 V5.5	29
Figura 8. Entorno HMI Simatic WinCC Flexible	30
Figura 9. Sistema de control en lazo cerrado	30
Figura 10. Tarjeta de adquisición de datos	31
Figura 11. Entorno de programación en Labview	32
Figura 12. Sistema de control en lazo cerrado para ARDUINO	33
Figura 13. Tarjeta ARDUINO MEGA 2560	34
Figura 14. Entorno de programación en ARDUINO	35
Figura 15. Descripción de la MCU	37
Figura 16. Componentes MCU	38
Figura 17. Dimensiones MCU	41
Figura 18. Unidad Operativa MCU	42
Figura 19. Paquete hidráulico MCU	43
Figura 20. Detalle interno del tanque hidráulico	45
Figura 21. Bloque de control	46
Figura 22. Plano hidráulico del bloque de control	47
Figura 23. Servo-válvula proporcional MOOG	48
Figura 24. Descripción funcionamiento interno servo-válvula MOOG	49
Figura 25. Rango de operación de la servo-válvula	50
Figura 26. Electrónica de la servo-válvula	51
Figura 27. Filtro de media presión MAHLE	52

Figura 28. Filtro de retorno a tanque	54
Figura 29. Presión de trabajo del filtro de retorno a tanque	55
Figura 30. Información de referencia	56
Figura 31. Bomba kompass	57
Figura 32. Funcionamiento Bomba Engranajes	58
Figura 33. Alineación motor bomba con acople flexible	59
Figura 34. Despiece motor	60
Figura 35. Motor Siemens 7.5 HP	61
Figura 36. Símbolo hidráulico manómetro	62
Figura 37. Especificaciones manómetro kompass	63
Figura 38. Válvula aisladora de manómetro	63
Figura 39. Mangueras MCU	65
Figura 40. Clasificación aceites ISO industriales	67
Figura 41. Estructura de calibración MCU	68
Figura 42. Movimiento sistema de transmisión yugo superior	69
Figura 43. Celda de carga FUTEK LCF 550	70
Figura 44. Bloque de apoyo de alineación	72
Figura 45. Conector de alineación	73
Figura 46. Adaptador de alineación	74
Figura 47. Explosión del montaje de la celda de carga patrón	75
Figura 48. SIWAREX U	77
Figura 49. Requerimientos para enlace celda-autómata	77
Figura 50. Configuración del montaje Celda-Autómata	78
Figura 51. Conector frontal Siwarex U	79
Figura 52. Ventana de operación Siwatool U	80
Figura 53. Pasos iniciales de ajuste en entorno Siwatool U	82
Figura 54. Cargar parámetros de ajuste en entorno Siwatool U	83
Figura 55. Comando peso de ajuste cero	84
Figura 56. Comando ajuste peso patrón	84
Figura 57. Dígitos de ajuste y valor de peso para cálculo de línea característica	85

Figura 58. Montaje máquina de ensayos MTS-810	86
Figura 59. Modelo estructural del sistema de control	93
Figura 60. Componentes del autómata MCU	95
Figura 61. Entorno general de la programación MCU en STEP7	98
Figura 62. Bloque PID FB41	101
Figura 63. Lazo de control del FB41	102
Figura 64. HMI de la MCU	103
Figura 65. Modo control yugo	105
Figura 66. Modo control yugo ascendente	106
Figura 67. Modo control yugo ascendente	106
Figura 68. Modo control manual	107
Figura 69. Modo control manual ascendente	108
Figura 70. Modo control manual descendente	109
Figura 71. Modo calibración	109
Figura 72. Modo calibración DIRECTO	110
Figura 73. Modo calibración DIRECTO	111
Figura 74. Recopilación de datos	114
Figura 75. Planta lazo abierto	115
Figura 76. Función ident del software MatLab	115
Figura 77. Simulación control lazo cerrado vs control lazo abierto MCU con set point de 50000 lbf	116
Figura 78. Comportamiento control lazo abierto vs lazo cerrado MCU con set point de 50000 lbf	117
Figura 79. Obtención de las constantes proporcional e integral	118
Figura 80. Criterio de optimización del método CHR sin sobre-oscilación	119
Figura 81. Ejemplo de parámetros de ajuste empírico	121

RESUMEN

Título: AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE CALIBRACIÓN UNIVERSAL DE CELDAS DE CARGA*

Autores: ANGARITA SANTOS, Jaime David
NIÑO LEÓN, Jhon Jairo**

Palabras clave:

Celda de carga, Automatización, PLC, unidad hidráulica,

Descripción

Actualmente la industria requiere profesionales altamente eficientes y productivos que contribuyan con nuevas ideas para el mejoramiento de la calidad de vida. En busca del propósito de ayudar al desarrollo de nuevas ideas se necesita crear un producto que cumpla con los requerimientos exigidos a plena cabalidad dando un significativo aporte a un proyecto de gran envergadura, pozo inteligente, el cual busca obtener información de calidad que permita su manipulación para la optimización de la producción de crudo. Para esto se diseña la adecuación hidráulica y la automatización de una MAQUINA DE CALIBRACIÓN UNIVERSAL DE CELDAS DE CARGA, la cual permite realizar monitoreo a voluntad de los sensores utilizados en CAMPO ESCUELA COLORADO dando a conocer el estado de vida de los mismos y permitir su reacondicionamiento para prolongar su ciclo útil. Para facilitar la utilización de la máquina y hacerla más amigable al operario se realiza el diseño y acondicionamiento de una interfaz humano-máquina (HMI), aportando flexibilidad con tres modos de operación y brindando la posibilidad de realizar dos tipos de calibración (directa y escalonada), además la MCU cuenta con un sistema de recolección de datos que facilita llevar un buen historial de trabajo de los sensores a calibrar. Finalmente para la seguridad del hardware elegido para llevar el proyecto a cabalidad se dota la máquina de un banco de pruebas que lo protege de cualquier tipo de contacto con terceros e incluso del deterioro por parte de las condiciones ambientales, dicho banco se diseñó de la manera más compacta posible y es alimentado por una fuente de energía trifásica.

* Proyecto de Grado.

** Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas UIS. Director: Jorge Enrique Meneses Flórez.

ABSTRACT

Title: AUTOMATION OF A UNIVERSAL LOAD CELL CALIBRATION MACHINE*

Authors: ANGARITA SANTOS, Jaime David
NIÑO LEÓN, Jhon Jairo**

Keywords: Load Cell, Automation, PLC, Hydraulic unit

Description

Currently the industry requires highly efficient and productive professionals who contribute with new ideas for the improvement of the quality of life. In order to help the development of new ideas, it is necessary to create a product that fulfills the requirements demanded in full, giving a significant contribution to a large project, intelligent well, which seeks to obtain quality information that allows manipulation for the optimization of crude oil production. For this, it's designed the hydraulic adaptation and automation of a UNIVERSAL CALIBRATION MACHINE OF LOAD CELLS, which allows to carry out monitoring at the will of the sensors used in CAMPO ESCUELA COLORADO giving to know their state of life and allow their reconditioning to extend their useful life. To facilitate the use of the machine and make it more user-friendly, the design and conditioning of a human-machine interface (HMI) is provided, contributing flexibility with three modes of operation and offering the possibility of performing with two types of calibration (direct and stepwise), In addition the MCU has a data collection system that facilitates a good working history of the sensors to be calibrated. Finally, for the safety of the hardware chosen to take the project to full, the machine is provided with a test bench that protects it from any type of contact with third parties and even from deterioration due to environmental conditions, that bench was designed in the way as compact as possible and is powered by a three-phase power source.

* Degree Project.

** Mechanical Engineering School, Faculty Engineerings Physical-Mechanics UIS. Director: Jorge Enrique Meneses Flórez.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander se ha destacado por formar profesionales con amplio conocimiento y alto nivel de competencia para la industria.

Conscientes de las tendencias actuales de competitividad, de globalización y del avance exponencial de la tecnología, actualmente se requieren profesionales con conocimiento no solo del campo mecánico, sino también, del campo de automatización industrial, lo cual ha traído a la industria enormes beneficios en cuanto a eficiencia, producción, economía, etc. haciendo que cada día sea más común hacer uso de ella en cualquier ámbito industrial.

Por otra parte, con un proyecto de la magnitud que tiene el desarrollo de un prototipo de pozo inteligente para Campo Escuela Colorado – FASE 1 – 8586 – Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander y en conjunto con Campo Escuela Colorado, surge la necesidad de utilizar celdas de carga basadas en galgas extensiométricas, usadas en el sistema de medición y adquisición de datos de carga, lo cual es útil para poder mantener el control sobre los diferentes comportamientos del pozo petrolero.

Es por eso que se crea la necesidad de contar con una máquina que preste el servicio de calibración para dichas celdas. Ahora, retomando un anterior trabajo de grado donde se hizo un prototipo de chasis para la puesta en marcha de una unidad de calibración por medio de estudios de tensión y compresión; se decidió continuar dándole vida a lo que alguna vez fue un sueño y hacer el diseño hidráulico y la automatización de la unidad de calibración de la máquina, para que de esta manera se logre tener un campo más preciso y más eficiente tomando la ayuda de las

herramientas que como ingenieros mecánicos de la universidad industrial de Santander sabemos explotar.

Por lo cual se realizó un arduo trabajo de investigación, diseño y construcción titulado “AUTOMATIZACIÓN DE UNA MÁQUINA DE CALIBRACIÓN UNIVERSAL DE CELDAS DE CARGA”.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El capítulo presentado a continuación tiene como objetivo primordial exponer al lector la necesidad que impulsó el desarrollo de este proyecto, los objetivos que se plantearon para la ejecución del mismo y las alternativas planteadas para solucionar el problema.

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

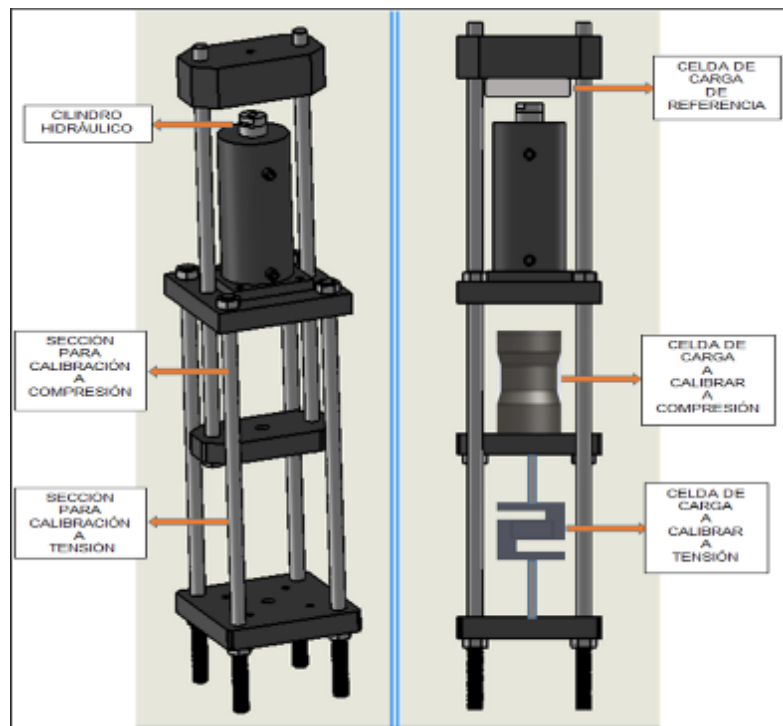
La Universidad Industrial de Santander y la escuela de Ingeniería Mecánica han intentado promover las diversas competencias de sus estudiantes, con el fin de formar profesionales con alta calidad humana, ética, política, técnica y científica.

Por su parte la industria petrolera, más concretamente, los departamentos de producción, están en la continua búsqueda e investigación de métodos que ayuden al mejoramiento e incremento de la producción de yacimientos, así pues, se hace necesario trabajar de la mano con nuevas tecnologías, lo que da paso al nacimiento de una relación cercana con el campo de la 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 presentes en un pozo. Estos conceptos han tomado gran auge en los últimos años, pues incorporan una operación autónoma, eficiente y continua, disminuyendo el riesgo operacional y aumentando la producción de crudo mediante el monitoreo y administración del yacimiento.

Para lograr el concepto de pozo inteligente se requieren diferentes dispositivos que deben estar incluidos dentro del paquete de herramientas que permitirá el desarrollo de éste; siendo la celda de carga una de las más importantes herramientas en la detección de fallas de las unidades mecánicas de levantamiento artificial de crudo, el cual se estima que es el método más usado.

Estas celdas, como cualquier otro sensor, tienden a perder su precisión, es por esto que se requiere una máquina que esté disponible para calibrarlas cada vez que sea necesario. En la actualidad, la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER cuenta con la maquina MTS 810 para la realización de ensayos, con unas buenas especificaciones técnicas, pero esta máquina presenta constantes problemas en su funcionamiento, los cuales han causado un deterioro en la disponibilidad de la misma. Esto llevó a la necesidad de construir una maquina con especificaciones similares y con gran nivel de precisión, que pueda aportar de manera efectiva tanto con la calibración de celdas de carga como con el desarrollo de un sistema de pozo inteligente y posteriormente, el concepto de campo inteligente. Adicionalmente las máquinas existentes están siendo manipuladas por humanos, lo que comprende un gran margen de error durante su operación, por tanto, se propone la automatización de la MCU que se ha venido desarrollando desde anteriores proyectos de grado, ubicada en el laboratorio de CNC de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 1. Máquina de Calibración Universal (MCU)



La máquina de calibración universal (MCU) está compuesta básicamente por 4 columnas unidas a dos placas, las cuales aportan un soporte fijo; ubicado en la placa superior está el cilindro hidráulico que transmitirá la energía hidráulica al pistón que a su vez transformará esta energía en energía mecánica, ésta se usará para calibrar las celdas de carga.

La MCU fue desarrollada originalmente para hacer uso de su alta precisión en la calibración de celdas de carga, y otros dispositivos de medición de la fuerza. Básicamente es un dispositivo que aplica simultáneamente una fuerza a una celda de carga de referencia o estándar de calibración, y a su vez a una celda de carga a calibrar; esta última puede ser calibrada a tensión o compresión, según la naturaleza del instrumento a calibrar. La ubicación y funcionamiento se ilustran en la figura 1. De acuerdo a lo expuesto, se puede identificar la problemática como: el desarrollo de una Máquina de Calibración Universal (MCU) que pueda generar una fuerza de hasta 50.000 Lbf, y además posea una gran precisión en su funcionamiento para así calibrar las celdas de carga. Esto con el fin de establecer bases sólidas para continuar en constante desarrollo de pozos inteligentes y posteriormente, el concepto de campo inteligente.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

La automatización es la base para llegar al concepto de pozo o campo inteligente, por lo cual el presente proyecto pretende la realización de una máquina automatizada con un alto nivel de precisión que calibre las celdas de carga utilizadas en Campo Escuela Colorado, pues son éstas una de las principales herramientas en el diagnóstico de fallas del bombeo mecánico, y se requiere que estén en óptimas condiciones de funcionamiento; lo que las hace completamente necesarias para contribuir al desarrollo del sistema inteligente, esto con el fin de plantear una solución mucho más eficiente frente a lo que se hace actualmente, aportando precisión y colaborando con diversos proyectos para que en conjunto logren el

concepto de campo inteligente , siendo una solución para el desarrollo de la academia y la industria nacional.

La exactitud de las mediciones, una reacción rápida y oportuna ante acontecimientos inesperados, y una operación autónoma, eficiente y continua son tareas de suma importancia en el objetivo final de campo o pozo inteligente, y son las tareas que el proyecto busca resolver dentro de su temática, por ende se debe desarrollar un banco de calibración que garantice la confiabilidad de dichas celdas con respecto a un patrón de referencia.

Es importante recalcar que en Colombia no existen empresas que fabriquen y automaticen máquinas de calibración universal (MCU), lo cual hace necesaria su importación, generando costos extras y dependencia de otros países como Alemania, Italia, Brasil, entre otros.

La construcción y automatización de esta máquina genera un gran aporte a la Universidad Industrial de Santander y la escuela de Ingeniería Mecánica, beneficiando también a Campo Escuela Colorado que es un Convenio Interadministrativo de Cooperación Empresarial entre la Universidad Industrial de Santander y ECOPETROL S.A. con fines Científicos y Tecnológicos, el cual tiene dentro de su misión desarrollar proyectos de investigación y apropiación tecnológica, siendo en este caso el aporte al objetivo conjunto del concepto de campo inteligente.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo general. Contribuir con los objetivos misionales de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER al aportar con la investigación que se desarrolla alrededor del concepto de pozo y campo petrolero inteligente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir el sistema hidráulico para un servosistema de fuerza de la máquina de calibración universal.
 - Garantizar una capacidad aproximada en la MCU de 50000 Lbf
 - Limitar el sistema hidráulico para una presión aproximada de 3000 psi
- Diseñar e implementar el sistema de automatización de la MCU.
 - Seleccionar y montar el hardware y control basado en PLC, usando sensores de fuerza, servoválvula y protecciones.
 - Desarrollar una interfaz hombre - máquina (HMI).

1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Debido a que en Colombia no existe ninguna empresa que fabrique máquinas de calibración universal, todas deben ser importadas desde otros países como Estados Unidos, Brasil, Francia, Alemania y España, se hace necesario la fabricación de esta máquina para así poder evitar los costos relacionados con la importación y además generar un nuevo desarrollo tecnológico en nuestra nación, lo que nos lleva a ampliar por medio de la investigación los conocimientos adquiridos durante los años invertidos en el estudio de pregrado en ingeniería mecánica. Dado que este prototipo se ha venido mejorando con el paso del tiempo, se aportó a la construcción de un eslabón que hace parte de la constante aplicación de reingeniería que busca el mejoramiento de sus funciones, con el fin de llevar a la práctica la realización de trabajos de calibración. Lo que se buscó con la elaboración de este proyecto fue diseñar, construir y automatizar parte del trabajo previo de algunos compañeros y trabajo propio por parte de los autores, llevando a cabo así el objetivo de alcanzar una alta precisión a la hora de detectar celdas de carga defectuosas comparándolas con la celda patrón adquirida por la UIS, paso que añade una característica importante al concepto de pozo inteligente, otorgando así mejores condiciones de operación y calidad a campo escuela colorado y prestigio a la escuela de ingeniería

mecánica de la universidad por hacer notar estar a la vanguardia en temas tecnológicos aplicables a la solución de necesidades reales de la industria.

1.5 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD (QFD)

Esta etapa del proyecto definió las necesidades que se tuvieron en cuenta desde un principio, se identificaron los parámetros relevantes de diseño, construcción y control, los cuales marcaron el rumbo para la elaboración de la MCU, estos se pueden resumir principalmente en la forma en que se automatizó la Máquina de Calibración Universal, así como todos los componentes de hardware y de control que se utilizaron en su ejecución.

Los requerimientos se presentan a continuación.

1.5.1 Requerimientos del consumidor. A continuación se establece una lista de los requerimientos básicos de los interesados en el desarrollo de la MCU.

- Precisa
- Durable
- Resistente
- Segura
- Fácil de operar
- Interfaz con buen aspecto
- Fácil adaptación
- Mantenibilidad
- Alta velocidad de regulación

1.5.2 Matriz de calidad

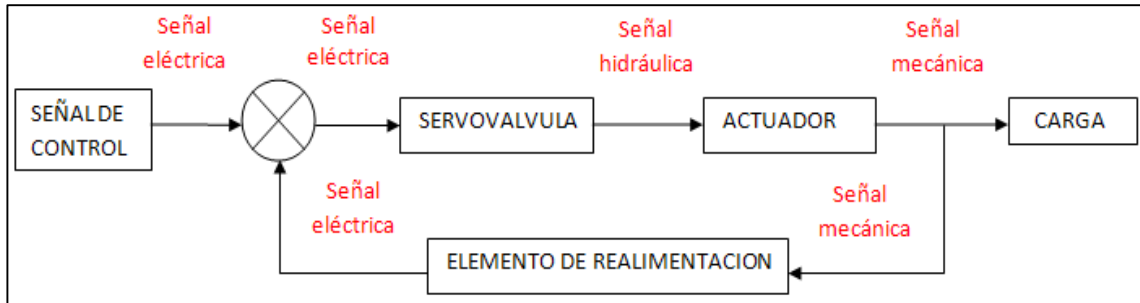
Tabla 1. Matriz QFD

QFD	Prioridad	Adquisición de datos	Actuadores del sistema	Fácilmente desmontable	Lenguaje de programación	Interfaz HMI	Estrategia de control	Presupuesto
Preciso	6	10	6	0	0	0	0	2
Durable	2	10	6	0	0	0	0	2
Adaptable	2	6	0	0	2	6	6	2
Fácil operación	10	6	2	2	0	0	0	0
Fácil mantenimiento	6	0	6	6	0	0	0	0
Seguro	10	10	10	10	0	10	10	2
Versátil	6	6	0	0	2	6	6	0
Buen aspecto	10	0	0	0	2	0	0	6
Fluidez	10	6	0	0	0	0	0	0
Manual del usuario	6	2	2	2	0	0	0	0
Total	68	360	216	92	36	416	148	100

1.6 PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

El planteamiento de las alternativas se hará teniendo en cuenta el control general de la máquina de calibración universal ilustrado en la figura 2.

Figura 2. Control general de la MCU

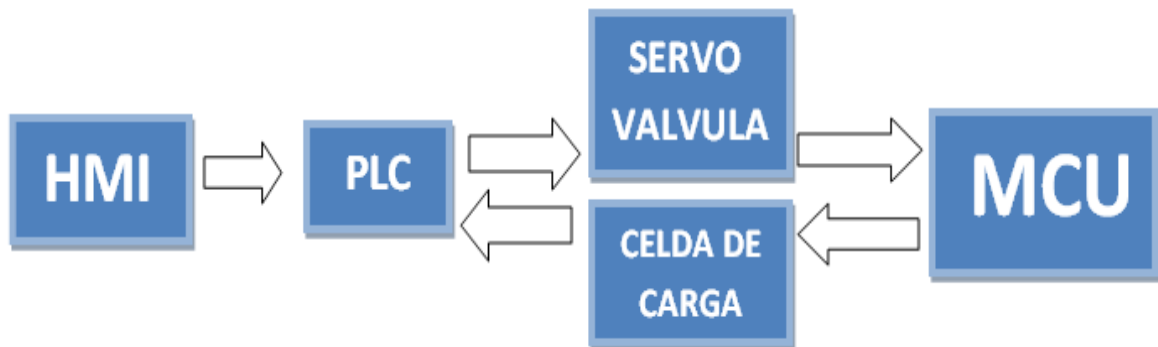


1.6.1 Alternativa 1.

MCU con Control mediante PLC

El lazo cerrado de control para esta alternativa se muestra en la figura 3.

Figura 3. Esquema del sistema de control en lazo cerrado



El controlador lleva a cabo las operaciones de adición de señales (referencia y retroalimentación), control de ganancia, etc. Como sistema de control se propuso el uso de un PLC de la gama s7-300 de la marca SIEMENS®, que se basa en el uso de una CPU 315F-2PN/DP con 512 KB de capacidad de almacenamiento y un procesamiento de 0,05 ms por cada 1000 instrucciones, 12 bits de resolución, entradas y salidas digitales y que además cuenta con un sistema de control PID FM355C desarrollado para este tipo de autómatas.

Figura 4. CPU 315F-2PN/DP



Fuente: INARSEV. CPU 315F-2PN/DP [en línea]. Disponible en internet: <URL:<http://www.inaserv.com/spool/gfx/d1312967669-6ES7317-6FF03-0AB0.jpg>>

El enlace Celda Patrón-Autómata se realizó con el módulo de pesaje SIWAREX U que es un módulo de pesaje completo y flexible que se puede utilizar en todas partes donde debe actuar una báscula estática en el sistema de automatización SIMATIC S7. Además el módulo SIWAREX U cuenta con un software independiente llamado Siwatool U con el cual se hace el enlace entre el módulo SIWAREX U y la Celda Patrón para establecer parámetros de funcionamiento y realizar su respectiva calibración.

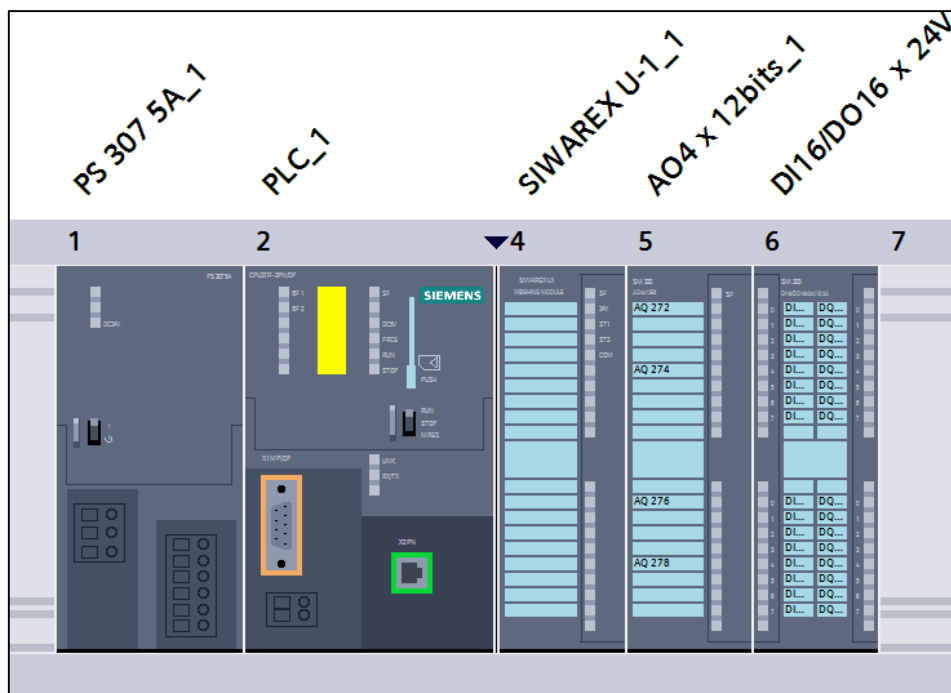
Para alimentar el S7-300 se usó como fuente de alimentación estabilizada una PS 307 con entrada AC 120/230 V y salida DC 24 V/5 A y el control digital se realizó con un módulo de entradas y salidas digitales de Siemens DI16/DO16 x 24V. En cuanto a la regulación se realizó con el módulo de salidas analógicas de Siemens modelo SM332; AO 4 x 12 bits, el cual recibe la instrucción y envía voltaje a la servoválvula.

Figura 5. Modulo salidas analógicas



Fuente: ECPLAZA. Siemens: Salidas analógicas [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://img.ecplaza.com/my/aotewellsiemens/4.jpg>>

Figura 6. Autómata PLC S7-300

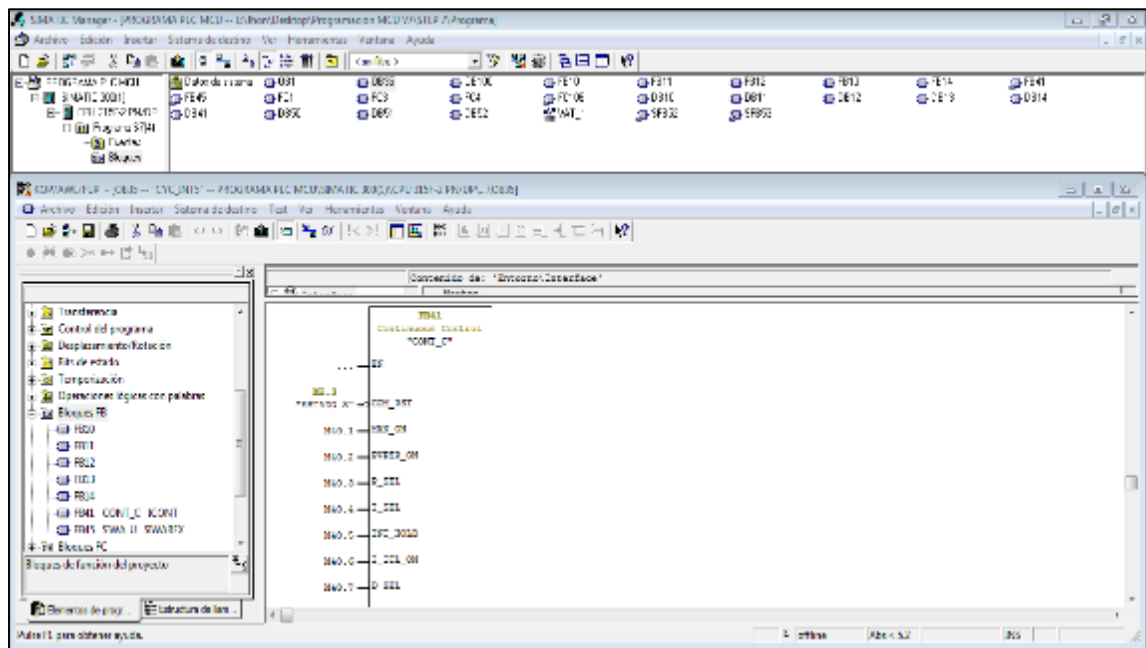


Fuente: STEP 7 Tia Portal V11, SIEMENS

Para la programación de este controlador, la empresa SIEMENS® cuenta con un paquete de ayuda computacional para lograr dicho fin llamado SIMATIC STEP 7 versión 5.5 (disponible en el laboratorio de automatización industrial), este software permite crear algoritmos de programación para sistemas de control por medio de bloques PID con lenguaje SCL (Lenguaje de control estructurado), quien facilita el trabajo permitiendo el uso de rutinas IF, FOR, WHILE en la creación de los programas. Este tipo de lenguaje permite que el PLC se convierta en el compilador del sistema haciéndolo más eficiente, debido a que los procesos se realizan en la CPU del controlador puede adaptarse al sistema cualquier tipo de interfaz HMI para realizar este proyecto.

A continuación se presenta el entorno de programación del programa SIMATIC Step 7 V5.5:

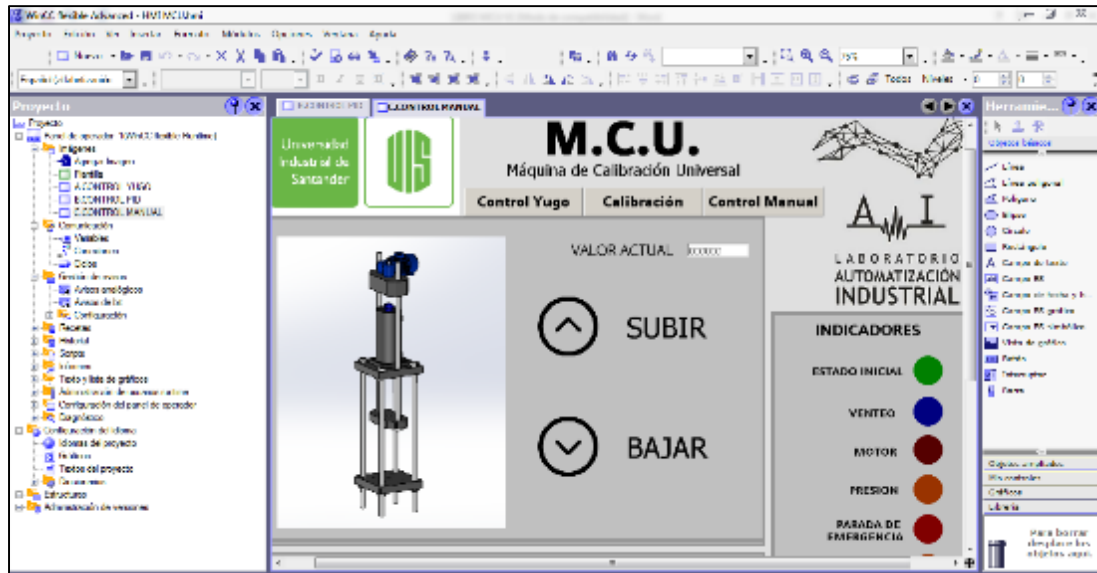
Figura 7. Entorno SIMATIC Step 7 V5.5



Fuente: STEP 7 V5.5, SIEMENS

Para la creación de una interfaz hombre-máquina se propuso el uso de un computador ejecutando el código generado en SIMATIC STEP 7 y este es sincronizado con la visualización creada con el software SIMATIC HMI WINCC FLEXIBLE 2008 SP3

Figura 8. Entorno HMI Simatic WinCC Flexible



Fuente: WinCC Flexible, SIEMENS

1.6.2 Alternativa 2. MCU con tarjeta de adquisición de datos programada con Control mediante Labview. Esta alternativa consiste en un sistema de control con estructura de lazo cerrado, como se muestra en la figura 9.

Figura 9. Sistema de control en lazo cerrado



El controlador lleva a cabo las operaciones de adición de señales (referencia y retroalimentación), control de ganancia, etc.

Como sistema de control se propuso el uso de una tarjeta de adquisición de datos DAQ fabricada por la National Instruments, de referencia NI USB-6216 de la serie M, alimentados con bus para USB, de 16 bits, con velocidades de muestreo rápidas en las E/S digitales, con 16 entradas analógicas a 400 Ks/s y 2 salidas analógicas a 250 Ks/s, ambos con 16 bits de resolución.

Figura 10. Tarjeta de adquisición de datos



Fuente: INFORMAZIONE. National Instruments [en línea]. Disponible en Internet: <URL:http://www.informazione.it/pruploads/accd994a-4166-49db-83daa0aceb25f969/02080806_9431_p.JPG>

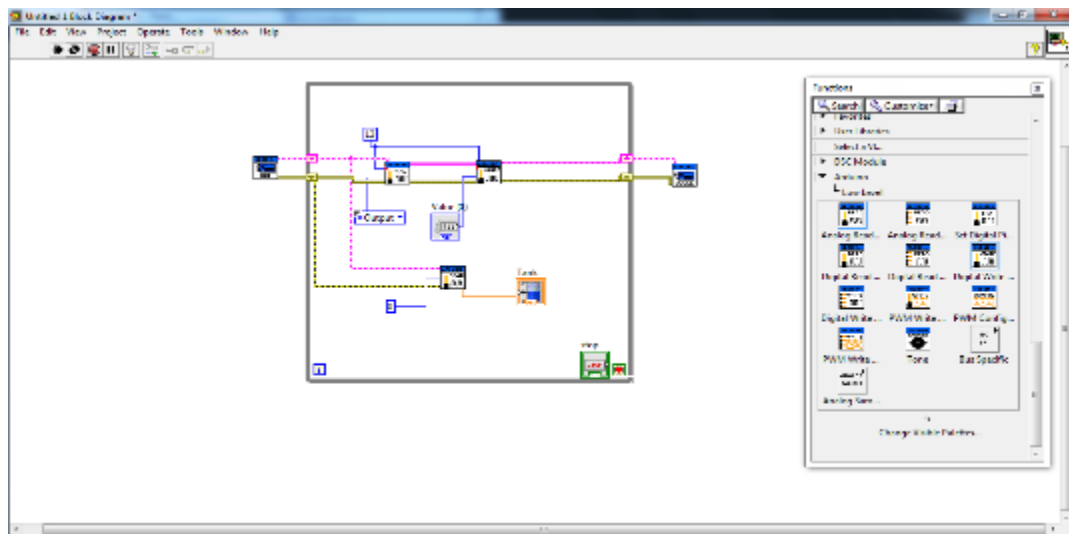
Para la programación de este controlador se utiliza Labview que es una herramienta software desarrollada por National Instruments para la creación de aplicaciones de adquisición de datos y de control. Labview es una herramienta de programación gráfica que contiene todas las utilidades necesarias para crear, depurar y generar

programas ejecutables de aplicación al mundo de la automatización industrial y del test y medida.

Las aplicaciones desarrolladas en Labview tienen una estructura basada en elementos como la Interfaz de usuario, la cual permite elaborar paneles interactivos de una forma rápida. Los diferentes elementos disponibles en la interfaz de usuario proporcionan mecanismos para leer y visualizar datos mediante menús, paneles, controles y cajas de diálogo. También posee el uso de diagrama de bloques para la elaboración del código de la aplicación, y está formado por estructuras de control (*while*, *case*, etc.), terminales que identifican elementos gráficos de E/S, y por nodos y funciones que realizan operaciones con los datos o controles de entrada para representarlos sobre los indicadores.

A continuación se presenta el entorno de programación del programa Labview.

Figura 11. Entorno de programación en Labview

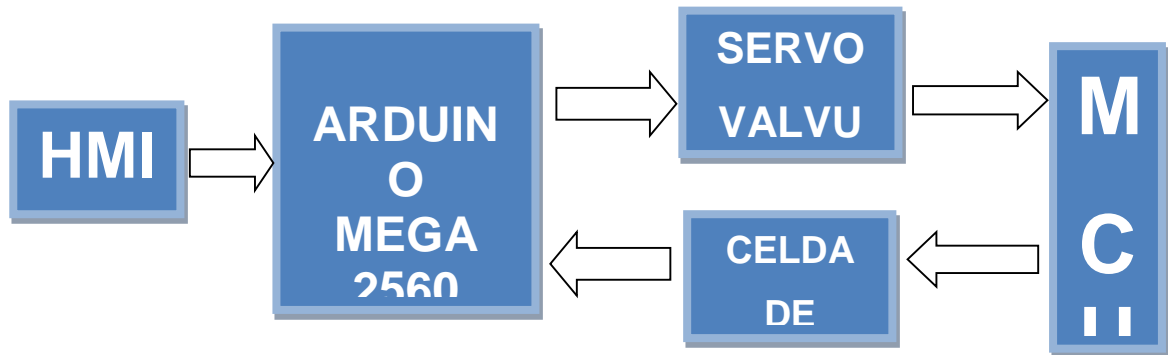


Fuente: 2BP BLOGSPOT. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://2.bp.blogspot.com/Y3ZB6bvM9ik/Ucb8AG4IMVI/AAAAAAAAAfU/XR27uVgZUEk/s1600/uno.png>>

Para la creación de una interfaz hombre-máquina se propuso el uso de un computador ejecutando el código generado en Labview principalmente para funciones de manejo y visualización.

1.6.3 Alternativa 3. MCU con tarjeta ARDUINO MEGA 2560. Esta alternativa consiste en un sistema de control con estructura de lazo cerrado, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Sistema de control en lazo cerrado para ARDUINO



En el planteamiento de esta alternativa se propuso hacer el sistema de control mediante una placa ARDUINO MEGA 2560 basado en microcontroladores; la recepción de las señales digitales se hace sobre el sistema de arduino, mientras que el tratamiento de salidas analógicas requiere el uso de convertidores digitales/análogos, además de la implementación de amplificadores operacionales y el uso de relés.

El sistema de control se encarga de recibir la señal que envía la celda de carga, y esta enlazado con el computador en donde, a través de la interfaz, se realizará la función de control. Posteriormente se enviará una señal de salida, nuevamente a través del Arduino, el cual dirige la señal a la servoválvula que se encarga de realizar la acción de control final, regulando el flujo de aceite al cilindro hidráulico de la

máquina de calibración universal. Este proceso de control se realiza en lazo cerrado, como se mostró en la figura anterior.

Figura 13. Tarjeta ARDUINO MEGA 2560



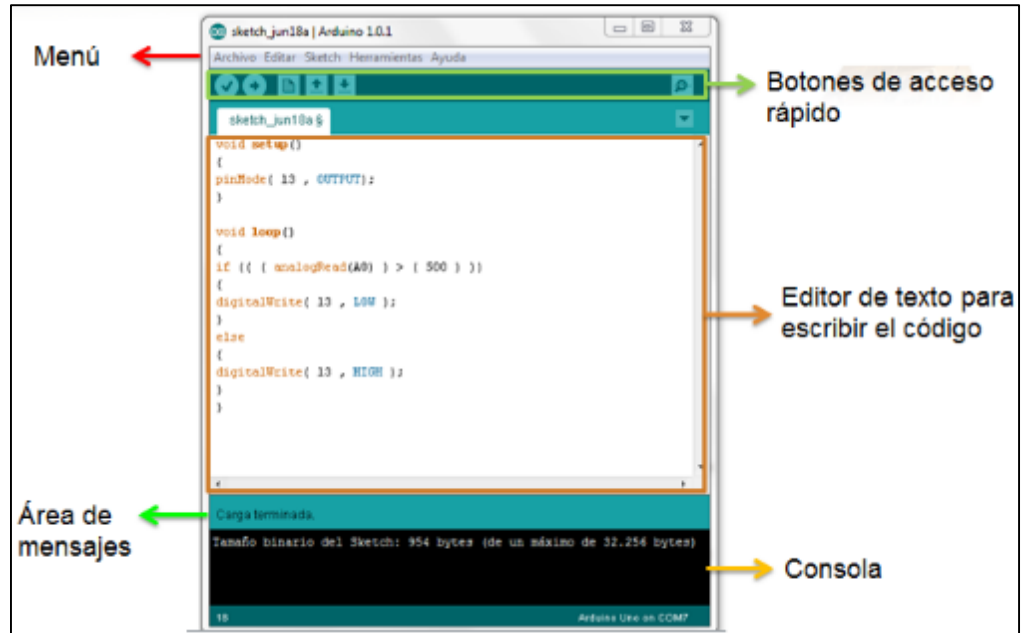
Fuente: IEEE STRUDENT BRANCH UPV. Arduino Mega [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.ieee.upv.es/wp-content/uploads/2012/10/arduino_mega_iso2_800.jpg>

Debido que en el planteamiento de esta alternativa se usa como sistema de control una tarjeta ARDUINO MEGA 2560 se realizó el algoritmo de control en cualquiera de las versiones de la aplicación que la empresa Arduino ha diseñado para programar sus tarjetas de desarrollo.

Para la realización de un sistema de control en este ambiente de programación se hace necesario conocer plenamente las ecuaciones que definen la planta. A diferencia de los PLC las Board arduino no tienen integrado bloques PID en sus lenguajes de programación.

El entorno de programación en Arduino se muestra en la siguiente figura.

Figura 14. Entorno de programación en ARDUINO



Fuente: 4B BLOGSPOT. Arduino [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://4.bp.blogspot.com/PAk1ZLISfo/T_eVzsFq8tI/AAAAAAAAAJQ/I7q_xXrkIm8/s1600/ide+arduino+2.png>

Para la creación de una interfaz hombre-máquina se propuso generar un programa ejecutable a partir de la aplicación Processing Development Environment (PDE), la cual está diseñada para el desarrollo de entornos gráficos virtuales a partir de funciones específicas.

Processing está realizado en base al lenguaje de programación JAVA, el uso de este programa permite crear aplicaciones compatibles con Arduino. También se hizo necesario la utilización de un computador para la máquina de calibración universal, el cual ejecuta el código generado; esto será principalmente para funciones de manejo y visualización.

1.6.4 Evaluación de las alternativas. Teniendo en cuenta los datos analizados en cada una de las alternativas planteadas y en la matriz QFD, se realizó una tabla para determinar la alternativa más adecuada para solucionar el problema según los

parámetros más representativos planteados por los autores de este proyecto, en conjunto con el usuario final. Se evaluó cada una de las especificaciones dando como resultado la siguiente tabla.

Tabla 2. Matriz de ponderaciones para la evaluación de alternativas

CRITERIO DE EVALUACIÓN	PROMEDIO	ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2		ALTERNATIVA 3	
		Nota	Ponderado	Nota	Ponderado	Nota	Ponderado
Adquisición de datos	0,26	5	1,32	3	0,79	2	0,53
Interfaz	0,3	4	1,22	4	1,22	4	1,22
Actuadores del sistema	0,16	2	0,32	2	0,332	2	0,32
Estrategia de Control	0,11	5	0,54	5	0,54	5	0,54
Porcentaje			0,85		0,72		0,65

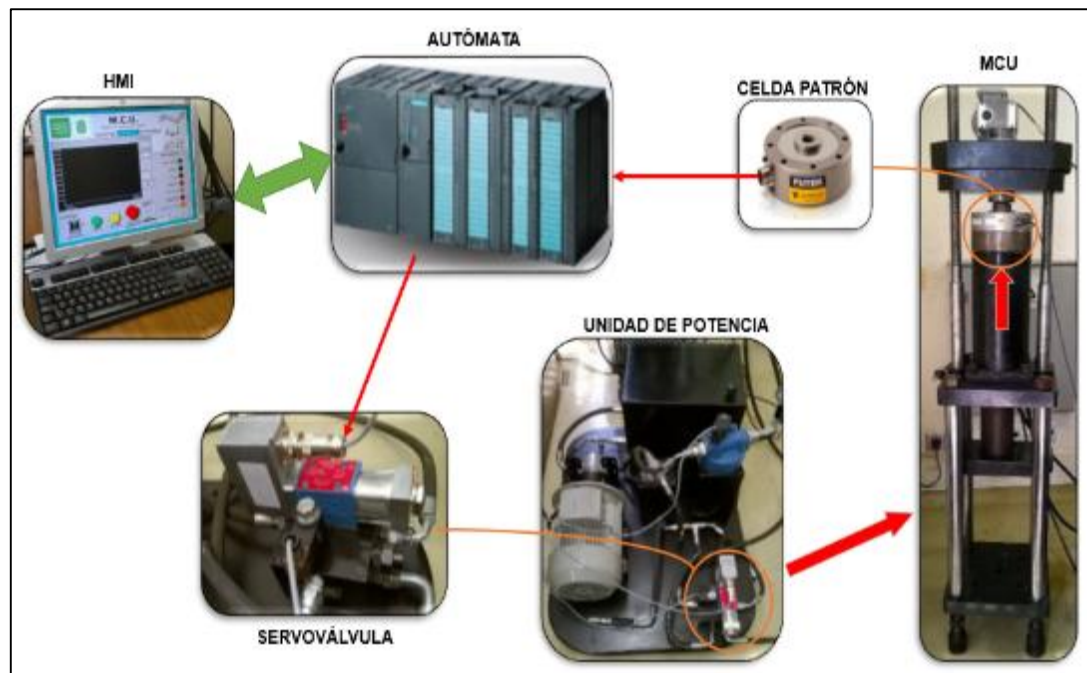
Después de realizar la respectiva evaluación de las tres alternativas por medio de la ponderación de los requerimientos planteados y la matriz QFD, se evidenció que la mejor alternativa para dar solución al problema es la primera. Esta solución propone la automatización de la MCU usando un con Control mediante Autómata PLC Siemens.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA MCU

En el presente capítulo se muestra una descripción general de la automatización de la máquina de calibración universal (MCU); esta se llevó a cabo gracias a la suma de varios factores tecnológicos, entre los cuales está un sistema de control basado en PLC, un sistema de reconocimiento de fuerza por medio de una celda de carga patrón, el control de la unidad hidráulica construida usando una servoválvula y un sistema de mando por medio de una Interfaz Humano Maquina (HMI) diseñada exclusivamente para la MCU automatizada.

En la siguiente figura se muestra una descripción que abarca a grandes rasgos la funcionalidad de la MCU.

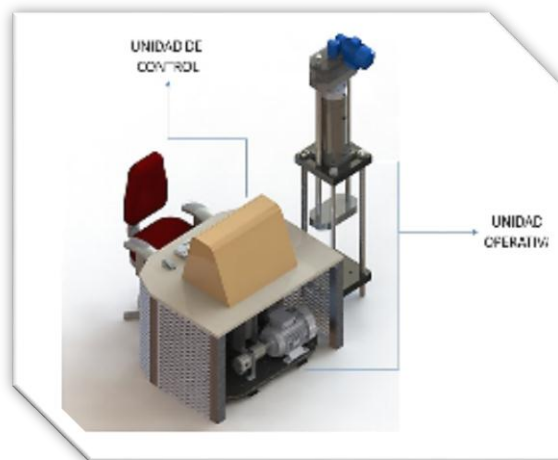
Figura 15. Descripción de la MCU



Como se pudo observar en la figura anterior, el funcionamiento general de la MCU inicia con una instrucción dada por medio de la HMI, esta es ingresada en el código previamente cargado en la CPU del autómat. Luego de ser procesada en el programa, este genera una salida en voltaje por medio del módulo analógico de siemens, enviándola hacia la servovalvula, la cual permite el paso de caudal que es dirigido controladamente al cilindro hidráulico, haciendo que este se presurice y desplace el pistón que comprime la celda de carga, encargada de registrar el valor recibido. Simultáneamente la celda de carga envía ese valor detectado hacia el controlador, y este realiza por medio del código de programación la comparación entre el valor deseado de fuerza, y el valor real leído por la celda de carga patrón, con un tiempo de muestreo equivalente a 25ms.

Más concretamente la MCU, consta de dos componentes principales de funcionamiento que permiten realizar las funciones básicas para lo que ella fue diseñada; siendo estas la unidad de control (UC) y la unidad operativa (UO) comunicadas entre sí por medio de cables y/o mangueras resistentes a las condiciones de trabajo hostiles como ambientes con altos índices de corrosión, abrasión e incluso altas presiones de trabajo.

Figura 16. Componentes MCU



La unidad operativa está constituida principalmente por la estructura y el paquete de potencia, los cuales realizan la acción, mientras la unidad de control es formada por la interfaz humano-maquina (HMI) y el controlador del sistema, siendo la parte encargada de generar las órdenes necesarias para que la acción se lleve o no a cabo.

La MCU es la continuación de un proyecto anterior titulado DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSMISIÓN DEL CONJUNTO DEL YUGO MOVIBLE DE UNA MAQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA UNIVERSAL, añadiendo un paquete hidráulico con ciertos componentes capaces de generar 50.000 Lbf además de una capacidad de elevar la presión a un máximo de 3000 psi.

Dado que el objetivo del proyecto es automatizar, dicho sistema hidráulico es servo actuado, lo que permite tener pleno control de la presión de trabajo en el cilindro y a su vez de la fuerza de salida de la máquina, también cuenta con una servo-válvula de última generación con excelentes características y con un bloque de control que incluye la válvula de alivio para la protección del sistema, diseñado perfectamente para un acople seguro y compacto. Sumado a dicha protección la MCU posee un elemento filtrante de media presión que evita el paso de mugre en el aceite en el orden de las micras.

2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA MCU

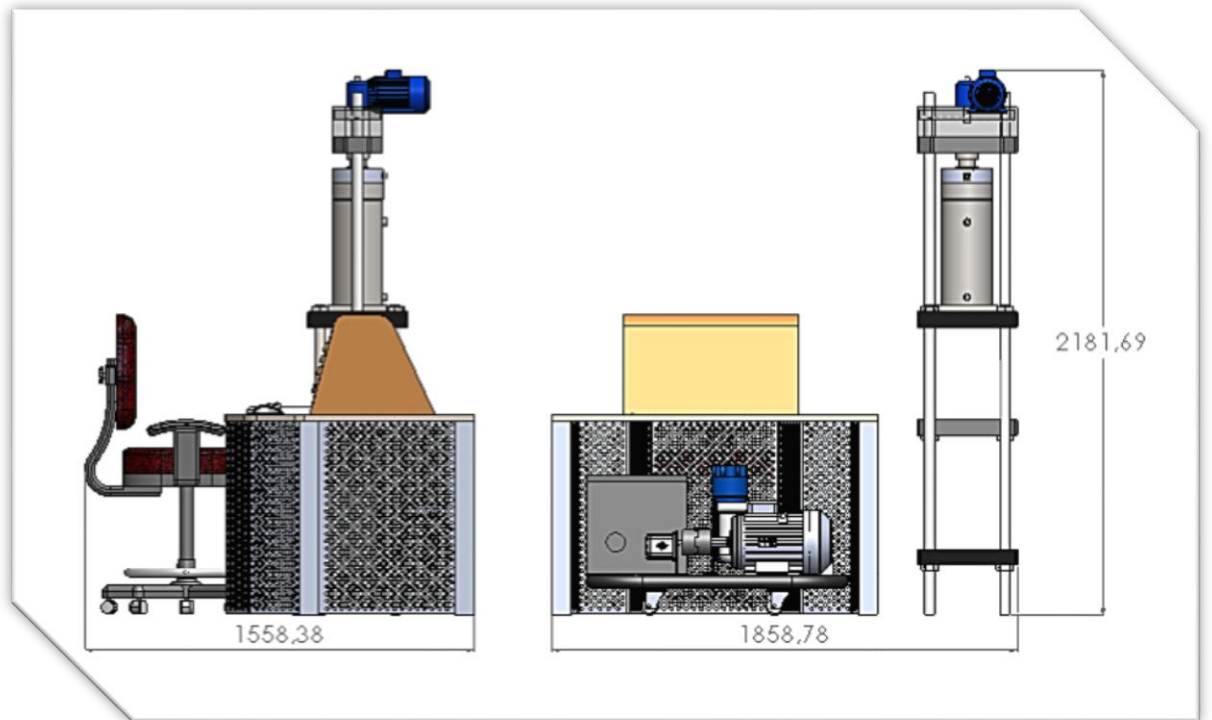
Construida ya una idea de lo que representa la MCU, se da paso al conocimiento de su ciclo de operación:

El motor genera un par que hace actuar a la bomba generando un estrangulamiento del aceite que circula por el paquete hidráulico o de potencia causando un aumento de la presión del mismo, después que el aceite deja la bomba se dirige hacia la servo-válvula que es la encargada de controlar el flujo de aceite que va para el

cilindro responsable del desplazamiento del pistón que va a acercar el sensor -celda de carga- al yugo móvil para ejercer la fuerza que el operario requiera al momento de hacer la prueba, esta fuerza va a estar en constante monitoreo por parte del cerebro de la MCU que es en este caso un controlador siemens de referencia S7-300 intercomunicado directamente con el software diseñado para observar constantemente el comportamiento de la máquina y tener pleno control de la misma. El software diseñado para la MCU cuenta con una interfaz humano- máquina (HMI, por sus siglas en inglés) para la amigable percepción a la vista del operario y está dotada con 4 modos de operación, para aportar flexibilidad, versatilidad y eficacia a la hora de la puesta en marcha.

La característica más importante a la hora de la realización de la MCU es la resistencia a las altas fuerzas a la que va a ser sometida, por ende los materiales elegidos para su fabricación fueron seleccionados cuidadosamente para tal fin, por lo que se escogió el acero 4140 como principal material de construcción pues sus elementos de aleación incluyen cromo y molibdeno, obteniendo así una fuerza excelente al cociente de peso y es considerablemente más fuerte y más duro que el estándar 1020 de acero. No es tan ligero como una aleación de aluminio, pero tiene la ventaja de una alta resistencia a la tracción y alta ductilidad, si bien es cierto que este material no es liviano, no es inconveniente pues la MCU no es portable, pero, para compensar esto se hizo una máquina compacta ofreciendo esto como una ventaja contra las máquinas que se encuentran actualmente disponibles en la industria, contando con las siguientes dimensiones:

Figura 17. Dimensiones MCU



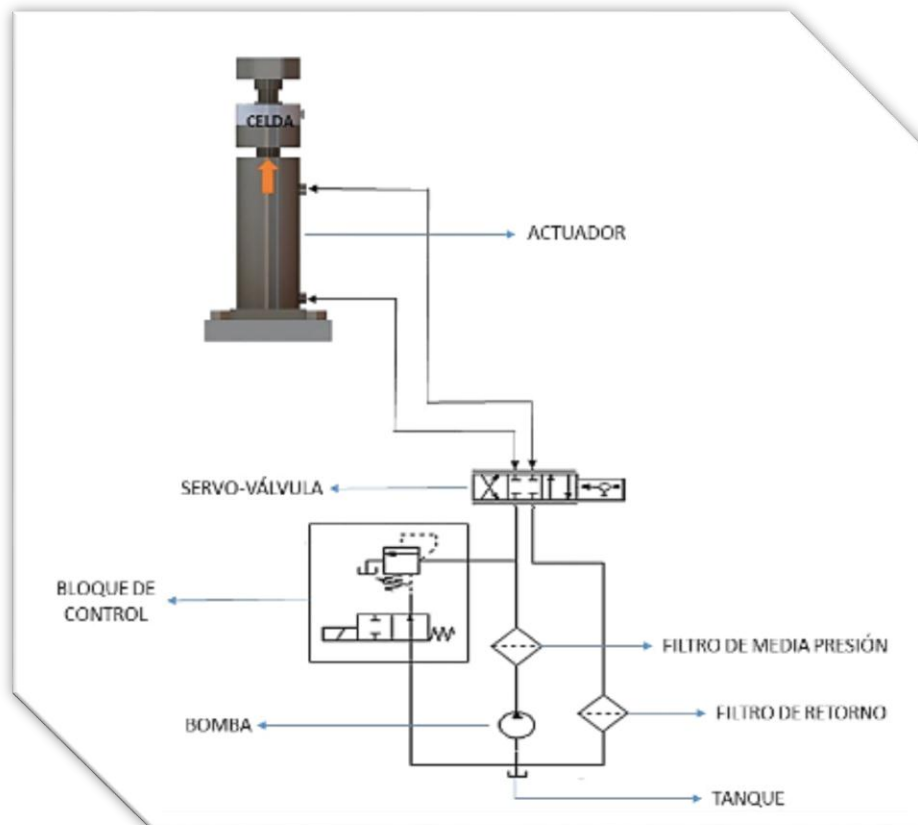
2.2 COMPLEJIDAD

Durante el proceso de elaboración de la MCU se encontró un gran número de dificultades que debieron sortearse para que el producto final fuera una máquina de fácil entendimiento y sencilla operación, lo que llevó a solucionar problemas como el ajuste de la celda de carga patrón, la programación interna del controlador y el tipo de control necesario

3. UNIDAD OPERATIVA

La Unidad Operativa de la MCU está comprendida por la estructura de calibración de la MCU y el paquete hidráulico.

Figura 18. Unidad Operativa MCU



3.1 PAQUETE HIDRÁULICO

Tomando como definición de fluido “sustancia que toma siempre la forma del recipiente donde está contenido”, la hidráulica es la ciencia que comprende la transmisión y la regulación de fuerzas y movimientos por medio de fluidos. Cuando

se escuche la palabra “hidráulica” hay que remarcar el concepto de que es la transformación de la energía, ya sea de mecánica o eléctrica en hidráulica para obtener un beneficio en términos de energía mecánica al finalizar el proceso.

Los principales componentes de un sistema hidráulico son:

- Bomba
- Actuadores
- Válvula de seguridad
- Filtros
- Motor
- Depósito

Figura 19. Paquete hidráulico MCU



3.1.1 Tanque hidráulico. La función natural de un tanque hidráulico es contener o almacenar el fluido de un sistema hidráulico. Los tanques hidráulicos consisten de cuatro paredes, un fondo con desnivel, líneas de succión, retorno y drenaje, tapón de drenaje, indicador de nivel de aceite, filtro de llenado y una placa deflectora llamada baffle. Además de funcionar como un contenedor de fluido, un tanque también sirve para enfriar el fluido, permitir asentarse a los contaminantes y el escape del aire retenido. Cuando el fluido regresa al tanque, una placa deflectora bloquea el fluido de retorno para impedir su llegada directamente a la línea de succión. Así se produce una zona tranquila, la cual permite a las partículas grandes sedimentarse de suciedad, que el aire alcance la superficie del fluido y da oportunidad de que el calor se disipe hacia las paredes.

La desviación del fluido es un aspecto muy importante en la adecuada operación del tanque. Por esta razón, todas las líneas que regresan fluido al tanque deben colocarse por debajo del nivel del fluido y en el lado de la placa deflectora opuesto al de la línea de succión. La tapa del tanque puede ser removida para permitir la limpieza e inspección.

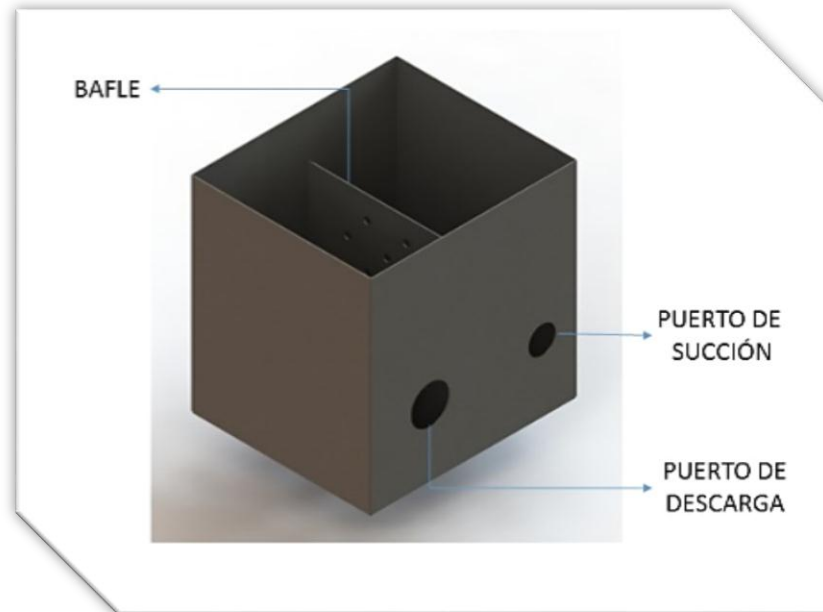
Se equipa la MCU con un tanque de 10 galones de volumen neto hecho en lámina 1/8" de acero HR. El tamaño del tanque está dado por la ecuación:

$$V = 3 * Q_b$$

Donde: Q_b hace referencia al caudal nominal de la bomba.

Esto se debe a que para sistemas corrientes el tamaño del tanque debe ser tal que el aceite permanezca en su interior de uno a tres minutos antes de recircular.

Figura 20. Detalle interno del tanque hidráulico



3.1.2 Bloque de control. Los manifolds de válvulas permiten centralizar funciones de un depósito o varios de forma modular, mejorando la eficiencia del sistema y ayudando a un mejor control del proceso.

Un manifold es la alternativa automatizada a las placas multi-vías, codos (entre otros accesorios) y también a las mangueras flexibles, la automatización de esta operación da como resultado seguridad.

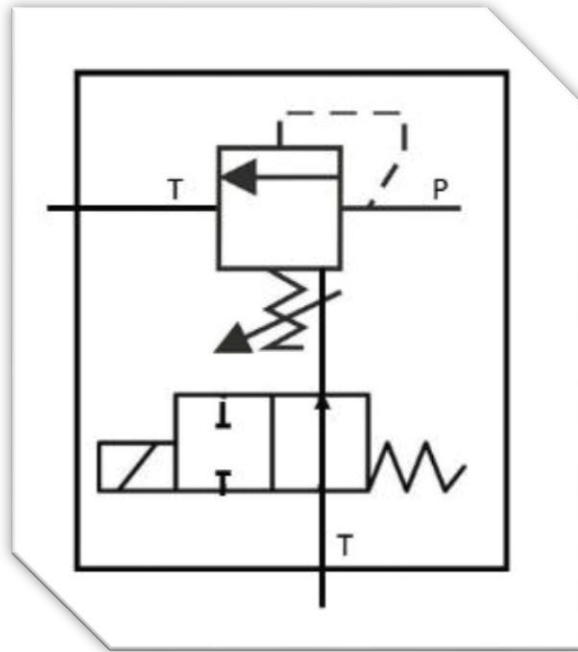
Figura 21. Bloque de control



El bloque de control de la MCU está encargado de mantener estables las presiones de trabajo del sistema y de permitir poner en opción de venteo el aceite cuando sea necesario.

El manifold se diseña de manera especial para la conexión con la servo-válvula, de este modo no se hace necesario el diseño de la placa soporte para la misma, además brinda un notorio ahorro de espacio ayudando a la MCU a ser compacta y eficaz. Este bloque es la combinación de una válvula direccional 2/2 normalmente abierta adecuada con un solenoide de 220V para tener pleno control de la dirección del caudal y una válvula de alivio de presión que se utiliza para brindar seguridad a la MCU (como se muestra en la figura 22), adicionalmente es la encargada de tarar la máquina a la presión necesaria del sistema para cada rango de fuerza de salida deseado.

Figura 22. Plano hidráulico del bloque de control



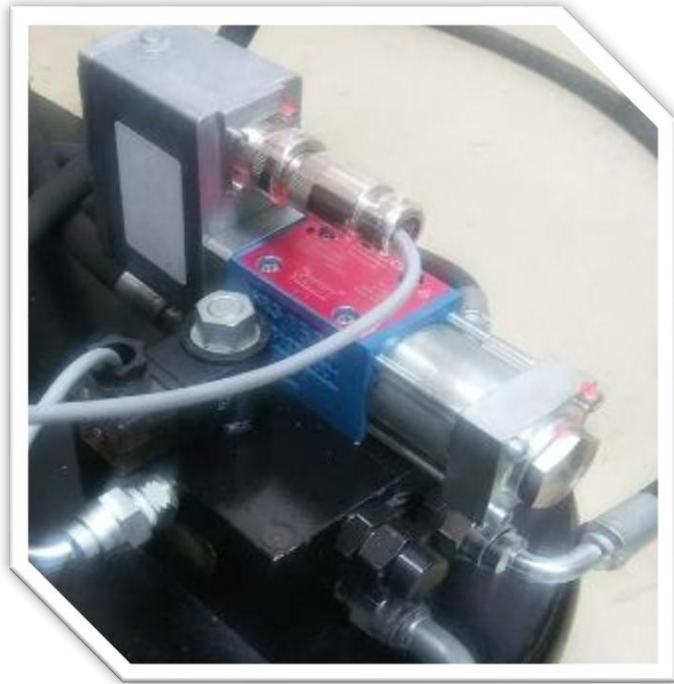
Ventajas:

- Acción directa
- Limita la presión del sistema hasta un valor máximo establecido
- Deriva todo o parte del caudal de la bomba al tanque
- Dispone de un tornillo para ajustar la fuerza del muelle
- Tiene puerto Z

3.1.3 Servo-válvula. Las válvulas servo DDV (Direct Drive) proporcionales MOOG son válvulas adecuadas para sistemas electrohidráulicos de control de posición, velocidad, presión o de control de la fuerza, incluyendo aquellos sistemas con altos requerimientos de respuesta dinámica.

El dispositivo de accionamiento del carrete es un motor de fuerza lineal de imán permanente el cual puede mover el carrete de su posición centrada por resorte en ambas direcciones.

Figura 23. Servo-válvula proporcional MOOG



Ventajas:

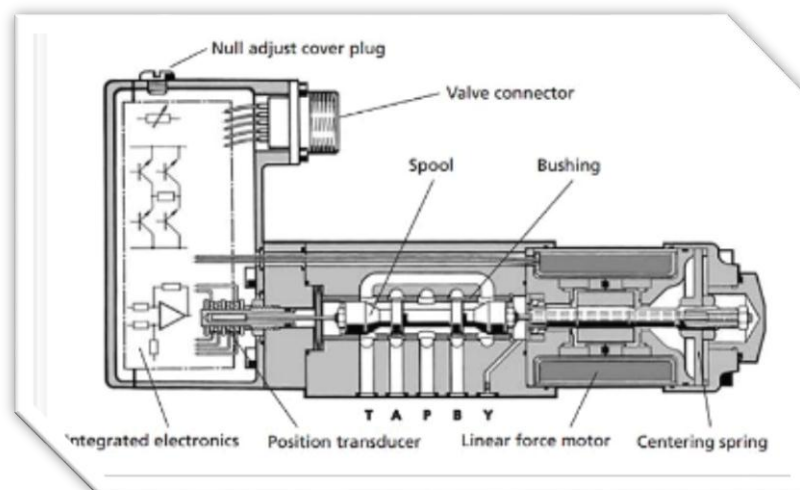
- El carrete es accionado directamente por un motor de fuerza lineal de imán permanente con un alto nivel de fuerza
- No requiere caudal de pilotaje, esto se traduce en un ahorro considerable de energía.
- La electrónica de control de posición y de accionamiento está integrada en la válvula

- La dinámica de la válvula de accionamiento directo es independiente de la presión de trabajo.
- Mayor control de la posición del carrete incluso con elevadas fuerzas de flujo y fluidos contaminados.

Funcionamiento:

- Una señal de mando eléctrico (Set point) se aplica a el controlador de posición integrado y produce un pulso de ancho modulado (PWM) de corriente para accionar el motor de fuerza lineal.
- El transductor de posición (LVDT) mide la posición del carrete principal, esta señal se desmodula y se alimenta de nuevo al controlador donde se compara con la señal de comando.
- El controlador acciona el motor de fuerza lineal hasta que el error entre la señal de mando y la señal de retroalimentación es cero. Por lo tanto, la posición del carrete principal es proporcional a la señal de mando eléctrica.

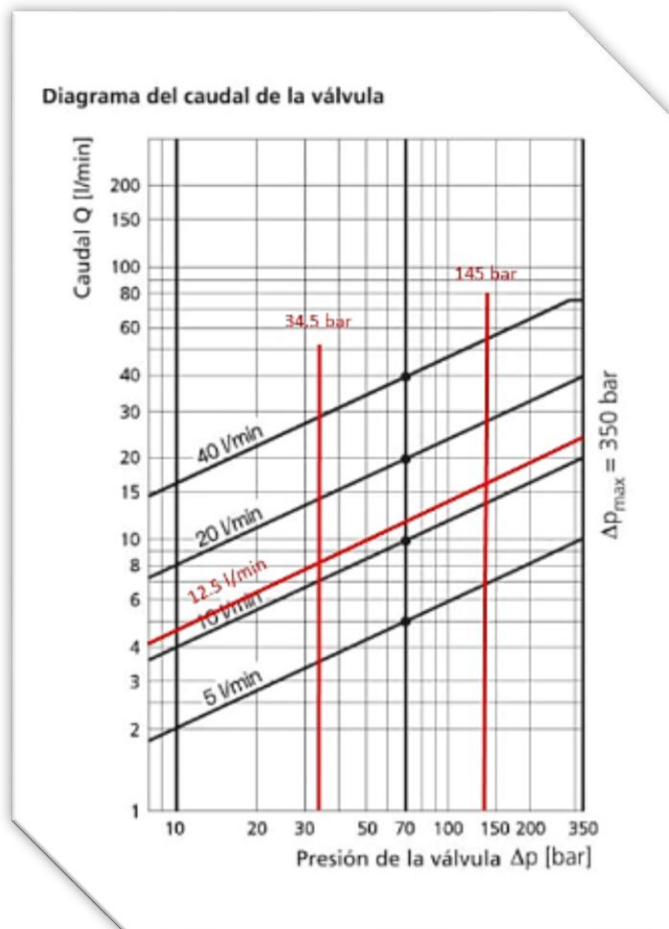
Figura 24. Descripción funcionamiento interno servo-válvula MOOG



Fuente: HIDRÁULICA & NEUMÁTICA. Válvulas servo DDV proporcionales [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.hnsa.com.co/valvulas-servo-ddv-proporcionales/>>

El rango de operación de la servo-válvula instalada en la MCU maneja presiones de trabajo desde 34.5 bar hasta 145 bar y un caudal constante de 12.5 l/min enviado por la bomba, comparando con la gráfica de funcionamiento suministrada por el fabricante se puede notar que está en condiciones óptimas de trabajo.

Figura 25. Rango de operación de la servo-válvula



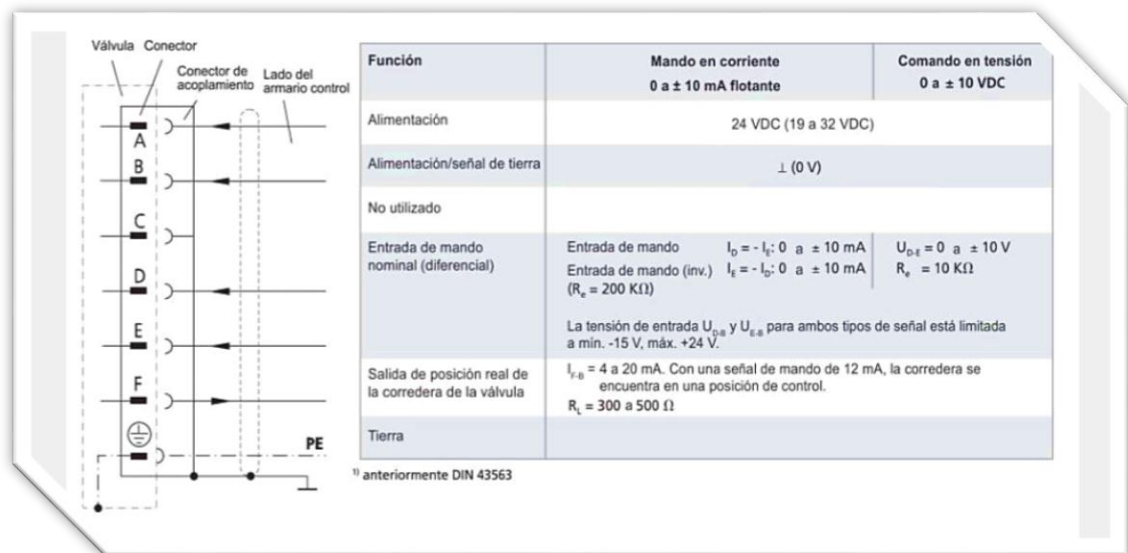
Fuente: Manual servo-válvulas accionamiento directo d633 d634 411943 1b

La servo-válvula opera con una señal de mando entre -10V y 10V y su corredera es proporcional a dicho voltaje, siendo 0V donde ella se encuentra en una posición centrada.

Para monitorear la posición de la corredera de la servo-válvula se cuenta con un pin de salida que está presente para funciones de vigilancia o detección de errores, en este pin se observa una señal de salida en todo momento que oscila entre 4 a 20 mA, correspondiendo 20mA a una apertura total de la corredera y 12mA a la posición centrada, se tiene una ventaja adicional con este monitoreo pues si en algún momento se observa una señal equivalente a 0mA se detecta la rotura del cable de conexión.

La siguiente figura describe exactamente las conexiones presentes en la servo-válvula de manera tal que funcione a la perfección incluyendo la utilidad llamada detección de fallos.

Figura 26. Electrónica de la servo-válvula



Fuente: HIDRÁULICA & NEUMÁTICA. Válvulas servo DDV proporcionales [en línea]. Disponible en Internet: [URL:http://www.hnsa.com.co/valvulas-servo-ddv-proporcionales/](http://www.hnsa.com.co/valvulas-servo-ddv-proporcionales/)

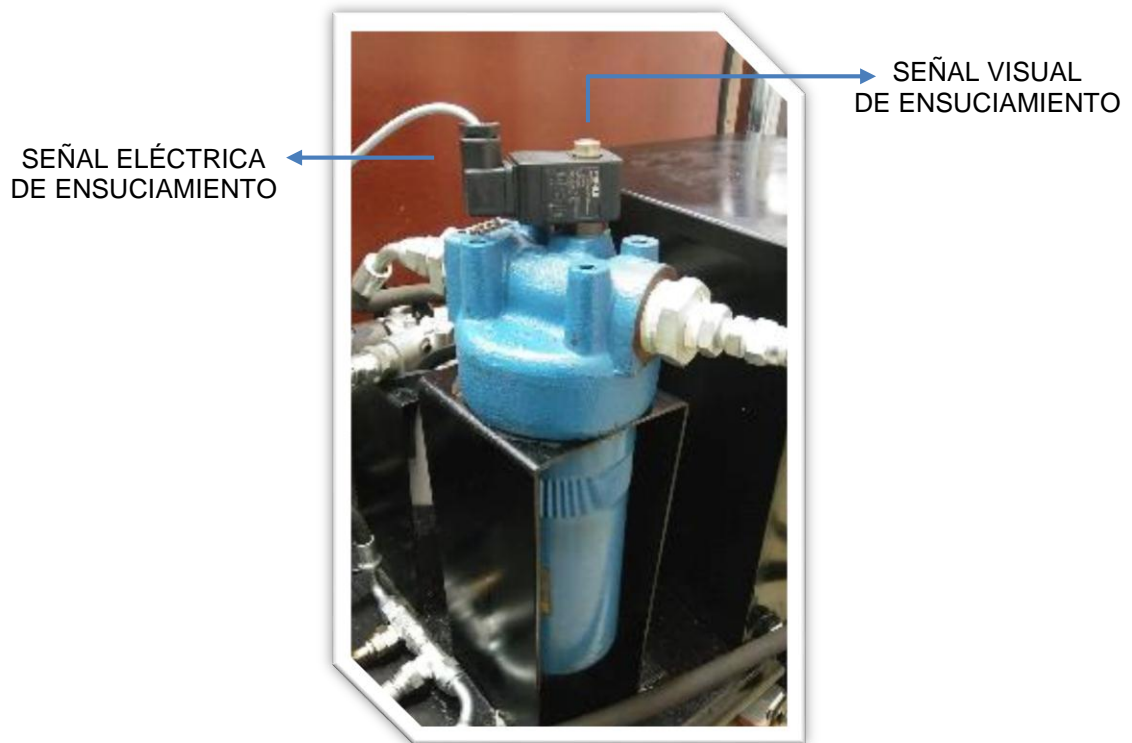
3.1.4 Filtro de media presión. Sabiendo que para los fabricantes existen categorías en cuanto a presión se hace referencia, se tiene que existen los siguientes rangos:

- Baja presión (25bar - 60 bar)
- Media presión (61 bar – 210 bar)
- Alta presión (211 bar – 450 bar)

Ubicando la MCU en el rango de media presión se procede a instalar el filtro MAHLE de referencia PI 3630-015. Entre sus principales características se encuentran:

- Indicación de ensuciamiento visual y eléctrica.
- Elemento filtrante de alta eficiencia
- Alta capacidad de retención de suciedad

Figura 27. Filtro de media presión MAHLE



Importancia del filtrado:

Es de gran importancia que los sistemas oleo-hidráulicos se encuentren limpios de impurezas debido a que los mecanismos interiores de los componentes hidráulicos son muy delicados y vulnerables a la suciedad, tal es el caso de los ajustes de gran precisión en bombas, en electroválvulas, válvulas reguladoras de caudal, etc.

El diseñador del sistema hidráulico debe disponer de todos los medios que tenga a su alcance para reducir al máximo la contaminación del aceite que se produce desde el exterior al interior del circuito como también desde el interior del circuito por desgaste de los componentes.

Una forma de reducir la contaminación en el circuito es implementar filtros adecuados para evitar que la suciedad sea transportada a lo largo del circuito. Los filtros tienen como función retener algunas partículas sólidas que son perjudiciales para el sistema, usualmente el tamaño de los contaminantes oscila entre 10uM y 100uM, a medida que aumenta el tamaño de las partículas sólidas, el daño que producen en los componentes también es mayor.¹

3.1.5 Filtro de retorno. La función que cumple este componente es garantizar que el aceite hidráulico continua estando limpio antes de volver a recircular por la bomba hidráulica.

¹ HIDRÁULICA & DINÁMICA. Filtros de presión [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.hnsa.com.co/filtros-de-presion/>>

Figura 28. Filtro de retorno a tanque



Funcionamiento:

El líquido sucio entra en el orificio de entrada y penetra el medio de filtrado, haciendo que los contaminantes sean atrapados en su superficie exterior. El fluido limpio se dirige entonces a través del orificio de salida. Una válvula de derivación integral opcional se puede utilizar para proteger el elemento contra sobretensiones en las líneas y alta presión diferencial debido a la contaminación.

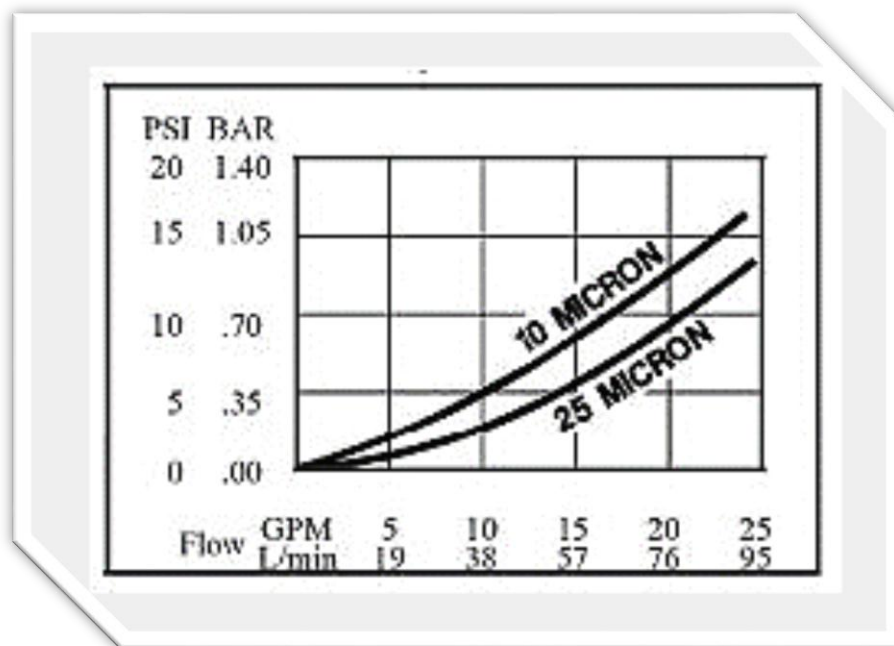
Especificaciones:

- Presión de operación: 175 PSI (12.06 Bar) máximo
- Temperatura de operación: 250° F (121° C) máximo
- Elemento filtrante: 10 micras

Características:

- Económico
- De fácil mantenimiento
- Válvula de bypass
- Liviano

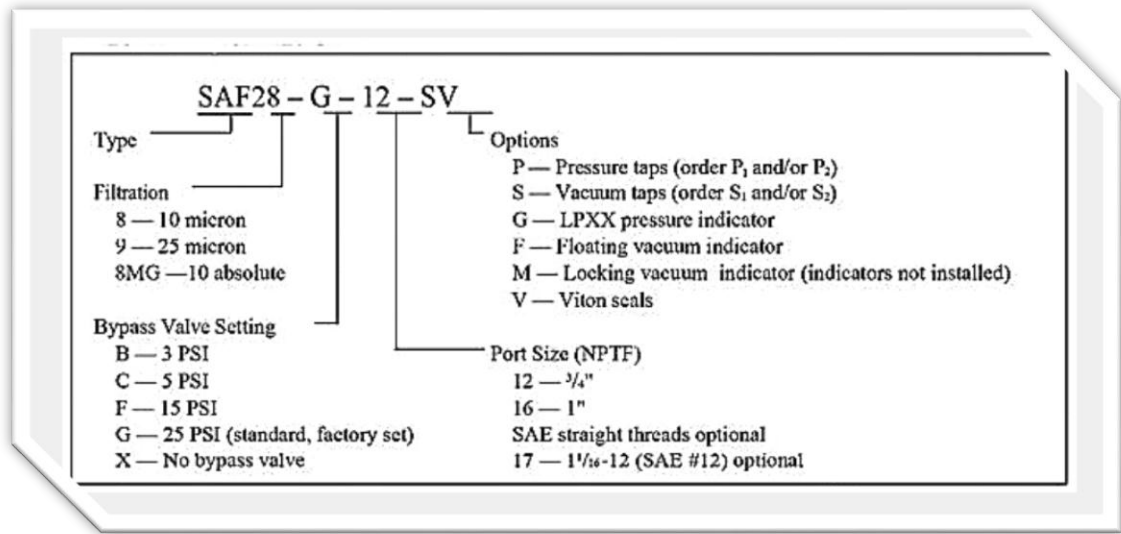
Figura 29. Presión de trabajo del filtro de retorno a tanque



Fuente: MARION FLUID POWER. Spin on filters [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.marionfluidpower.com/filters/spin-on-filters>>

Es importante tener claro que tipo de filtro de retorno escoger dependiendo de la seguridad que se necesite, la MCU tiene un filtro de retorno con un elemento filtrante de 10 micras, la siguiente figura facilita la elección del filtro correcto mencionando las características dependiendo de su referencia.

Figura 30. Información de referencia



Fuente: MARION FLUID POWER. Spin on filters [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.marionfluidpower.com/filters/spin-on-filters>>

3.1.6 Bomba. Es un tipo de bomba hidráulica que consta de dos engranajes encerrados en un alojamiento muy estrecho para transformar la energía cinética en forma de par motor -generada por el motor- en energía hidráulica a través del caudal de aceite generado por la bomba. Este caudal de aceite a presión se utiliza para generar el movimiento del actuador instalado en la MCU.

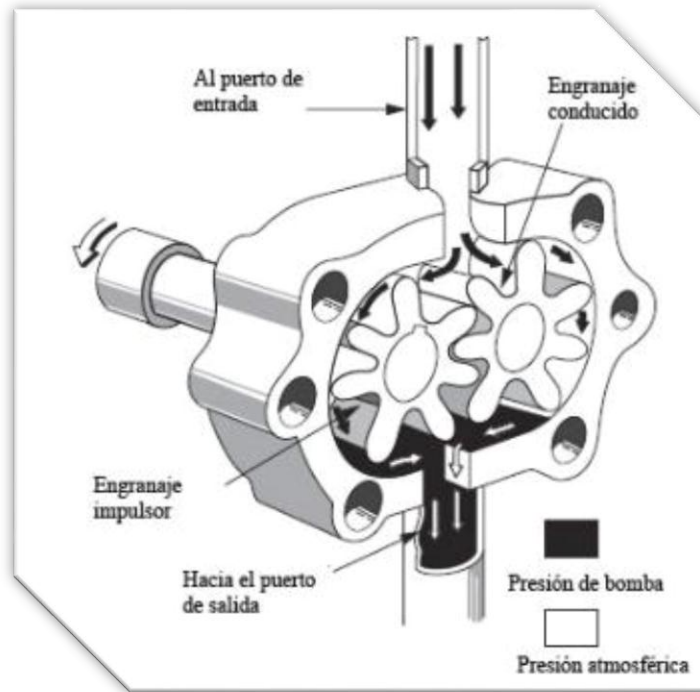
Figura 31. Bomba kompass



Funcionamiento:

Al accionarse la bomba, el aceite entra por el puerto de succión de la bomba debido a la depresión creada al separarse los dientes de uno respecto a los del otro engranaje. El aceite es transportado a través de los flancos de los dientes del engranaje hasta llegar al puerto de descarga, donde, al juntarse los dientes del eje conductor con los del conducido, el aceite es impulsado a presión.

Figura 32. Funcionamiento Bomba Engranajes



Fuente: SAPIENSMAN. Bomba de engranajes [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.sapiensman.com/neumatica/images/bomba-de-engranajes.jpg>>

Las bombas son imprescindibles para transportar fluidos o para establecer condiciones de presión especificadas, el uso de las bombas de engranajes externos en el mercado es muy común debido a que es un producto compacto, potente, robusto y competitivo a nivel de coste, su elemento principal es el par de engranajes acoplados, que está formado por el eje conductor/motor (el que es accionado por el eje del motor) y el eje conducido. El eje conductor hace girar al eje conducido bajo el principio del desplazamiento provocado por el contacto entre los dientes de los engranajes de los ejes.

Conociendo ya que el eje conductor es una parte importante de la bomba, se debe tener claro que hay que dotarlo de protección, por lo que se hace la adquisición de un acople flexible de tipo elastomérico dado que incorpora un componente de caucho que ofrece una resistencia considerable y aporta una vida útil más larga,

también brinda una excelente amortiguación a los choques y facilita una transmisión de potencia suave y silenciosa, por otro lado los cubos están elaborados de una aleación de aluminio para que sea consistente y resistente a la corrosión.

Su montaje es sencillo, solo debe maquinarse el diámetro de cada eje en el cubo y adaptarlo con un prisionero, el componente de caucho es un injerto, lo que hace posible que sea montado después de haber hecho la alineación de los ejes, se debe tener en cuenta que este tipo de acoples solo permiten un máximo de desalineación de 1° , para lo que se debe contar con una buena herramienta de medición.

Figura 33. Alineación motor bomba con acople flexible



3.1.7 Motor. Básicamente es el elemento encargado de generar el par motor necesario para ser transformado posteriormente en energía hidráulica por parte de la bomba.

Se trabaja con un motor siemens de referencia 1LA7114-4YA60, es un motor de 4 polos que trabaja a 60Hz con una velocidad de 1800 revoluciones por minuto, a continuación se cuenta con la descripción de sus partes mediante un despiece que contiene todos sus elementos.

Figura 34. Despiece motor

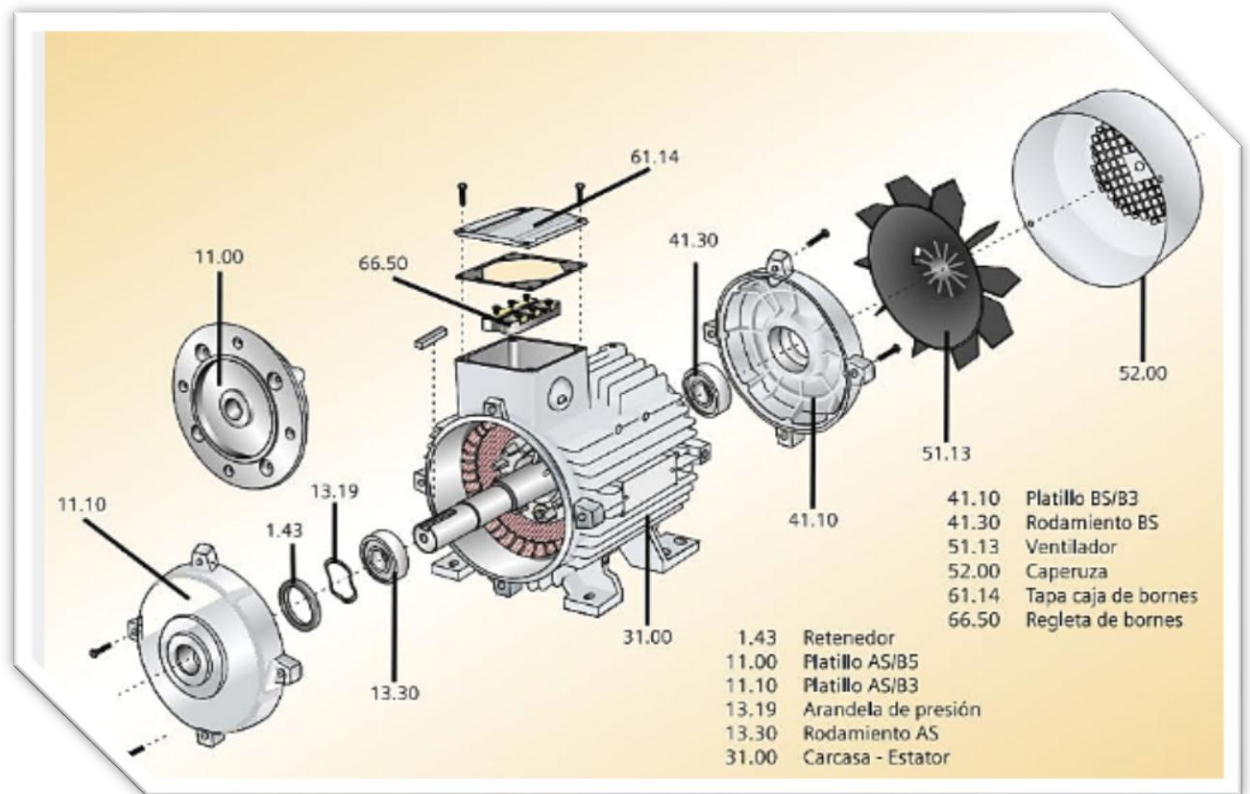
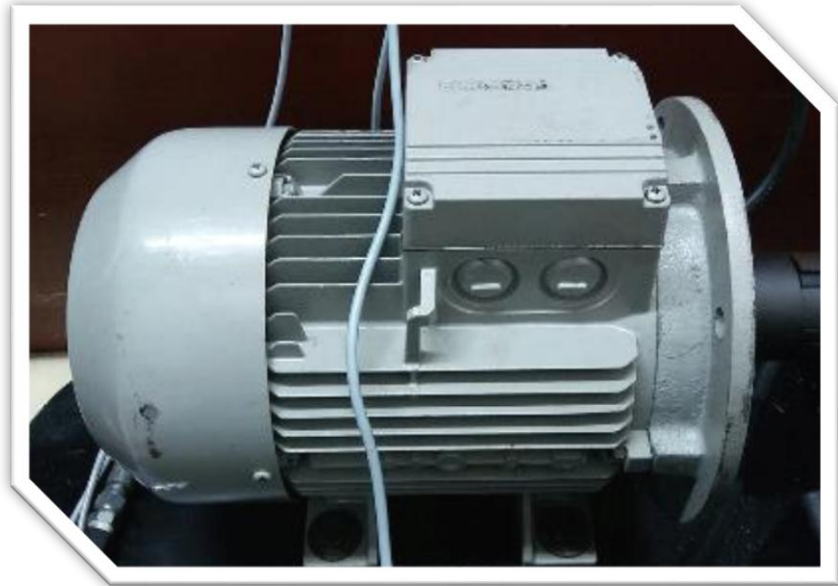


Figura 35. Motor Siemens 7.5 HP



3.1.8 Manómetro

Figura # manómetro

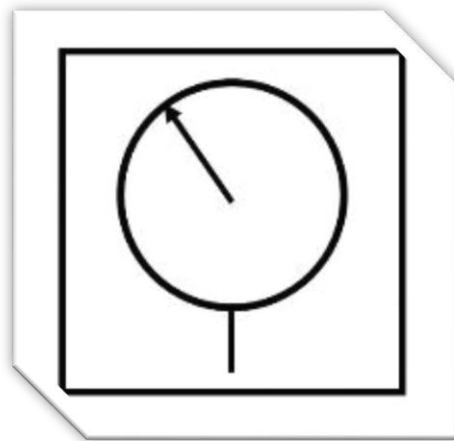


Fuente: EBAC. Manómetro 3000psi [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://tienda.ebac-control.com/47/manometro-0-3000-psi.jpg>>

Un manómetro es un instrumento de medida de la presión en fluidos (líquidos y gases) en circuitos cerrados. Miden la diferencia entre la presión real o absoluta y la presión atmosférica, llamándose a este valor presión manométrica. Lo que realmente hacen es comparar la presión atmosférica (la de fuera) con la de dentro del circuito por donde circula el fluido. Por eso se dice que los manómetros miden la presión relativa. Los manómetros industriales suelen tener una escala graduada que mide la presión, normalmente, en bares, pascales o en psi (fuerza por pulgada cuadrada).

La siguiente figura enseña cómo identificar el manómetro en un circuito hidráulico.

Figura 36. Símbolo hidráulico manómetro



3.1.9 Válvula aisladora de manómetro. Las válvulas aisladoras de manómetro se utilizan para separar el instrumento de medición de presión del resto del sistema en caso de necesitarse algún remplazo o mantenimiento.

Figura 37. Especificaciones manómetro kompass

ESPECIFICACIONES	
MARCA	KOMPASS
SERIE	GCT
CONEXIÓN	1/4" NPT
TIPO	CODO - RECTO

Fuente: HIDRÁULICA & NEUMÁTICA. Válvulas aisladoras de manómetro [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.hnsa.com.co/valvulas-aisladoras-de-manometro/>>

El montaje se realiza en línea con la tubería mediante conexión roscada como se observa en la siguiente figura

Figura 38. Válvula aisladora de manómetro



Fuente: HIDRÁULICA & NEUMÁTICA. Válvulas aisladoras de manómetro [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.hnsa.com.co/valvulas-aisladoras-de-manometro/>>

Tabla 3. Características válvula aisladora de manómetro

MODEL		MAX. OPERATING PRESSURE (kgf/cm ²)	RATED FLOW (l/min)	THREAD PT
180°	90°			
GCT-02	GCLT-02	210	2	1/4"
GCT-03	GCLT-03		20	3/8"
NUL-02	NULL-02	350	2	1/4"
NUL-03	NULL-03		20	3/8"
NUL-04	-----	150	30	1/2"
NUL-05	-----		100	3/4"
NUL-08	-----		300	1"
NU-02	-----		0.5	1/4"
NU-03	-----	150	1.0	3/8"
NU-04	-----		2.0	1/2"

Fuente: KOMPASS. Hydraulic Components [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.kompass.com.tw/product/fa/45-1.htm>>

3.1.10 Mangueras. Las mangueras hidráulicas están sometidas a diferencias de presión durante el funcionamiento y exposición al clima, el sol, agentes químicos, condiciones de operación en alta temperatura o manipulación inapropiada durante el funcionamiento o el mantenimiento.

Las mangueras hidráulicas tienen ventajas sobre los tubos rígidos porque son flexibles, absorben los ruidos, amortiguan las vibraciones, son más fáciles de instalar, no requieren equipo de doblado y amortiguan los impulsos de presión.

Figura 39. Mangueras MCU



Las características típicas a la hora de seleccionar mangueras hidráulicas suelen ser:

- Diámetro
- Presión de trabajo
- Temperatura
- Curvatura

Las mangueras hidráulicas se identifican según su diámetro interior, como medida patrón de referencia. Además, es necesario determinar los parámetros de presión, temperatura, compatibilidad de fluidos, el radio de curvatura, la vida útil y las condiciones ambientales.

Siempre se aconseja poner especial atención al diámetro de la manguera hidráulica, porque de seleccionar una tubería muy reducida, la velocidad excederá los valores recomendados y habrá un flujo turbulento, lo cual incrementará el rozamiento con las paredes de la manguera y, en consecuencia, incrementará la temperatura del aceite y las caídas de presión. Si por el contrario, se opta por una manguera de sección muy grande, el costo total del sistema se verá incrementado.

Hay que recordar que la presión de trabajo del sistema, es fundamental cuando se selecciona una manguera hidráulica porque ésta debe ser capaz de soportar las variaciones de presión pues otorga condiciones de operación seguras, además hay que evitar cualquier variación que pueda representar un peligro.

El radio de curvatura debe ser el menor radio al que puede flexionarse la manguera antes de ejercer una fuerza excesiva que pueda distorsionarla o dañarla, varía según el tipo de construcción de la manguera y se mide siempre sobre la superficie interior de la porción de la curva.

Por último, pero no menos importante, el conector hidráulico seleccionado debe tener una espiga adecuada, capaz de soportar las presiones de trabajo sin desprenderse de la manguera.

La MCU posee mangueras de alta presión con las características descritas a continuación.

Manguera hidráulica fabricada bajo Norma SAE 100R2AT

- Uso: En equipo y maquinarias de construcción, agrícolas, mineras y transporte en general, en líneas de alta presión, para el transporte de aceites minerales, hidráulicos, emulsiones de agua y aceite.
- Resiste temperaturas entre -40° y $+100^{\circ}$ C máximo y en lapsos cortos de hasta 125° C

- Tubo interior: De caucho sintético resistente a los aceites
- Refuerzo: Dos mallas trenzadas de alambre de acero endurecida y templado
- Cubierta: Caucho sintético resistente a la abrasión e intemperie.

3.1.11 Aceite. La correcta lubricación de los mecanismos de un equipo permite que estos alcancen su vida de diseño y que garanticen permanentemente su disponibilidad. Es muy importante, por lo tanto que el personal encargado de la lubricación de los equipos y quienes están a cargo de la administración y actualización de los programas de lubricación estén en capacidad de seleccionar correctamente el aceite partiendo de los parámetros de diseño del mecanismo como cargas, velocidades, temperaturas, medio ambiente en el cual trabaja el equipo, etc. La MCU es accionada por aceite hidráulico ISO 46 con las siguientes especificaciones.

Figura 40. Clasificación aceites ISO industriales

Grado ISO	Límites de viscosidad					
	cSt/40 °C		SSU/100 °F		SSU/210 °F	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
2	1,98	2,42	32,8	34,4		
3	2,88	3,52	36,0	38,2		
5	4,14	5,06	40,4	43,5		
7	6,12	7,48	47,2	52,0		
10	9,00	11,00	57,6	65,3	34,6	35,7
15	13,50	16,50	75,8	89,1	37,0	38,3
22	19,80	24,20	105,0	126,0	39,7	41,4
32	28,80	35,20	149,0	182,0	43,0	45,0
46	41,40	50,60	214,0	262,0	47,1	49,9
68	61,20	74,80	317,0	389,0	52,9	56,9
100	90,00	110,00	469,0	575,0	61,2	66,9
150	135,00	165,00	709,0	871,0	73,8	81,9
220	198,00	242,00	1047,0	1283,0	90,4	101,0
320	288,00	352,00	1533,0	1881,0	112,0	126,0
460	414,00	506,00	2214,0	2719,0	139,0	158,0
680	612,00	748,00	3298,0	4048,0	178,0	202,0
1000	900,00	1100,00	4864,0	5975,0	226,0	256,0
1500	1350,00	1650,00	7865,0	9079,0	291,0	331,0

Fuente: MANTENIMIENTO MUNDIAL. Selección correcta de un aceite industrial [en línea].
Disponble en Internet: <URL: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/bo2.pdf>>

3.2 ESTRUCTURA DE CALIBRACIÓN DE LA MCU

La MCU básicamente es un dispositivo para aplicar simultáneamente una fuerza a un estándar de alta exactitud de calibración; su estructura está compuesta básicamente por 4 columnas unidas a dos placas, las cuales aportan un soporte fijo; ubicado en la placa superior está el cilindro hidráulico que transmitirá la energía hidráulica al pistón que a su vez transformará esta energía en energía mecánica, ésta se usará para calibrar las celdas de carga. Adicional a esto posee dos zonas de trabajo, la zona de calibración a tensión y la zona de calibración a compresión. Para el desplazamiento del yugo superior tiene un sistema de transmisión de yugo móvil que se mostrará posteriormente. Esta estructura de calibración se desarrolló en proyectos anteriores a este.

Figura 41. Estructura de calibración MCU

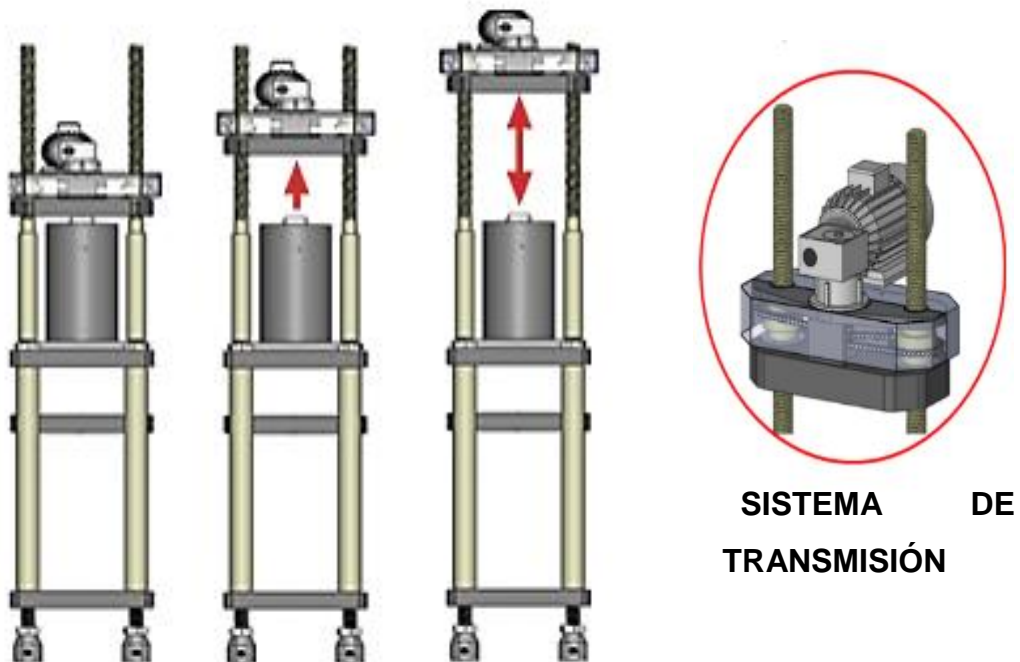


3.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DEL YUGO MOVIBLE

Este sistema de transmisión fue diseñado anteriormente como tesis de grado anexa al presente, titulada DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSMISIÓN DEL CONJUNTO DEL YUGO MOVIBLE DE UNA MÁQUINA DE CALIBRACIÓN DE FUERZA UNIVERSAL; y se realizó específicamente para variar los límites de las zonas de operación de la máquina, como lo es el acercamiento hacia la celda de carga patrón, así como se puede observar en la figura 42.

Este sistema tiene una velocidad de avance vertical del yugo superior de 7cm/min. Este movimiento implica vencer la carga generada por el peso de 62Kg del sistema de transmisión de yugo móvil.

Figura 42. Movimiento sistema de transmisión yugo superior



4. CELDA DE CARGA PATRÓN

La MCU cuenta con tecnología de punta en cuanto a sensado de carga se refiere, ya que posee una celda de carga FUTEK (empresa pionera en el diseño y desarrollo de sensores para diversas industrias, incluyendo la aeroespacial, médica, automotriz y manufactura) de referencia LCF 550, la cual ha sido certificada con los más altos estándares de medición por parte de sus fabricantes. Esta es la encargada de detectar la carga real aplicada en el sistema, y además envía al autómatas una señal equivalente a dicha fuerza, logrando así un sensado preciso y confiable que permite el control de la misma.

Figura 43. Celda de carga FUTEK LCF 550



Fuente: SENSEL MEASUREMENT. ICF450-ICF700 Tension compression compression pancake load cell [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.sensel-measurement.fr/201-large_default/lcf450-lcf700-tension-compression-pancake-load-cell.jpg>

Algunas de las características de la Celda de carga patrón son:

- Capacidad: 100.000 Lbf (444.8 KN)
- Valor característico (R.O): 4mV/V nom.
- Histéresis: +/-0.2% de R.O
- Temperatura de operación: -50 a 93°C
- Peso: 25 Lb
- Excitación en calibración: 10 VCD

4.1 ACCESORIOS DE ACOPLE CELDA DE CARGA PATRÓN

Para un funcionamiento óptimo y seguro de la Celda de carga patrón fue necesario diseñar y construir un sistema de accesorios de acople los cuales brindan estabilidad al conjunto de medición y además garantizan que la fuerza sobre la celda sea axial.

En los siguientes párrafos se da a conocer cuáles fueron los pasos para llevar a cabo el diseño de las piezas de acople para la celda de carga patrón.

El sistema de acople se subdivide en 4 piezas, un bloque de apoyo de alineación, un botón de carga esférica, un conector de alineación y un adaptador de alineación, llamadas así bajo la recomendación de MOREHOUSE, empresa que fabrica y distribuye a nivel mundial máquinas de este tipo.

4.1.1 Bloque de apoyo de alineación. El diseño del bloque de alineación se llevó a cabo siguiendo los pasos descritos en la página número 28 de ACCESSORIES & ADAPTORS FOR MOREHOUSE UNIVERSAL CALIBRATING MACHINES del año 2009. La función de esta pieza es básicamente ser el apoyo que tiene el yugo móvil para hacer el contacto con el botón de carga esférica.

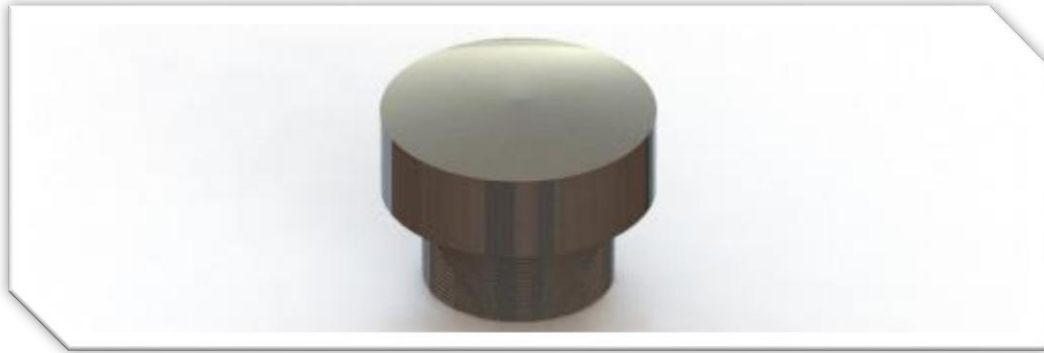
Figura 44. Bloque de apoyo de alineación



4.1.2 Botón de carga esférica. El botón de carga esférica fue diseñado según los estándares de calidad otorgados por el libro ACCESSORIES & ADAPTORS FOR MOREHOUSE UNIVERSAL CALIBRATING MACHINES del año 2009, en su página 19.

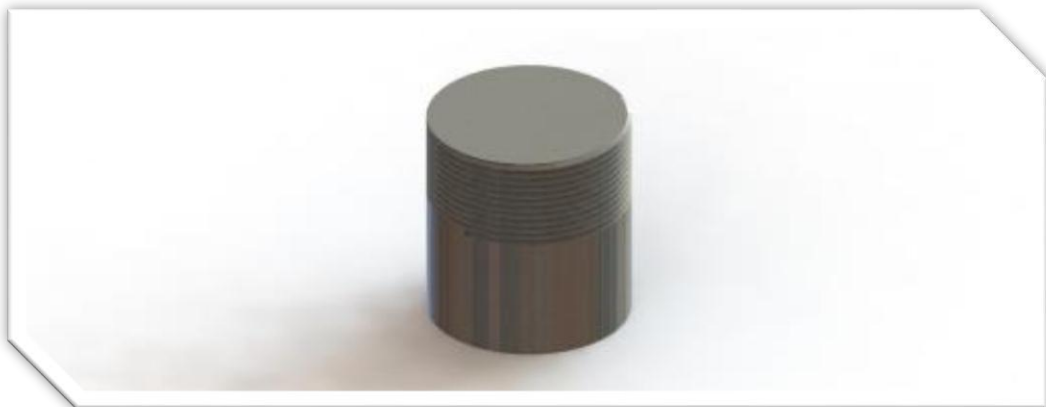
La función de esta pieza es distribuir la carga aplicada a la celda de carga uniformemente sobre su superficie para obtener la máxima precisión a la hora de realizar tomas de datos.

Figura 24. Botón de carga esférica



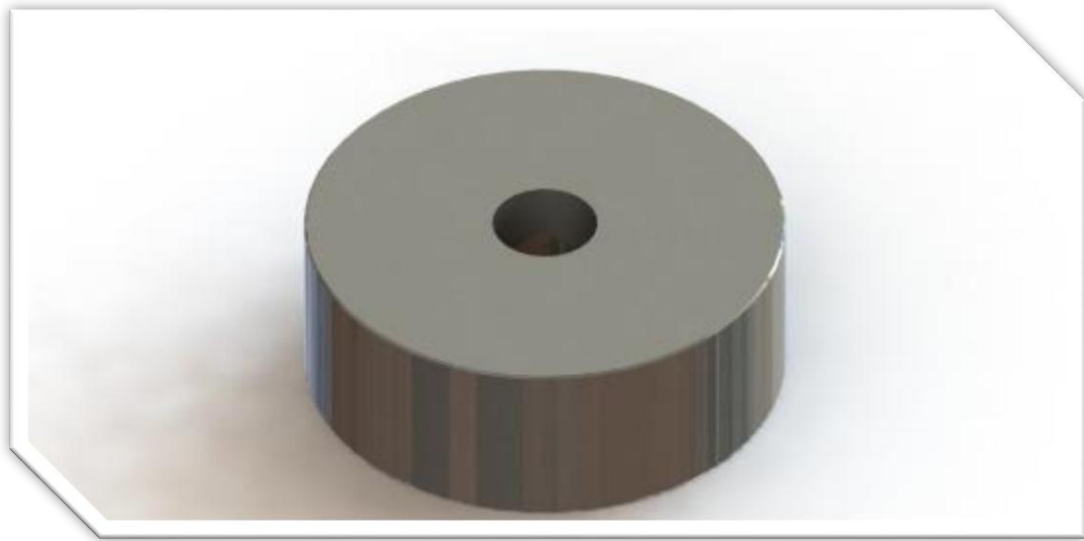
4.1.3 Conector de alineación. Para el diseño de esta pieza se consultó la página 32 del manual guía ACCESSORIES & ADAPTORS FOR MOREHOUSE UNIVERSAL CALIBRATING MACHINES del año 2009. Esta pieza se rosca a la celda de carga para posteriormente ser ajustada al adaptador de alineación para conservar una linealidad de la fuerza aplicada.

Figura 45. Conector de alineación



4.1.4 Adaptador de alineación. El diseño de esta pieza fue llevado a cabo como se describe en la página 32 de ACCESSORIES & ADAPTORS FOR MOREHOUSE UNIVERSAL CALIBRATING MACHINES del año 2009. La función de esta pieza es brindar un apoyo sólido al pistón para empujar la celda de carga hacia el yugo móvil y lograr la compresión deseada de manera muy segura y estable.

Figura 46. Adaptador de alineación



Todas las piezas fueron diseñadas para soportar un máximo de 100.000 libras fuerza por lo que se escogió el acero 4140 como material para la fabricación de las mismas pues sus elementos de aleación incluyen cromo y molibdeno, (Cr [0.40-1.20 %], Mo [0.08-0.25 %]) y como resultado de estos materiales se tiene una fuerza excelente al cociente de peso y es considerablemente más fuerte y más duro que el estándar 1020 de acero. No es tan ligero como una aleación de aluminio, pero tiene la ventaja de una alta resistencia a la tracción y alta ductilidad.

Conociendo de esta manera ya todos los elementos que hacen parte del acople de la celda de carga patrón, se procede a enseñar una imagen del montaje en el sistema de calibración:

Figura 47. Explosión del montaje de la celda de carga patrón



4.2 ENLACE CELDA DE CARGA-AUTÓMATA

Para realizar un control del sistema, es necesario tener un enlace entre la celda de carga patrón y el automático, esto es posible gracias al módulo de pesaje Siwarex U de Siemens.

4.2.1 Módulo de pesaje Siwarex U. SIWAREX U es un módulo de pesaje completo y flexible que se puede utilizar en todas partes donde debe actuar una báscula estática en el sistema de automatización SIMATIC S7.

En cualquier lugar donde se realicen mediciones con sensores como celdas de carga, sensores dinamométricos o medidores de par, SIWAREX U es la mejor solución. Por ejemplo, para el control del nivel en silos y depósitos, en la vigilancia de cargas de una grúa. Esto significa, que en cualquier proceso industrial donde se deba detectar pesos, una de las opciones para realizar mediciones con celdas de carga es el SIWAREX U.

Su funcionamiento es simple, a partir de un valor digital el Siwarex U calcula el valor de peso real en la celda de carga; y sus características principales son:

- Técnica de montaje uniforme y comunicación continua gracias al uso en SIMATIC S7
- Planificación uniforme con el administrador de SIMATIC
- Alta precisión 0,05 %
- Alta frecuencia de medición de 50 Hz
- Vigilancia de los valores límite
- Adaptación flexible a diferentes requisitos con el control SIMATIC
- Posibilidad de ajuste teórico sin pesos patrón
- Funciones de diagnóstico integradas en SIMATIC S7

Figura 48. SIWAREX U



Fuente: SIEMENS. Siwarex U [en línea]. Disponible en Internet: <URL:http://w3.siemens.com/mcms/sensorsystems/SiteCollectionImages/wt/Productpics/siwarexu_z.jpg>

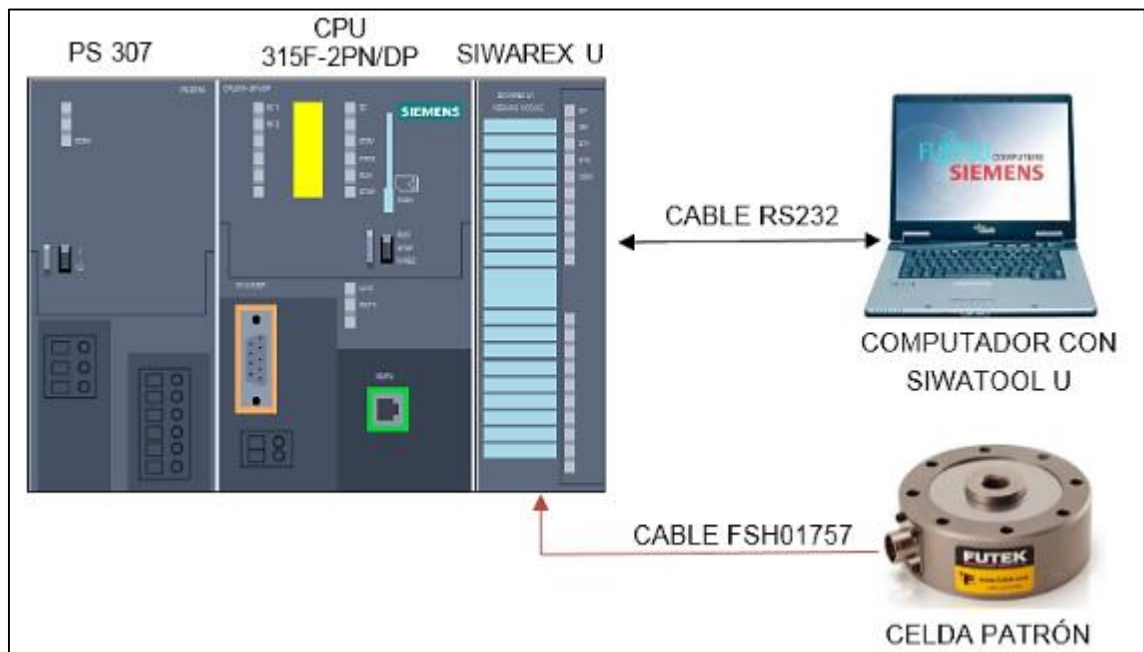
4.2.2 Requerimientos de montaje Siwarex U. El hardware y software requerido para realizar el enlace celda-automata es el mostrado en la figura 49.

Figura 49. Requerimientos para enlace celda-automata



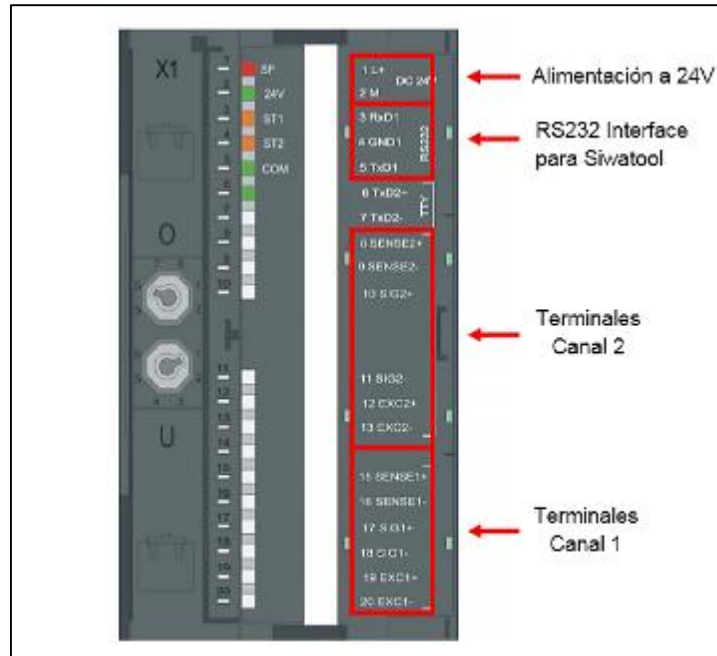
Para este proyecto se utilizó una CPU 315F-2 PN/DP, a la cual se le incorpora el módulo pesaje SIWAREX U. Para las respectivas conexiones entre el SIWAREX U y la celda de carga se realizaron mediante las recomendaciones que se encontraron en el manual del SIWAREX U. El sistema de adquisición de datos está configurado de la siguiente manera.

Figura 50. Configuración del montaje Celda-Autómata



4.2.3 Conexión celda de carga-Siwarex U. El montaje y cableado del módulo El Siwarex U es muy reducido. La conexión de la de carga, la alimentación eléctrica y de las interfaces en serie tiene lugar a través del enchufe frontal de 20 polos. El funcionamiento de SIWAREX U en SIMATIC permite la integración completa de la técnica de pesaje en el sistema de automatización.

Figura 51. Conector frontal Siwarex U



Fuente: Manual Siwarex U, SIEMENS

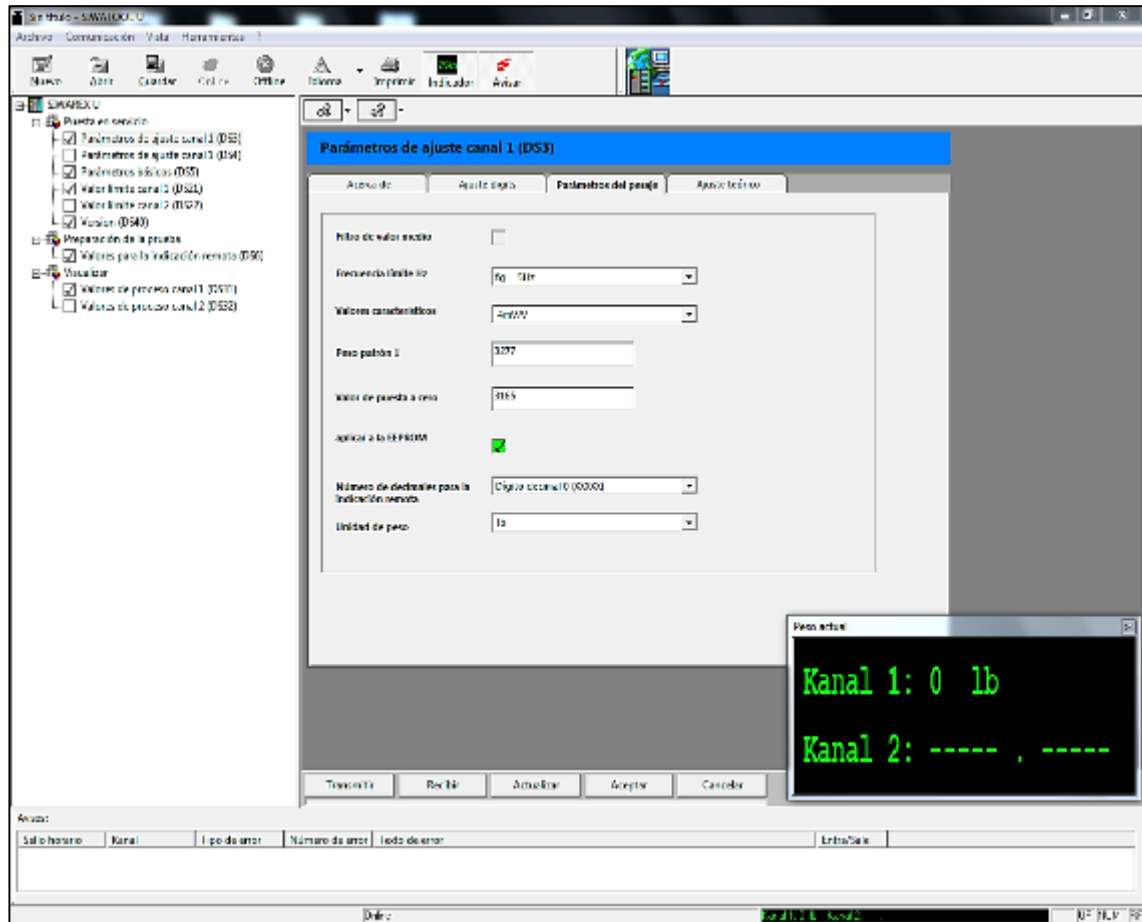
La celda de carga patrón está conectada a los terminales del canal 1 del Siwarex U, y sus seis hilos conectores están diferenciados por colores para ayudar a establecer las conexiones correctas con el dispositivo de ajuste.

Tabla 4. Conexión de los hilos de la celda en el Siwarex U

COLOR	FUNCIÓN
Rojo	EXC +
Negro	EXC -
Blanco	SIG +
Verde	SIG -
Naranja	SENSE +
Azul	SENSE -

4.2.4 Software Siwatool U. Para el ajuste de la celda de carga mediante el Siwarex U existe un programa especial llamado SIWATOOL U. Este programa permite al especialista en pesaje la puesta en servicio de la báscula. La siguiente figura muestra la ventana de operación en el software Siwatool.

Figura 52. Ventana de operación Siwatool U



Fuente: Siwatool U, Siemens

4.3 AJUSTE DE LA CELDA DE CARGA PATRÓN

La celda de carga patrón cuenta con un ajuste realizado según las recomendaciones dadas en el manual del módulo de pesaje Siwarex U. Este ajuste permite establecer los parámetros de trabajo de la celda de carga patrón en el sistema, los cuales son

cargados en el módulo de pesaje para que haya sincronía entre él y la celda de carga.

4.3.1 Método de ajuste con peso patrón. Para el ajuste de la celda de carga patrón con el módulo de pesaje Siwarex U, Siemens ofrece dos métodos prácticos, los cuales se ejecutan por medio del software SIWATOOL U. Estos métodos de ajuste son: El método de ajuste teórico y el método de ajuste con peso patrón. El ajuste teórico es funcional para celdas con capacidad nominal menor a 32767 Lbf, ya que la celda de carga patrón de la MCU posee una capacidad nominal de 100.000 Lbf, es necesario calibrarla por el método de ajuste con peso patrón.

El ajuste con peso patrón consiste en realizar una calibración diagonal, lo que significa que a partir de un peso de referencia cargado en el Siwarex U, se somete la celda de carga desde 0 Lbf hasta el peso de referencia o patrón. Esto se hace para que el Siwarex U calcule la línea característica de la celda de carga que está siendo ajustada, definiendo así el comportamiento de la misma en el rango total de capacidad que posee.

Según el manual del Siwarex U, este método de ajuste se realiza teniendo en cuenta ciertos parámetros como lo son:

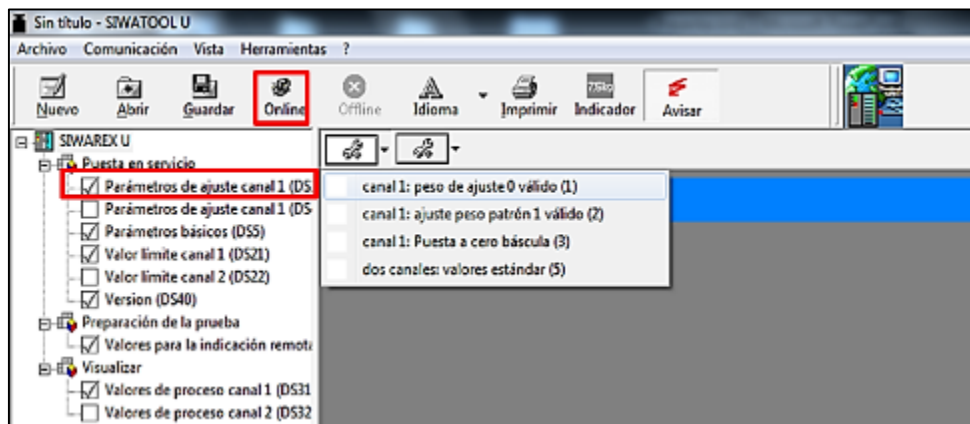
- Frecuencia límite: Esta es la velocidad de reacción que va a tener el Siwarex U respecto a los cambios detectados en la celda de carga patrón. El valor máximo es 5 Hz y el valor mínimo es 0,05 Hz.
- Valor característico: es definido por el tipo de celda de carga. En el caso de la celda patrón de la MCU es 4 mV/V.
- Peso patrón 1: Este valor según el manual del Siwarex U, tiene que ser mayor al 5% de la capacidad nominal de la celda de carga. Además el máximo valor que el Siwarex U puede leer es 32767, si la celda supera este valor se debe crear una escala que permita su correcta lectura.

- Valor de puesta a cero: este valor es calculado por el Siwaxex U, por lo que en el momento del ajuste se introduce como cero.
- Número de decimales: Este valor se usa para la opción de indicación remota, en este caso se deja como Dígito Decimal 0.
- Unidad de peso: Define la unidad de trabajo el sistema. En el caso de la MCU Lbf.

Una vez establecida la comunicación celda-autómata, los pasos que se deben seguir para realizar un ajuste exitoso de la celda de carga usando el software Siwatool U son los siguientes:

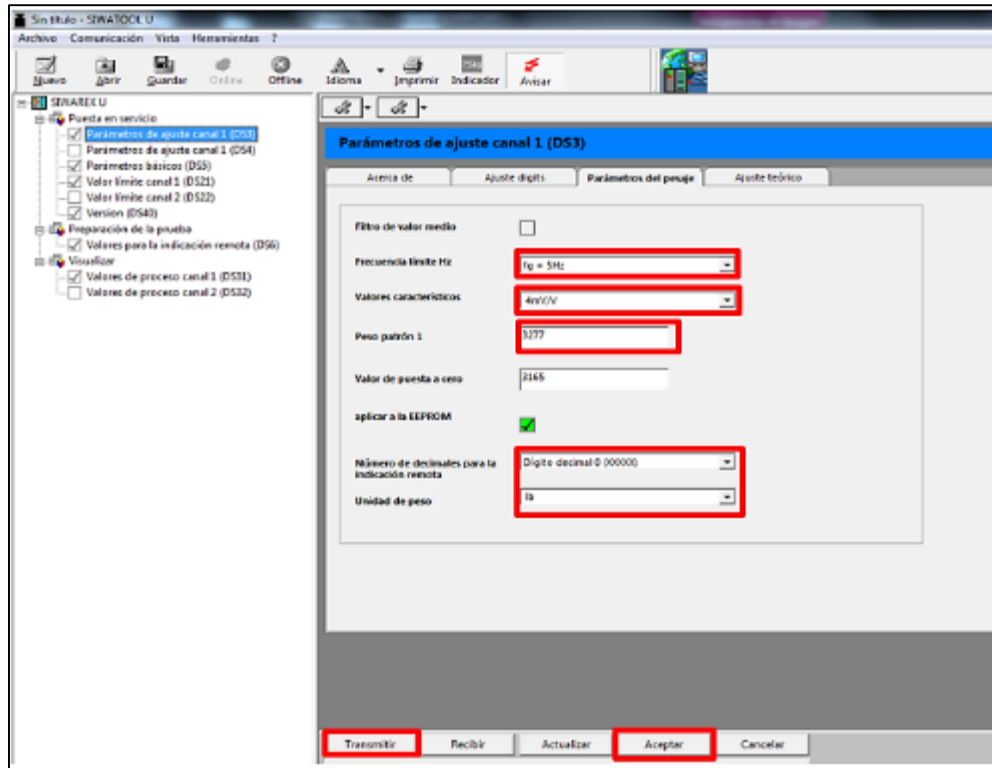
- En el software Siwatool U pulsar conexión online y luego seleccionar la opción Parámetros de ajuste canal 1(DS3). Ver figura 53.

Figura 53. Pasos iniciales de ajuste en entorno Siwatool U



- Lo siguiente es introducir los parámetros descritos anteriormente y pulsar Aceptar y luego Transmitir. Ver figura 54.

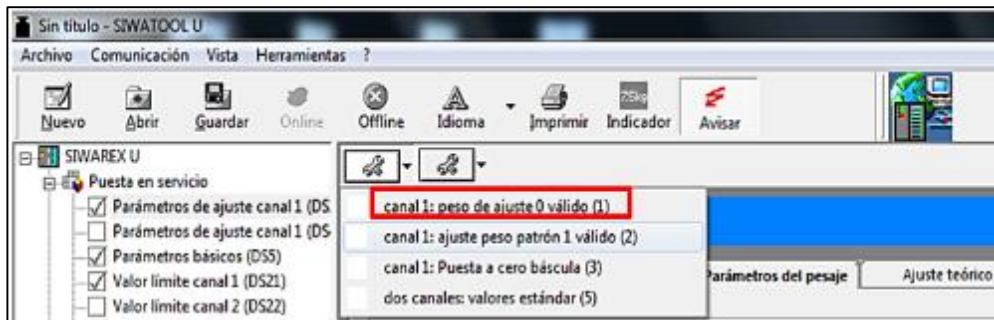
Figura 54. Cargar parámetros de ajuste en entorno Siwatool U



El proceso siguiente se lleva a cabo mientras la celda de carga que va a ser ajustada es sometida al peso patrón requerido, y el ajuste se da cargando estos valores mediante los siguientes selectores del Siwatool U para el canal 1 (ver figura 55):

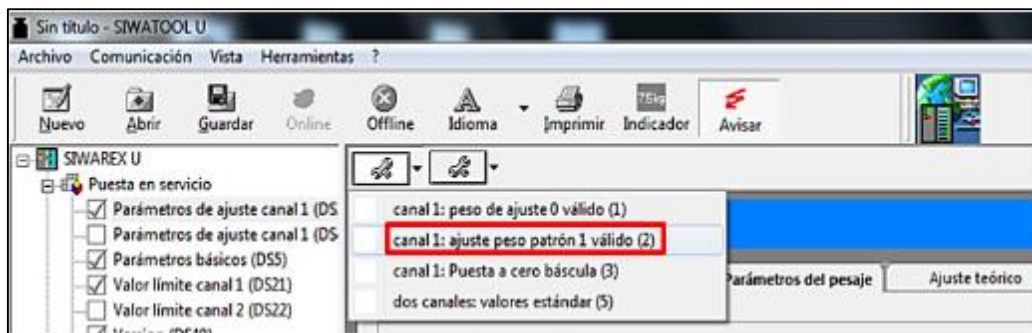
- Peso de ajuste 0 válido (1): Este comando se debe ejecutar antes de someter la celda de carga a un peso. Al hacerlo el módulo SIWAREX U mostrará el valor del peso "0".

Figura 55. Comando peso de ajuste cero



- Ajuste peso patrón válido (2): Cuando la celda reciba el peso de ajuste establecido para la escala, se ejecuta el comando Peso patrón válido (2). Con la ejecución de este comando, la línea de ajuste es detectada y escalada. El módulo SIWAREX U muestra ahora el peso de ajuste.

Figura 56. Comando ajuste peso patrón



- Puesta a cero báscula (3): Con este comando se carga el valor de peso donde la celda de carga medirá cero Lbf.
- Valores estándar (5): Este comando se ejecuta para borrar todos los datos que estén en el Siwarex U, al hacer esto se restablece el módulo a sus características de fábrica.

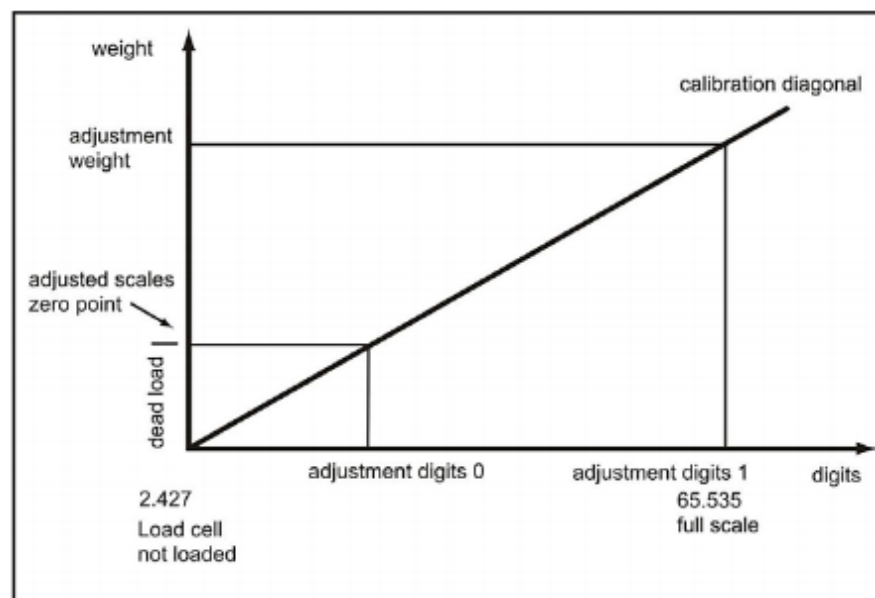
4.3.2 Comportamiento del Siwarex U y Valores límites del ajuste. Para realizar un ajuste exitoso de la celda de carga, es necesario tener conocimiento del comportamiento interno del módulo Siwarex U, así como los valores límites de este. Sabiendo esto se procede a describir los valores que definen y limitan globalmente el comportamiento de Siwarex U, según el manual de este dado por Siemens:

- Dígitos: Es la señal analógica procedente de la celda de carga que ha sido transformada en un valor digital por medio de un conversor analógico-digital, el cual es interno en el módulo Siwarex U.

Estos valores tienen un rango de 0 dígitos hasta 65.535 dígitos

- Peso: Es la unidad de valor real de peso registrado por el Siwarex U, y estos valores son aceptables para un rango de 0 hasta 32.767 unidades de peso. El comportamiento interno del Siwarex U y el proceso de ajuste se puede observar en la figura 57.

Figura 57. Dígitos de ajuste y valor de peso para cálculo de línea característica



Fuente: Manual Siwarex U, SIEMENS

4.3.3 Ajuste de la celda de carga patrón usando máquina universal de ensayos MTS 810. La celda de carga patrón de la MCU fue sometida a un ajuste con peso patrón realizado en los laboratorios de ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, donde cuenta con una máquina de ensayos Material Test System de referencia MTS – 810 Teniendo el montaje completamente hecho y perfectamente acoplado se procedió a realizar los primeros ensayos de calibración, usando los equipos, programas y métodos anteriormente descritos. Estas pruebas se llevaron a cabo teniendo en cuenta parámetros bases como:

- Para realizar escala máxima, se estableció que: 100.000 Lbf = 32767 unidades de peso
- Peso Patrón: Se definió con el 10% de la capacidad nominal de la celda de carga patrón, lo cual es: 10.000 Lbf = 3277 unidades de peso (valor cargado al Siwarex U)

Figura 58. Montaje máquina de ensayos MTS-810



Para lograr una prueba exitosa y un análisis exacto, debieron ser tenidos en cuenta varios aspectos de programación los cuales fueron necesarios para registrar los datos leídos por el Siwarex U, y además la MTS-810 proporcionó los datos que ella obtuvo, esto con el fin de hacer una comparación entre estos registros.

A continuación se muestra el proceso de ajuste de la celda de carga patrón:

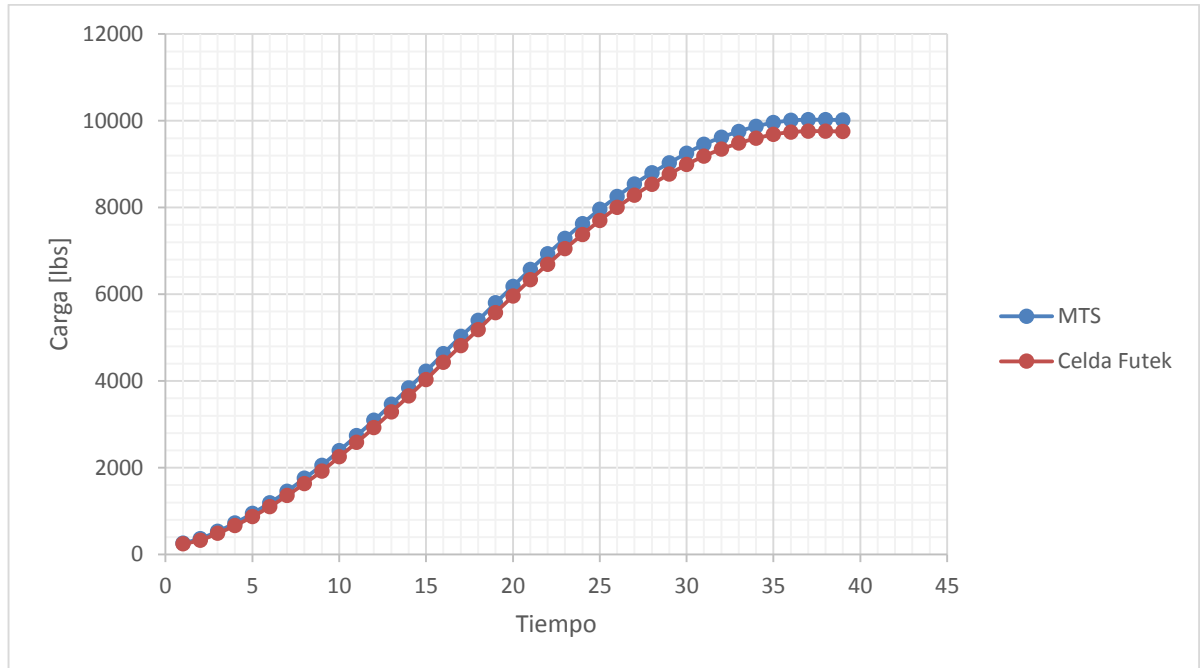
Primero se tabula la conversión de datos, en el caso de la MTS se pasa de KN a Lbf y en caso de la celda de carga usada en el proyecto de grado se pasa de unidades de medida en el PLC a Lbf.

Tabla 5. Registro MTS vs CELDA FUTEK

MTS		CELDA FUTEK	
KN	Lb	Unidades	Lb
1,17	263,02653	80	244,148076
1,624	365,089816	108	329,599902
2,366	531,898094	159	485,244301
3,223	724,559407	219	668,355358
4,206	945,546654	285	869,77752
5,294	1190,13885	361	1101,71819
6,481	1456,98713	445	1358,07367
7,813	1756,43272	536	1635,79211
9,149	2056,77754	630	1922,6661
10,649	2393,99104	738	2252,266
12,190	2740,42171	846	2581,8659
13,747	3090,44932	958	2923,67321
15,392	3460,26013	1077	3286,84347
17,074	3838,38887	1197	3653,06558
18,799	4226,18439	1321	4031,4951
20,602	4631,51502	1451	4428,23572
22,361	5026,95405	1577	4812,76894
24,015	5398,78814	1699	5185,09476
25,797	5799,39777	1827	5575,73168
27,502	6182,69712	1952	5957,21305
29,226	6570,26783	2076	6335,64257
30,829	6930,63666	2192	6689,65728
32,412	7286,50931	2309	7046,72384
33,933	7628,4438	2417	7376,32374
35,388	7955,54089	2524	7702,87179
36,710	8252,73839	2622	8001,95318
38,001	8542,96681	2714	8282,72347
39,131	8797,00098	2797	8536,0271
40,153	9026,75578	2873	8767,96777
41,155	9252,0144	2946	8990,75289
42,057	9454,79211	3009	9183,0195
42,774	9615,98017	3062	9344,7676
43,387	9753,78808	3107	9482,10089
43,912	9871,81281	3144	9595,01938
44,286	9955,89137	3173	9683,52306
44,520	10008,4967	3191	9738,45637
44,588	10023,7837	3198	9759,81933
44,584	10022,8845	3198	9759,81933
44,568	10019,2875	3196	9753,71563

Luego se grafican las curvas para poder observar el comportamiento de la carga aplicada a la celda en el dominio del tiempo.

Gráfico 1. Carga MTS vs CELDA FUTEK



Debido a que la gráfica no es lineal en todo el tiempo de toma de datos, se toma la parte lineal para realizar la caracterización de la Celda Futek a partir de los datos que nos da la MTS.

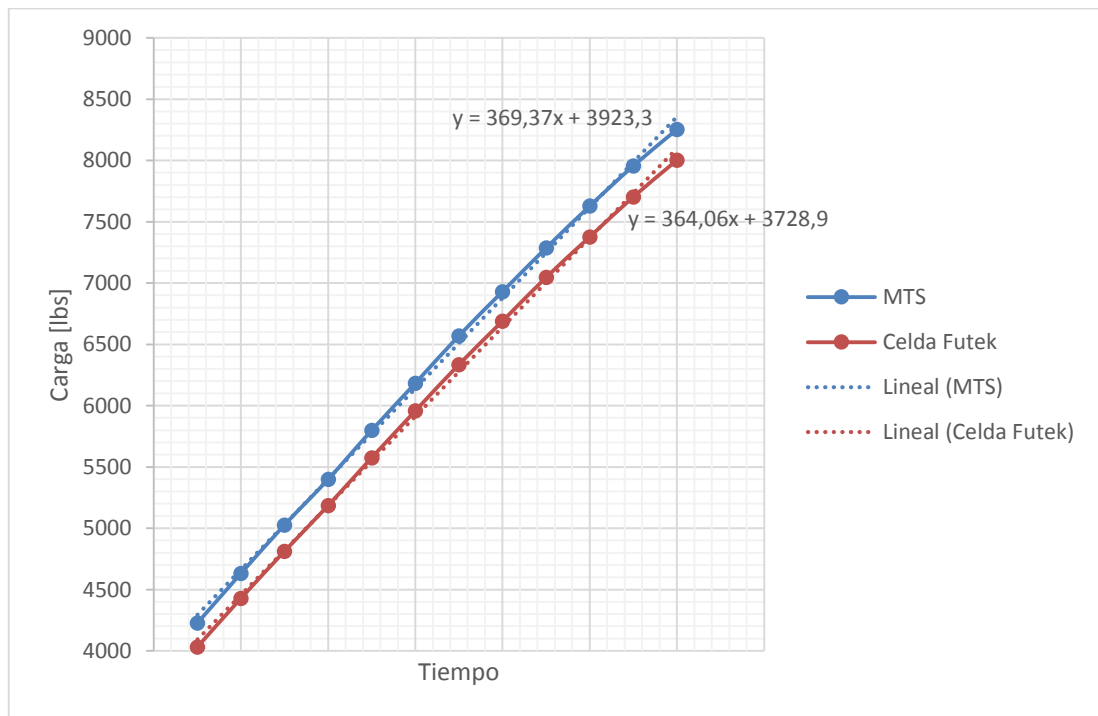
El grupo de datos tomado para realizar la caracterización es el siguiente:

Tabla 6. Datos para caracterización

MTS	Celda Futek
4226,18439	4031,4951
4631,51502	4428,23572
5026,95405	4812,76894
5398,78814	5185,09476
5799,39777	5575,73168
6182,69712	5957,21305
6570,26783	6335,64257
6930,63666	6689,65728
7286,50931	7046,72384
7628,4438	7376,32374
7955,54089	7702,87179
8252,73839	8001,95318

Estos datos se pueden analizar de una mejor forma al graficar.

Gráfico 2. Gráfica de caracterización



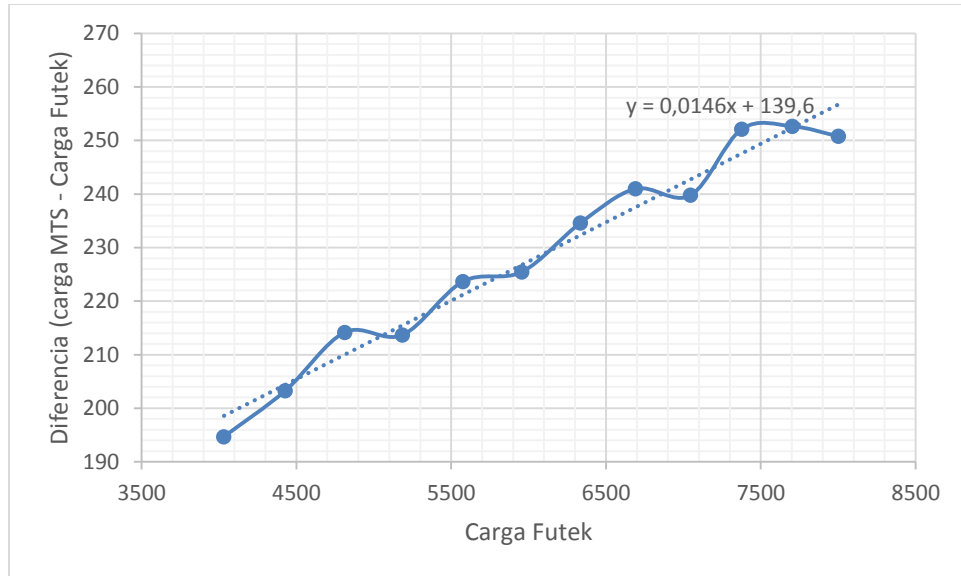
En la gráfica se observa que al aumentar la carga la diferencia entre el valor de la carga de la MTS y el valor de la celda FUTEK aumenta positivamente, esto se debe tomar en cuenta debido que a cargas mayores se obtienen valores más grandes de error, para corregir esto se debe tomar en cuenta a tasa a la cual la diferencia va aumentando.

Ahora se toma la diferencia entre la MTS y la celda Futek y se realiza una gráfica (Diferencia vs carga Futek) para obtener una relación entre el valor real de la carga y el de la celda Futek.

Tabla 7. Diferencia de carga MTS y Futek

MTS	Celda Futek	Diferencia
4226,18439	4031,4951	194,689289
4631,51502	4428,23572	203,279293
5026,95405	4812,76894	214,185105
5398,78814	5185,09476	213,693375
5799,39777	5575,73168	223,666092
6182,69712	5957,21305	225,484068
6570,26783	6335,64257	234,625267
6930,63666	6689,65728	240,979384
7286,50931	7046,72384	239,78547
7628,4438	7376,32374	252,120057
7955,54089	7702,87179	252,6691
8252,73839	8001,95318	250,785205

Gráfico 3. Diferencia de carga MTS y Futek



La diferencia entre la carga de la MTS y la carga de la Futek ahora queda en función de la carga de la celda Futek. Es decir:

$$\Delta Cargas = Carga_{MTS} - Carga_{Futek} = f(Carga_{Futek}) = (0,0146Carga_{Futek}) + 139,6$$

$$Carga_{MTS} - Carga_{Futek} = (0,0146Carga_{Futek}) + 139,6$$

$$Carga_{MTS} = (0,0146Carga_{Futek}) + 139,6 + Carga_{Futek}$$

$$Carga_{MTS} = (1,0146Carga_{Futek}) + 139,6$$

Y debido a que la carga real que es soportada por la celda es igual a la suministrada por la MTS entonces:

$$Carga_{real} = (1,0146Carga_{Futek}) + 139,6$$

Y para poder utilizar esta ecuación en SCL (lenguaje de programación en PLC's siemens) es necesario pasar el valor de la carga_{futek} a unidades propias reconocibles por el PLC.

$$Carga_{Futek} = \frac{Unidades * 100000}{32767}$$

Es decir, una unidad leída en el PLC y la cual será la resolución es 3,05 lbs

Reemplazando en la ecuación de carga_{real} se tiene:

$$Carga_{real} = \left(1,0146 * \frac{Unidad * 100000}{32767} \right) + 139,6 = (3,096 * unidades) + 139,6$$

$$Carga_{real} = (3,096 * unidades) + 139,6$$

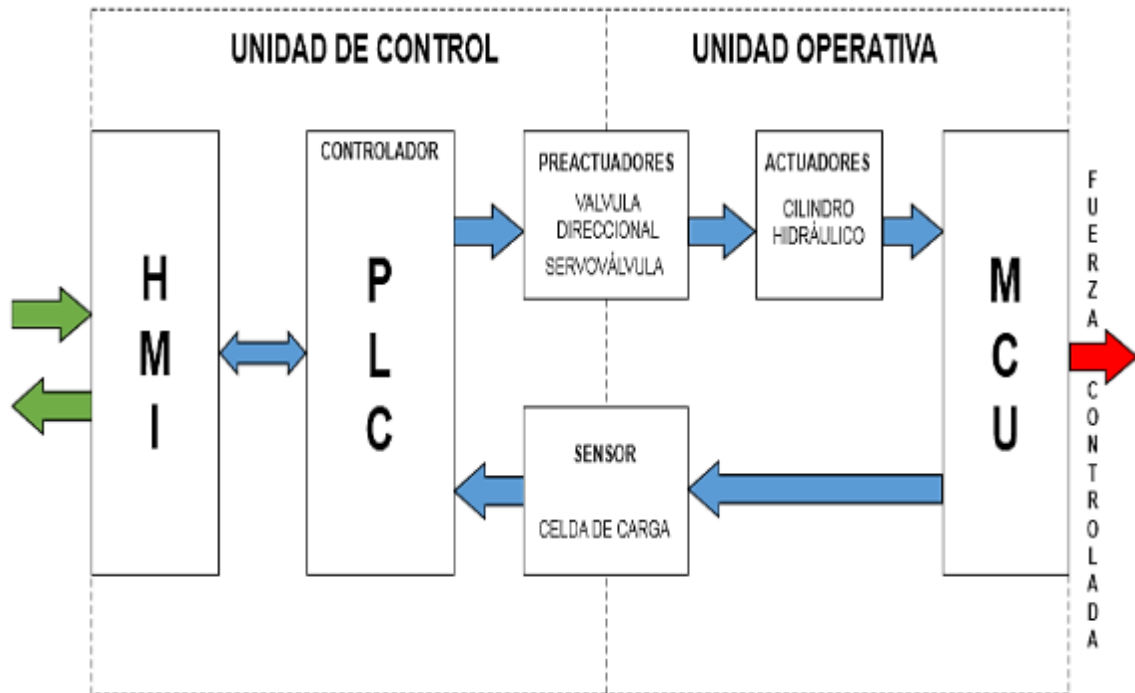
5. UNIDAD DE CONTROL

Para llegar al concepto de automatización, la MCU posee la unidad de control, que se puede decir es el cerebro de la máquina, y está dividido en dos subconjuntos, el hardware o parte física, y el software y programación.

Con los componentes exactos e idóneos más una programación acertada y flexible, la MCU se encuentra en un nivel industrial en cuanto a funcionamiento y tecnología de automatización, esto será evidenciado en los siguientes párrafos.

Antes de esto se mostrará globalmente el modelo estructural del sistema de control, para luego entrar en lo particular del asunto. Ver figura 59.

Figura 59. Modelo estructural del sistema de control



El modelo estructural del control de la MCU está dado por un bucle o lazo cerrado, el cual es el principio de un sistema automático. Un sistema de este tipo es aquel en el que la acción de control está en función de la señal de salida. Este tipo de sistemas usa la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control. Como se puede observar en la figura anterior, este lazo cerrado empieza con un comando ejecutado a través del dialogo en la HMI, el cual va dirigido al controlador, pasando por los preactuadores, los actuadores, la máquina, el sensor y regresa al controlador, el cual lo comunica en el HMI.

5.1 HARDWARE DEL CONTROLADOR

El autómatas usado en la MCU está basado en un PLC compuesto por varios módulos de la marca Siemens que acoplados trabajan en perfecta sincronía, permitiendo tener un controlador potente y versátil.

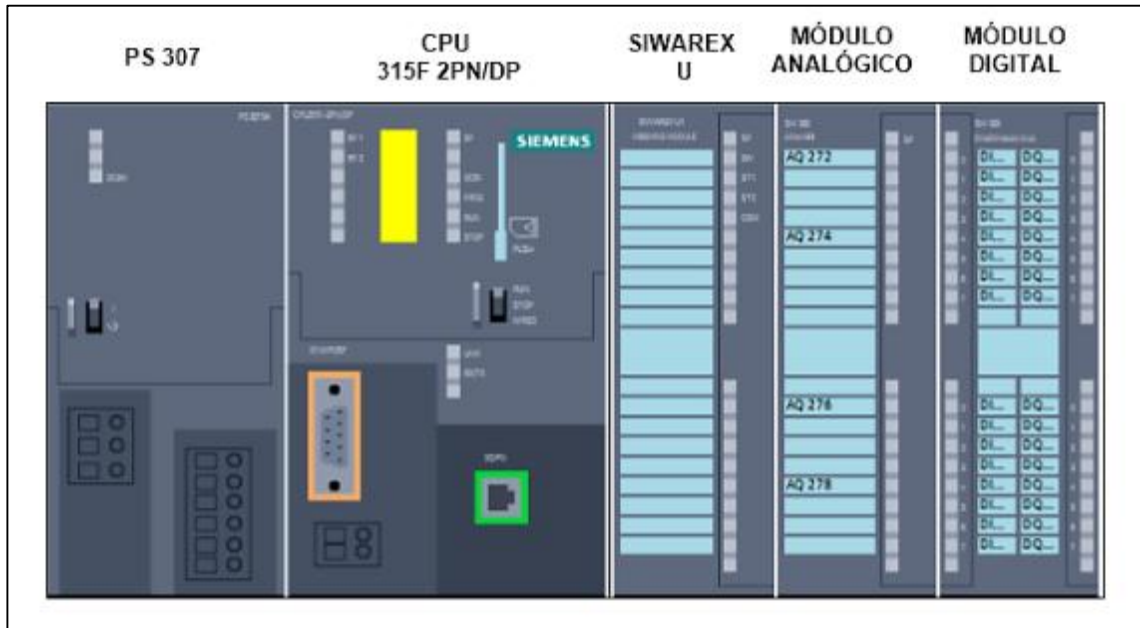
Cuando se usa un sistema basado en un autómatas programable, se tienen la necesidad de poseer una regulación de voltaje, una Unidad Central de Proceso (CPU), módulos según las necesidades del usuario o sistema, en este caso un módulo de pesaje capaz de enlazar el autómatas y la celda de carga, un módulo con salidas analógicas y un módulo con entradas y salidas digitales.

El autómatas de la MCU está formado por los siguientes elementos de la marca Siemens:

- PS 307 5A
- CPU 315F 2PN/DP
- SIWAREX U
- MÓDULO DE SALIDAS ANALÓGICAS SM 332
- MÓDULO DIGITAL DI16/DO16 x DC 24V

En la siguiente figura se muestra los componentes del autómata y el orden en el montaje.

Figura 60. Componentes del autómata MCU



5.1.1 Módulo regulador de voltaje PS 307 5A. La PS de referencia 6ES7307-1EA01-0AA0 es una fuente de alimentación estabilizada que tiene la función de alimentar todo el sistema de control y que posee las siguientes características principales:

- Entrada: AC 120/230 V
- SALIDA: DC 24 V/5 A

5.1.2 CPU 315F 2PN/DP V 2.6. El autómata programable posee una unidad de proceso conocida como CPU; es la parte principal del controlador ya que a partir de los datos obtenidos por los módulos y las decisiones que le han sido programadas por el usuario, realiza las acciones necesarias para actuar sobre los preactuadores,

modificando de esta manera al sistema físico y por ende la magnitud de la propiedad controlada.

La CPU usada en la MCU pertenece a los modelos gama media alta ofrecidos por la empresa SIEMENS, y cuyas características de trabajo son las siguientes:

- Memoria de trabajo: 256 KBYTE
- Interface MPI/DP 12MBIT/S
- Interface Ethernet Profinet

5.1.3 Módulo de pesaje SIWAREX U. SIWAREX U es un módulo de pesaje completo y flexible que se puede utilizar en todas partes donde debe actuar una báscula estática en el sistema de automatización SIMATIC S7.

Su funcionamiento es simple, a partir de un valor digital el Siwarex U calcula el valor de peso real en la celda de carga; y sus características principales son:

- Técnica de montaje uniforme y comunicación continua gracias al uso en SIMATIC S7
- Planificación uniforme con el administrador de SIMATIC
- Alta precisión 0,05 %
- Alta frecuencia de medición de 50 Hz
- Vigilancia de los valores límite
- Adaptación flexible a diferentes requisitos con el control SIMATIC
- Posibilidad de ajuste teórico sin pesos patrón
- Funciones de diagnóstico integradas en SIMATIC S7

5.1.4 Módulo de salidas analógicas SM 332. El modelo SM 332 consta de cuatro canales de salidas analógicas, las cuales permiten que un valor o resultado obtenido

por el autómata programable se convierta en una señal de tensión o intensidad que puede llegar a un preactuador o actuador.

Las características principales de este módulo son:

- Resolución: 11/12 Bits
- Número de pines: 20
- Rango de salidas en voltaje: 0 a 10 V, 1 a 5 V y -10 a +10 V.

5.1.5 Módulo de 16 entradas y 16 salidas digitales. Cuando se hace referencia a una entrada digital, se trata que por medio de ella se pueda obtener la información transmitida por sensores del tipo todo o nada. Debido a que este módulo trabaja con entradas digitales de tensión, se tiene que cuando una señal de 24 voltios es recibida por uno de sus puertos se entenderá con el valor de "1" lo cual nos dice que se encuentra activo el sensor.

Una salida digital consiste en que por medio de ella se pueda controlar los preactuadores o actuadores del tipo todo o nada, como relés, solenoides de válvulas y demás.

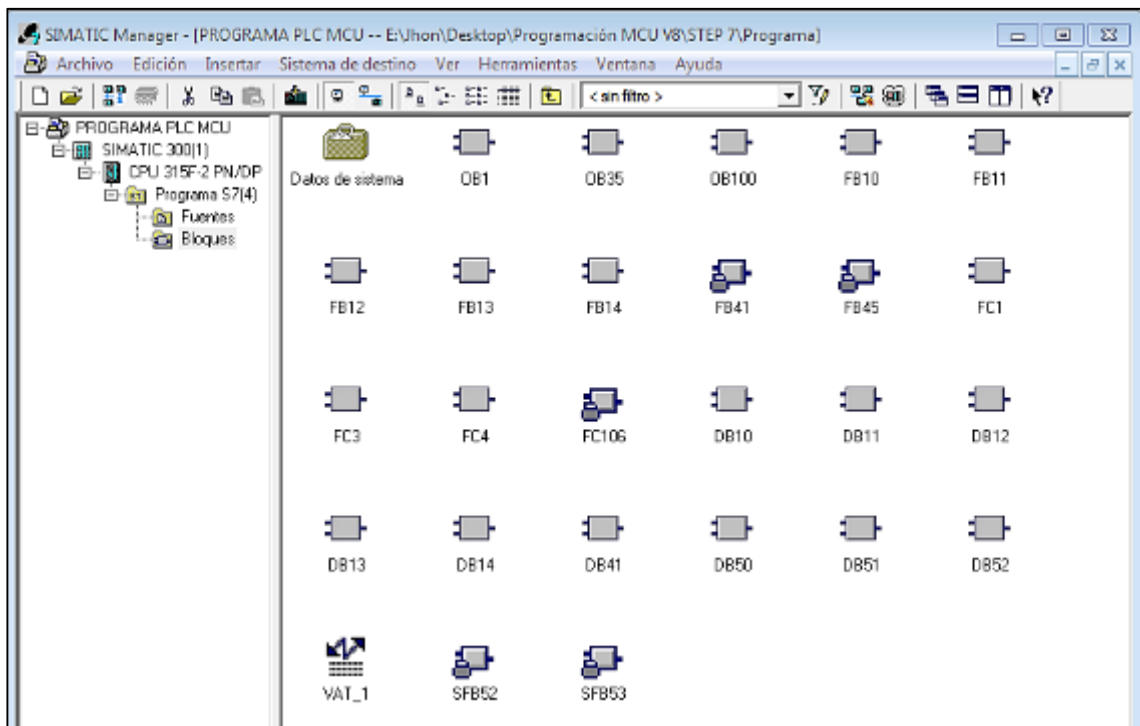
Debido a que este módulo trabaja con salidas digitales, cuando el sistema obtiene como resultado la activación de una salida, genera una diferencia de potencial de 24 Voltios de corriente directa con el fin de energizar el elemento conectado a ella, por el contrario si la orden es de desactivación, la diferencia de potencial es de 0 Voltios, generando que se desenergice el dispositivo conectado a ella.

5.2 SOFTWARE DE PROGRAMACIÓN EN LA MCU

Para la programación de la MCU fue necesario emplear ciertos programas especializados que sirvieron como base para la programación de rutinas, servo de fuerza, HMI, entre otros.

5.2.1 STEP 7. La compañía siemens trabaja su propio software de programación (STEP 7 V 5.5), el cual cuenta con distintos lenguajes de programación (FUP, KOP, SCL Y AWL), que hacen más cómoda y practica la programación del autómat. La parte central del programa que se utilizó para el funcionamiento de la MCU por medio del autómat se puede observar en la siguiente figura.

Figura 61. Entorno general de la programación MCU en STEP7



Para la programación en el Step 7, fue necesaria la utilización de los siguientes bloques descritos.

5.2.2 Bloques de programación MCU. En la siguiente tabla esta referenciado el bloque de programación y su función dentro del autómata de la MCU.

Tabla 8. Bloques de programación MCU

COMPONENTE	FUNCIÓN
OB1	Es un bloque llamado por el sistema operativo cíclicamente, esto permite la ejecución cíclica del programa de usuario.
OB35	Es un bloque de alarmas cíclicas, que permite la ejecución del programa controlado por tiempo, interrumpe la ejecución cíclica del programa a intervalos determinados
OB100	Es el bloque de arranque del autómata, se ejecuta cuando se alimenta la CPU, o pasa de STOP a RUN.
FB10	Bloque de función programado en lenguaje SCL, el cual está encargado de guardar los datos de peso leídos por el Siwarex U
FB11	Bloque de función programado en lenguaje SCL, encargado del comportamiento de datos Setpoint de la MCU
FB12	Bloque de función programado en lenguaje SCL, encargado de la rutina de control manual de la MCU
FB13	Bloque de función programado en lenguaje SCL, encargado de transformar el valor de fuerza leído por el Siwarex U en fuerza real Lbf
FB14	Bloque de función programado en lenguaje SCL, encargado de la rutina de control manual de la MCU
FB41	Bloque de función especial PID
FB45	Bloque de función especial SIWA U
FC1	Función programada para rutina de Modo Calibración
FC3	Función programada para rutina de Modo control yugo
FC4	Función programada para rutina de Modo control Manual

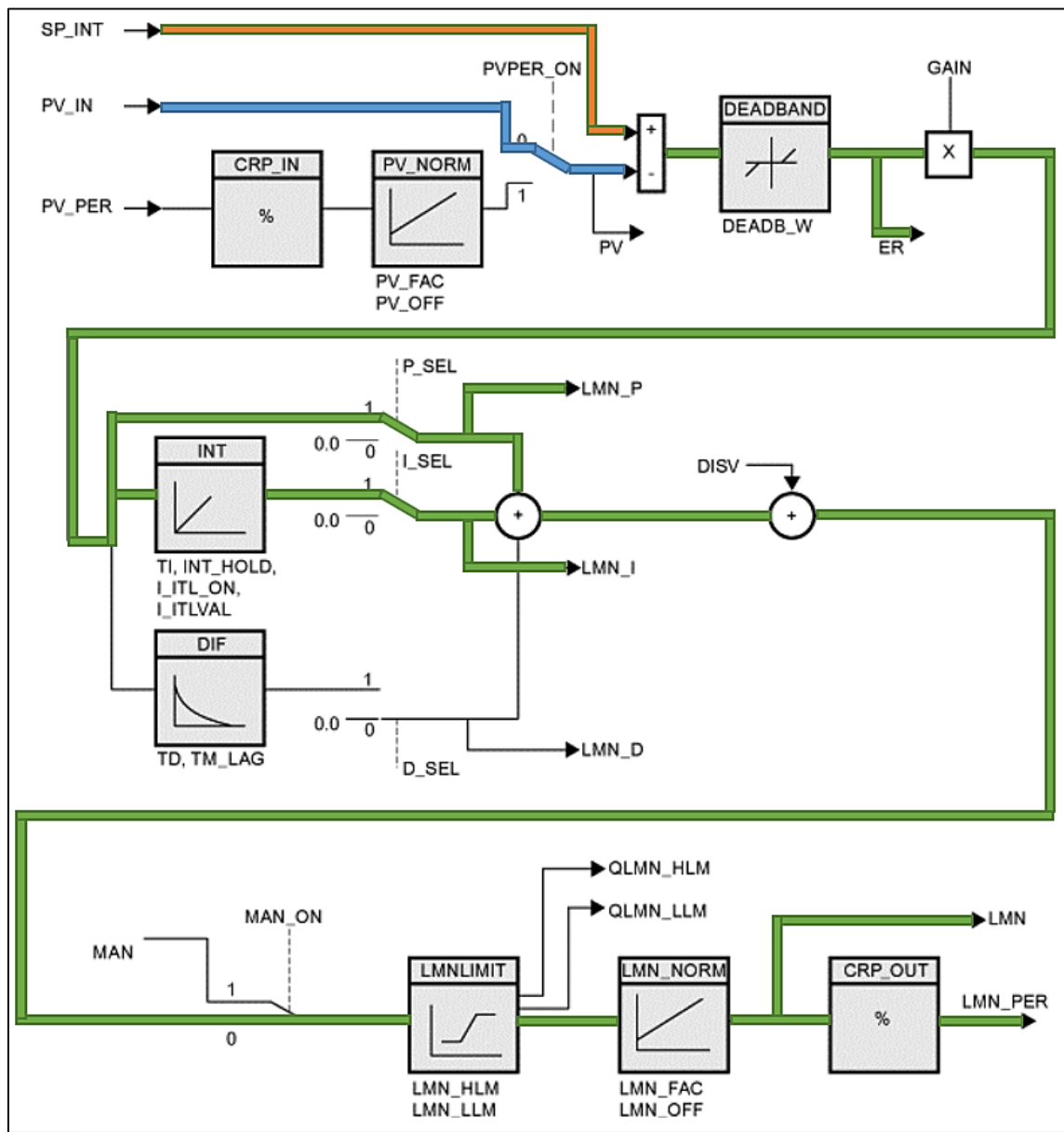
COMPONENTE	FUNCIÓN
FC106	Bloque especial UNSCALE usado en control manual
DB10	Bloque de instancia asociado a los datos del FB10
DB11	Bloque de instancia asociado a los datos del FB11
DB12	Bloque de instancia asociado a los datos del FB12
DB13	Bloque de instancia asociado a los datos del FB13
DB14	Bloque de instancia asociado a los datos del FB14
DB41	Bloque de instancia asociado a los datos del FB41
DB50	Bloque de instancia asociado a los datos del FB45
DB51	Bloque de instancia del FB 45 encargado de hacer función SCALE
DB52	Bloque de instancia del FB 45 encargado de hacer función VECTOR
VAT_1	Tabla de variables del sistema
SFB52	Bloque de librería Siemens enlazado con el FB45, encargado de proteger comandos de usuario
SFB53	Bloque de librería Siemens enlazado con el FB45, encargado de proteger comandos de usuario

5.2.3 Bloque de función FB41 (CONT_C). El autómata de la MCU está basado en un equipo de la gama S7300 de la marca SIEMENS. Para trabajos de regulación como presión, caudal, entre otros, el control se realiza con una función PID integrada en el software (STEP 7) del PLC.

Este bloque de función es el FB 41 (CONT_C), que es un algoritmo PID que se puede utilizar de muchas maneras en un proceso de regulación, en este caso se integrara a un código que posee rutinas y modos particulares de trabajo, donde se hará especial llamado al bloque PID cuando este sea necesario. Debido a que este

Internamente el bloque función FB41 está estructurado con un regulador PID especial para autómatas de Siemens. Este es útil en gran manera gracias a ser compacto y fácil de manipular. En la siguiente figura se muestra este lazo de control, el cual para la MCU será un control PI, que es el más adecuado para hacer control de presión, además se muestra el recorrido de las señales en este lazo.

Figura 63. Lazo de control del FB41



Fuente: Step 7, SIEMENS

Al examinar el diagrama de bloques del regulador CONT_C de la figura anterior, se pueden distinguir las tres zonas siguientes:

- Zona superior: Realiza la comparación entre el valor de consiga (SP_INT) y el valor real del proceso (PV_IN), y crea el error de regulación (ER).
- Zona intermedia: Aplica un tipo de regulador diferente (PI) al error originado en la zona anterior, establece los valores de los parámetros de cada uno, lee la salida que corresponde a cada parámetro y, teniendo en cuenta la perturbación DISV, origina la salida real del regulador.
- Zona inferior: Utiliza la salida que origina el regulador automático, para establecer límites y preparar la salida definitiva como número real (%) y en formato de periferia.

5.2.4 Interfaz humano máquina (HMI)

Figura 64. HMI de la MCU



La MCU cuenta con un conjunto interfaz programada en el autómata, que cumple con las necesidades presentadas según la forma de trabajo. Los cuales son desarrollados usando los programas STEP 7 V5.5 (programación para el autómata) y WINCC FLEXIBLE (Creación y aplicación de interfaces hombre maquina en computadores) parte del paquete software ofrecido por la empresa SIEMENS para el uso de sus autómatas programables.

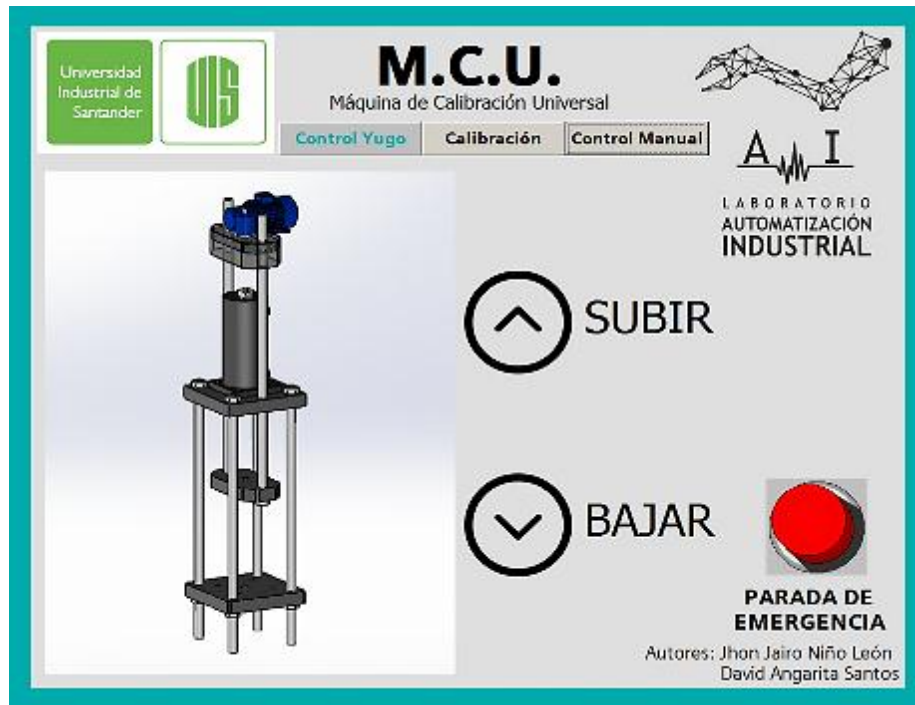
Cabe resaltar que la interfaz desarrollada en este proyecto de grado, otorga un fácil manejo de la MCU, flexibilidad a la hora de operar la máquina, indicaciones de proceso y seguridad, entre otros.

Por ende, en la presente sección se describe el funcionamiento de la HMI de la máquina de calibración universal. Para esto es necesario definir que esta interfaz está dividida en tres ventanas principales de proceso o modos de operación, las cuales son:

- Modo Control del Yugo
- Modo Control Manual
- Modo Calibración

5.2.4.1 Modo control del Yugo

Figura 65. Modo control yugo

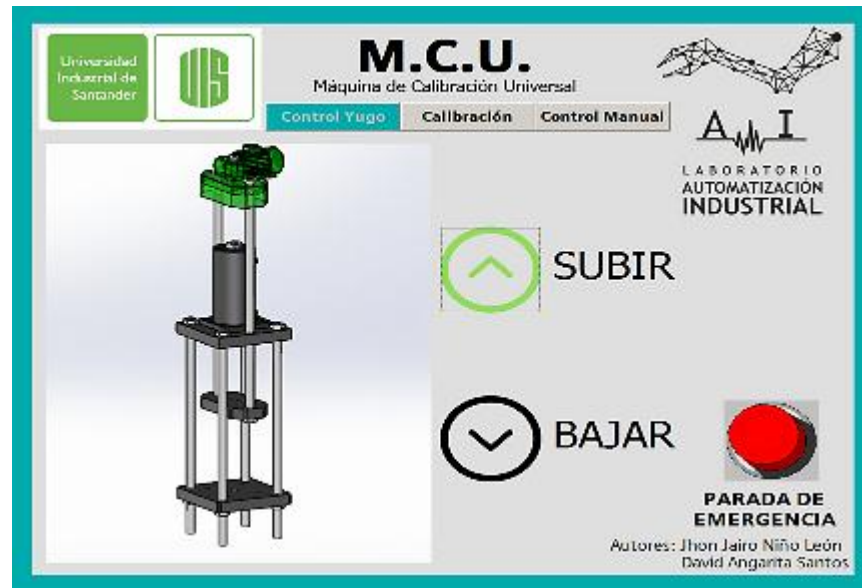


Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

Como se puede observar en la figura anterior, el entorno HMI en modo control yugo está activo al seleccionar el selector Control yugo. Esto permite aislar el sistema y trabajar independientemente con el sistema de transmisión del yugo movable, permitiendo así tener control total en el acercamiento vertical hacia la celda de carga.

El funcionamiento es sencillo, el yugo movable se puede manipular tan solo oprimiendo los diferentes selectores. Los cuales están referenciados como SUBIR, que es el comando que permite un movimiento vertical hacia arriba del yugo movable. En ese momento el yugo ascenderá y se podrá visualizar en el HMI como se muestra en la siguiente figura.

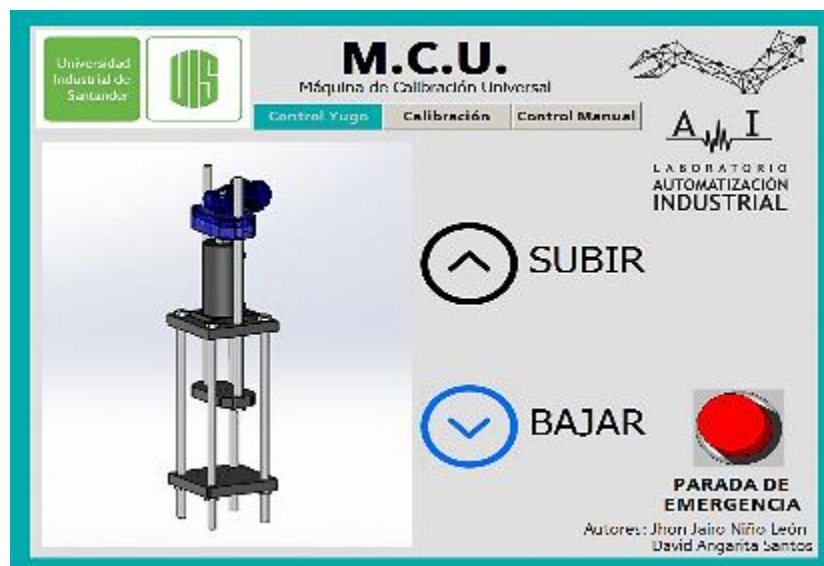
Figura 66. Modo control yugo ascendente



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

El comando BAJAR activa el movimiento vertical hacia abajo del yugo movable. Al oprimir este comando el HMI mostrara dicho comportamiento, tal como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 67. Modo control yugo ascendente

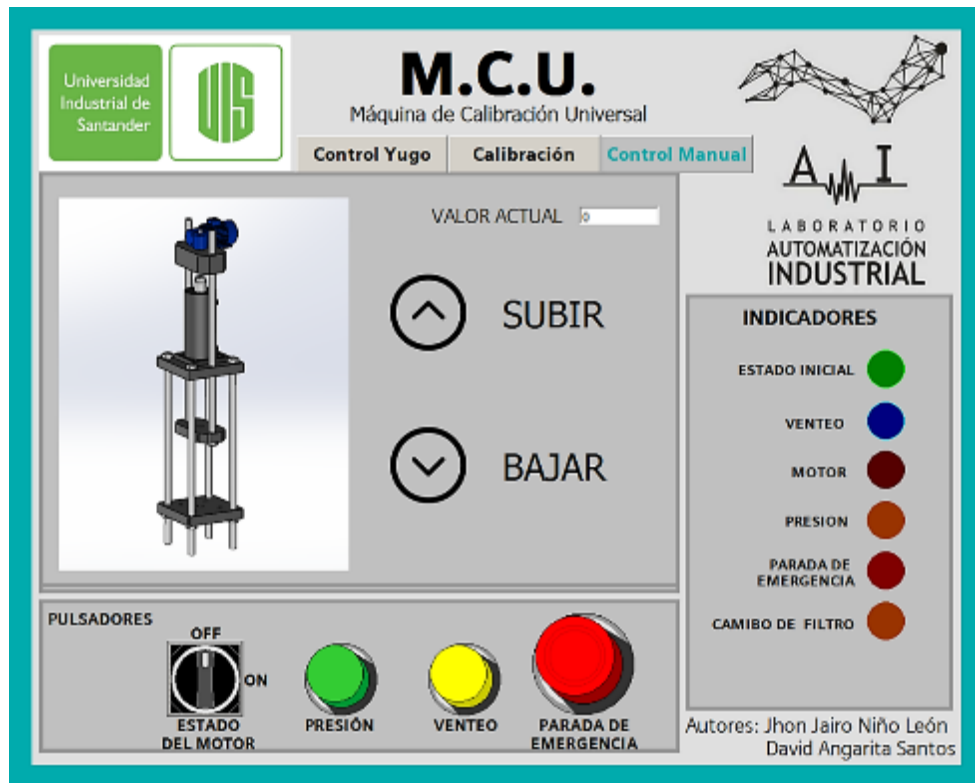


Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

Este modo está programado para que al oprimir la parada de emergencia, sean restringidos todos los comandos de operación, logrando así la seguridad tanto de la maquina como del operario.

5.2.4.2 Modo control manual

Figura 68. Modo control manual



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

Este entorno HMI se activa al seleccionar el selector Control Manual. Esto permite independizar el sistema, para así poder manipular a voluntad el comportamiento del cilindro hidráulico.

Se puede observar en la anterior imagen cuatro sectores de trabajo, como lo es el sector de modos (control yugo, calibración y control manual), sector de pulsadores, indicadores y sector de operación del cilindro. Además posee un visor del valor actual de fuerza leído por la celda de carga patrón. Está definido en la programación

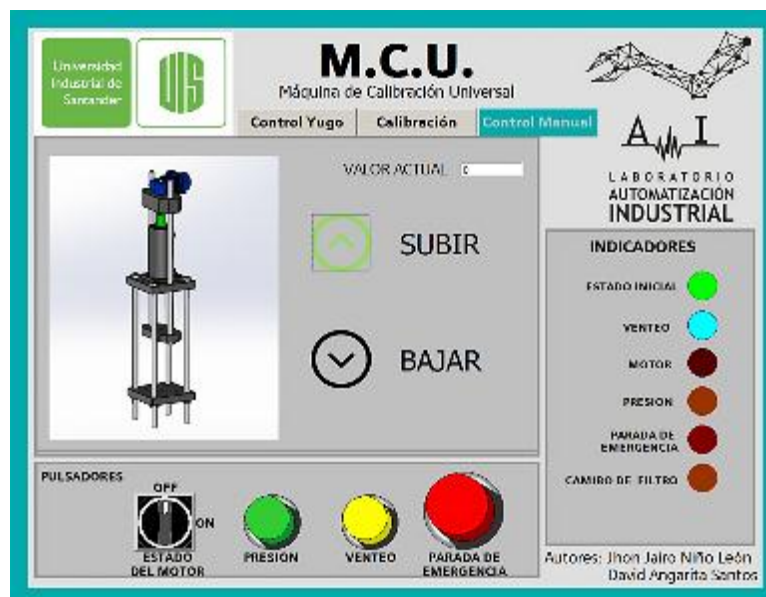
la rutina de arranque para control manual, así como los parámetros de ejecución y seguridad del sistema.

El funcionamiento de este modo de control es fácil y rutinario, donde los indicadores muestran el estado actual de la máquina, y permiten deducir fácilmente el siguiente paso a seguir. Esto se logra a la ubicación operacional tanto de los indicadores como de los pulsadores.

Lo primero es encender el motor, para esto está el selector ESTADO MOTOR; una vez encendido el motor se procede a activar la presión del sistema con el pulsador PRESIÓN. Ya con un sistema presurizado el operario tiene la opción de subir o bajar el cilindro hidráulico

El cilindro solo trabajara mientras se mantenga oprimido los selectores SUBIR o BAJAR. Al oprimir SUBIR, el cilindro ascenderá y este proceso se podrá visualizar en la HMI (Ver la siguiente figura).

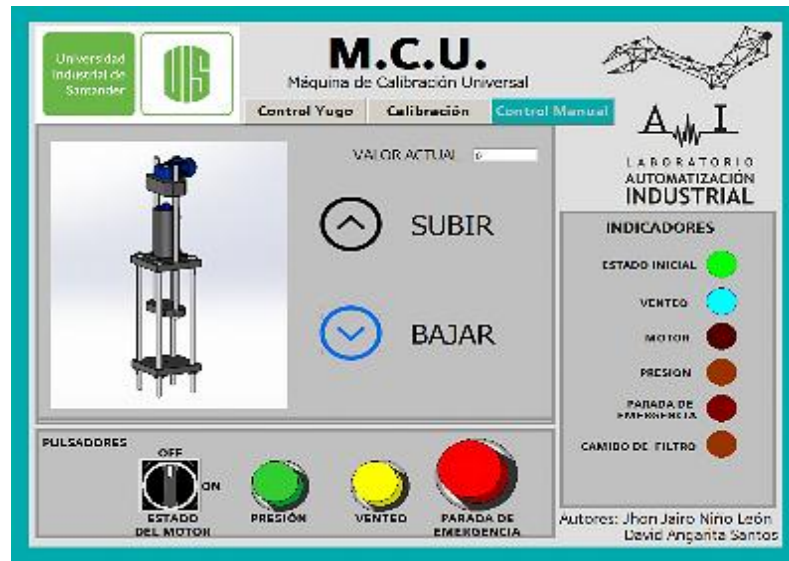
Figura 69. Modo control manual ascendente



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

Al oprimir el selector BAJAR, el cilindro se moverá verticalmente hacia abajo, gracias a la señal de control enviada a la servovalvula. Esto se puede observar en la HMI (Ver la siguiente figura).

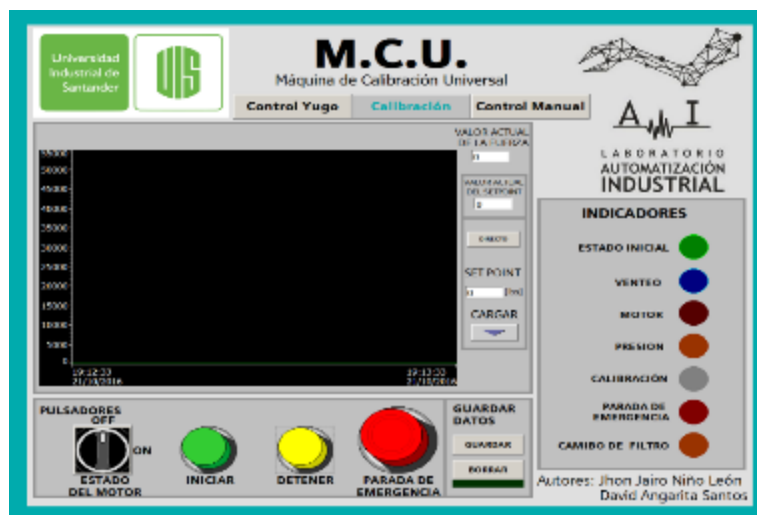
Figura 70. Modo control manual descendente



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

5.2.4.3 Modo Calibración

Figura 71. Modo calibración



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

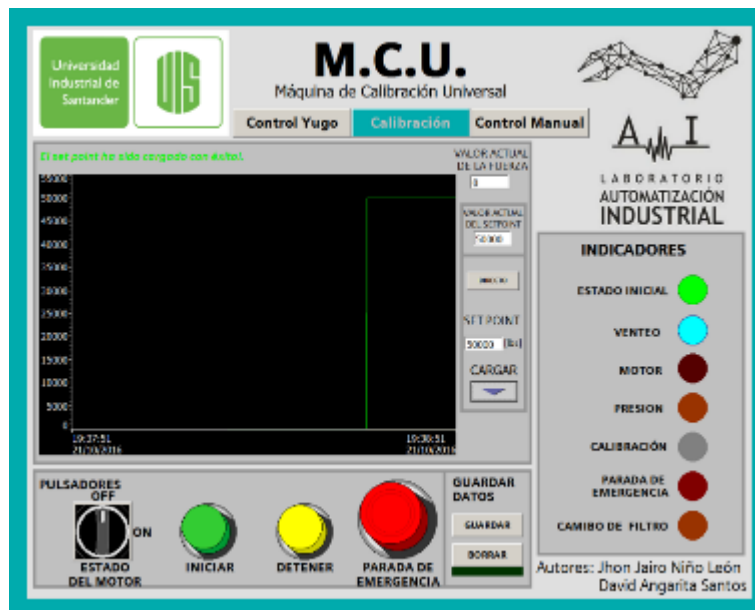
El modo calibración posee dos formas de trabajo, la primera es una forma que se ha denominado DIRECTO, y la segunda se ha llamado ESCALONADO. Estos casos particulares poseen en común la rutina de arranque, los indicadores, la opción de guardar datos y el visor de valor actual de la fuerza registrada por la celda de carga. La forma de operar la maquina estará explicada paso a paso en el Manual De Usuario de la MCU.

Modo de calibración DIRECTO

Este modo de calibración consiste en ingresar un valor de fuerza deseada o Setpoint; al oprimir el pulsador iniciar, éste activa el controlador PI cargado en el autómata, con el fin de que la fuerza real sobre la celda de carga sea igual al Setpoint deseado. Los datos de fuerza leídos por la celda de carga pueden ser almacenados en el autómata tan solo con oprimir el selector GUARDAR.

Si se desea detener la calibración o ventear el sistema, basta con oprimir el pulsador detener.

Figura 72. Modo calibración DIRECTO



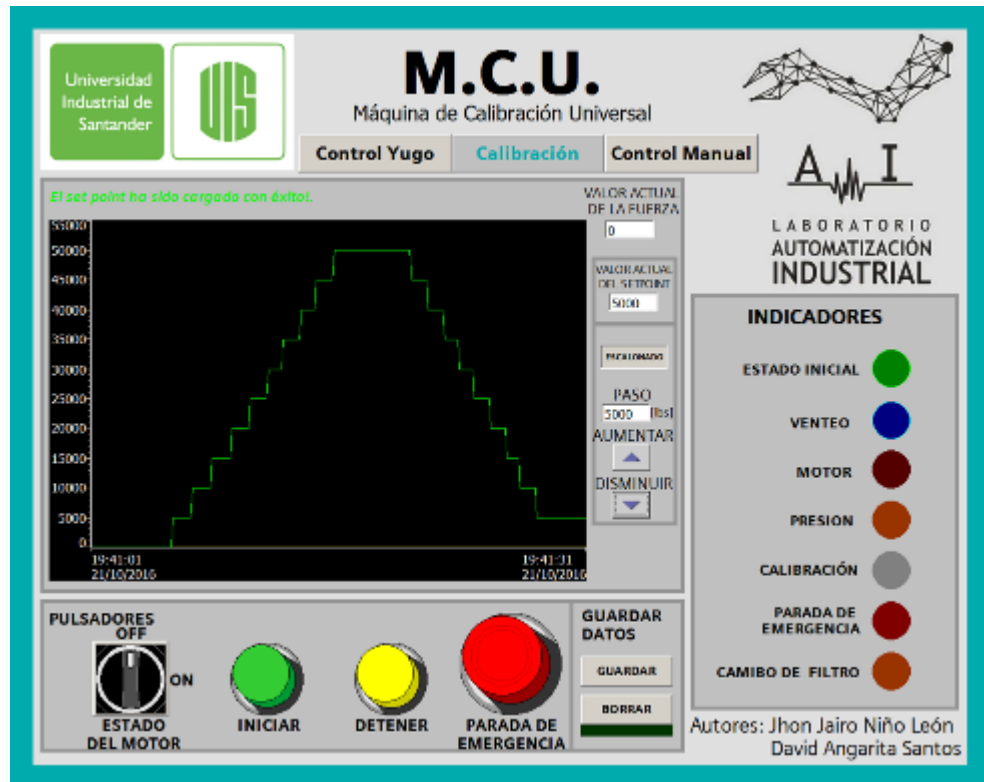
Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

Modo de calibración ESCALONADO

El principio del funcionamiento de este modo de calibración es sencillo, y se usa para pruebas de calibración donde se desee ascender o descender la carga de manera escalonada, esto es posible asignando un valor llamado paso, el cual será el valor determinante a la hora de aumentar o disminuir la carga. La característica principal de este modo de trabajo es que el operario es quien determina en que momento aumenta o disminuye la carga sobre la celda.

Este modo de calibración se puede observar en la siguiente figura.

Figura 73. Modo calibración DIRECTO



Fuente: WINCC FLEXIBLE, SIEMENS

5.2.5 Control de la MCU automatizada. La MCU ha sido creada para trabajar en tres rangos de trabajo, los cuales están definidos de la siguiente manera:

- Rango de trabajo 1: (25.000 a 50.000) Lbf, con presión del sistema de 2000 PSI
- Rango de trabajo 2: (10.000 a 25.000) Lbf, con presión del sistema de 1000 PSI
- Rango de trabajo 3: (1000 a 10.000) Lbf, con presión del sistema de 500 PSI

Esto hace que estos rangos de trabajo posean condiciones de sintonización diferentes entre sí.

En los siguientes párrafos se muestra la solución a este problema.

5.2.5.1 Planificación de ganancias. En la teoría de control, la planificación de ganancias es un enfoque al control de sistemas no lineales que utiliza una familia de controladores lineales, proveyendo un control satisfactorio para un punto de operación diferente del sistema.

Una o más variables observables, llamadas variables de planificación, se usan para determinar cuál región operativa está funcionando y para habilitar el controlador lineal apropiado. Por ejemplo, en el sistema de control de vuelo de una aeronave, la altitud y el número Mach pueden ser las variables de planificación, con diferentes parámetros disponibles -y automáticamente conectados al controlador- para varias combinaciones de estas dos variables. Es una de las formas más simples e intuitivas de control adaptativo.

El termino adaptativo significa cambiar el comportamiento conforme a nuevas circunstancias. Un regulador adaptativo es un regulador que puede modificar su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a las perturbaciones. Este mismo objetivo es el de la inclusión de la realimentación en el bucle de control, por lo que surge la pregunta de cuál es la diferencia entre control realimentado y control adaptativo.

Existen muchas definiciones de control adaptativo, siendo una de las más aceptadas, que control adaptativo es un tipo especial de control no lineal en el que el estado del proceso puede ser separado en dos escalas de tiempo que evolucionan a diferente velocidad. La escala lenta corresponde a los cambios de los parámetros y por consiguiente a la velocidad con la cual los parámetros del regulador son modificados, y la escala rápida que corresponde a la dinámica del bucle ordinario de realimentación.

Un ejemplo muy utilizado de control adaptativo en bucle abierto es el denominado Cambio por tabla (o gain scheduling) que consiste en la modificación de los parámetros del controlador a partir de una tabla que ha sido calculada previamente para distintos puntos de funcionamiento, en función de una variable auxiliar. Un caso típico es el control de vuelo de un avión, cuyo regulador puede ser cambiado en función de la altura de este.

La MCU es una planta no lineal, por ende posee un control robusto de tipo adaptativo clase gain scheduling (o de planificación de ganancias), que es la alternativa más simple e igual de eficiente a practicar un control no lineal, ayudando a la máquina a ser más amigable a la hora de realizar futuras re-ingenierías teniendo una programación corta y concreta.

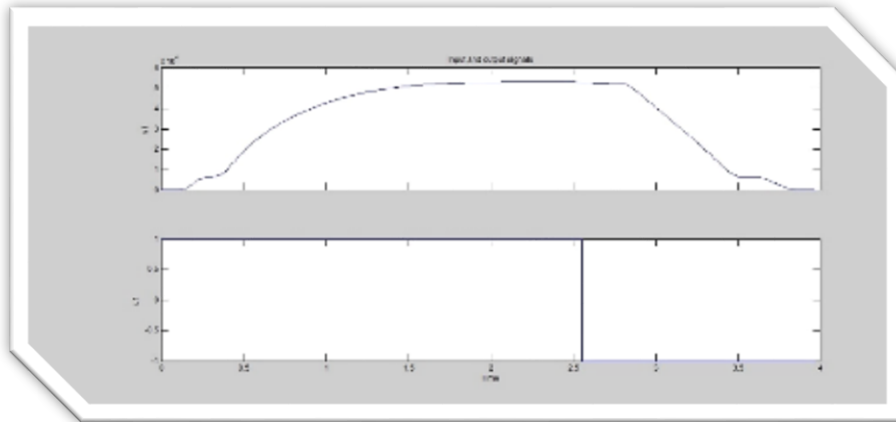
Con la máquina puesta en marcha se hace una prueba, llevando la celda de carga de 0 a 50000 lbf y retornándola manualmente con el fin de obtener una idea de la planta a trabajar (lo que se conoce como pruebas de lazo abierto en la ingeniería de control). Recopilando los datos necesarios de dicha prueba en un archivo Excel como se enseña en la figura #, para posteriormente ser exportados al software de ingeniería MatLab que es el escogido para hallar la función que identifica la planta para la fuerza seleccionada.

Figura 74. Recopilación de datos

VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN	VOLTAJE	PRESIÓN
1	6.305	3	26936.44	1	47398	3	53034.54	3	53030.85	-1	48942.27	-1	6120.909
1	32.154	3	21703.88	3	46799.28	3	52100.25	3	52210.23	3	50540.88	3	50111.728
1	35.613	3	28915.68	3	48314.33	3	52745.5	3	52216.33	-1	37911.69	-1	5879.003
1	35.9021	3	30439.48	3	48570.77	3	53064.38	3	53184.75	-1	39094.6	-1	5381.494
1	148.426	3	33490.58	3	48871.15	3	53640.58	3	53076.89	3	38974.25	3	38970.862
1	433.79	3	33564.15	3	49296.3	3	53895.69	3	53031.56	-1	32168.5	-1	3331.058
1	821.2341	3	33870.3	3	49536.33	3	53813.74	-1	52836.68	-1	30117.95	-1	2350.747
1	2108.867	3	33830.8	3	49526.38	3	53863.34	3	53618	3	28791.34	3	3838.38
1	3456.372	3	34941.11	3	50124.33	3	53964.23	-1	52777.52	-1	26837.63	-1	881.051
1	5127.815	3	35741.1	3	50479.3	3	53932.87	-1	52710.48	-1	25382.57	-1	480.548
1	6460.384	3	35780.33	3	50489.06	3	53953.98	3	53813.83	3	28121.12	3	341.751
1	5138.68	3	36074.51	3	50895.03	3	53954.25	-1	52564.66	-1	23705.36	-1	374.137
1	8523.987	3	36792.04	3	51331.73	3	53970.38	-1	52449.48	-1	18959.08	-1	321.898
1	8658.384	3	46718.54	3	52579.84	3	53953.44	3	53575.48	3	38075.44	3	750.18
1	7038.864	3	43323.73	3	51915.67	3	53106.37	-1	52380.64	-1	35711.29	-1	15.915
1	8269.435	3	42187.03	3	51711.03	3	53133.84	-1	52323.48	-1	34116.78	-1	3
1	3842.889	3	42144.82	3	51853.21	3	53135.84	3	52144.82	3	33840.14		
1	32515.55	3	43562.44	3	51964.3	3	53146.55	-1	51911.55	-1	18405.23		
1	34088.89	3	44546.78	3	52082.08	3	53148.73	-1	52017.38	-1	8412.088		
1	37323.26	3	44715.28	3	52126.88	3	53158.83	3	48100.18	3	1581.842		
1	38642.83	3	45231.61	3	52309.02	3	53171.62	-1	47136.23	-1	6477.405		
1	21237.88	3	45882.95	3	52417.04	3	53178.38	-1	45816.28	-1	8370.51		
1	22824.78	3	46230.28	3	52484.42	3	53284.18	3	45144.3	3	8340.288		

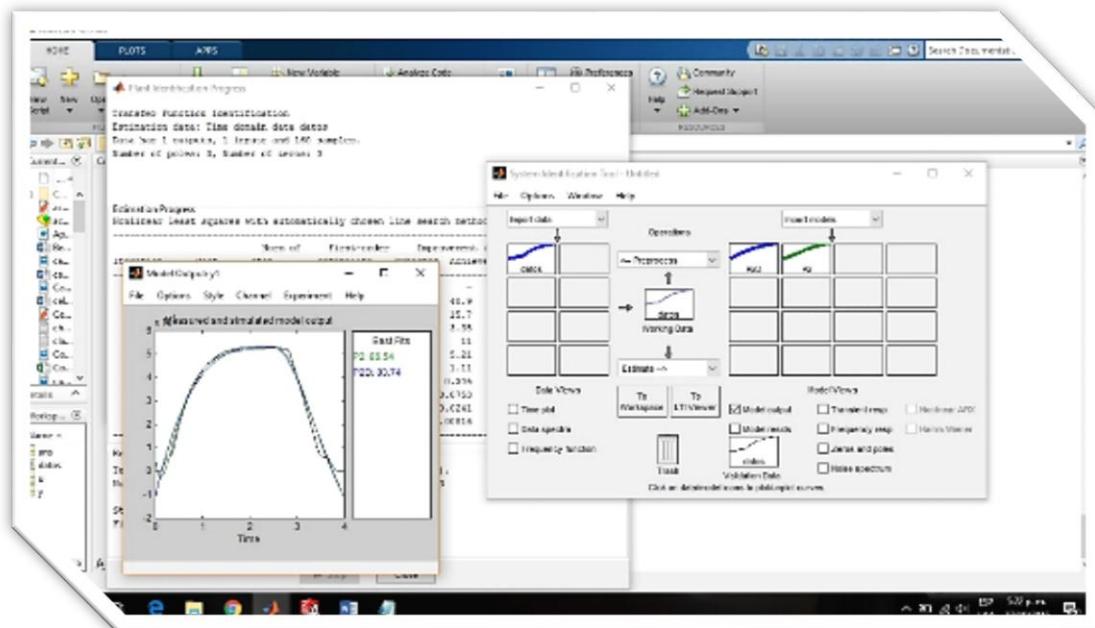
Con el valor de fuerza aplicada a la celda de carga en cada instante (se tomó un tiempo de muestreo de 25ms) con la salida de voltaje de la servo-válvula operando a condiciones normales (aproximadamente al 10% de la apertura total), los datos son exportados al software de ingeniería MatLab para la continuación del ejercicio (obtener la función de transferencia para las condiciones antes mencionadas), una vez exportada y vectorizada la información, se obtiene la siguiente gráfica, que es el funcionamiento modelo de la planta aplicando un control tipo lazo abierto, de donde se parte para la consecución del control realimentado.

Figura 75. Planta lazo abierto



Teniendo ya un punto de partida, MatLab se encarga desde su función `ident`, de hacer cálculos matemáticos iterando valores para llegar a una ecuación que define globalmente el funcionamiento de la MCU.

Figura 76. Función `ident` del software MatLab

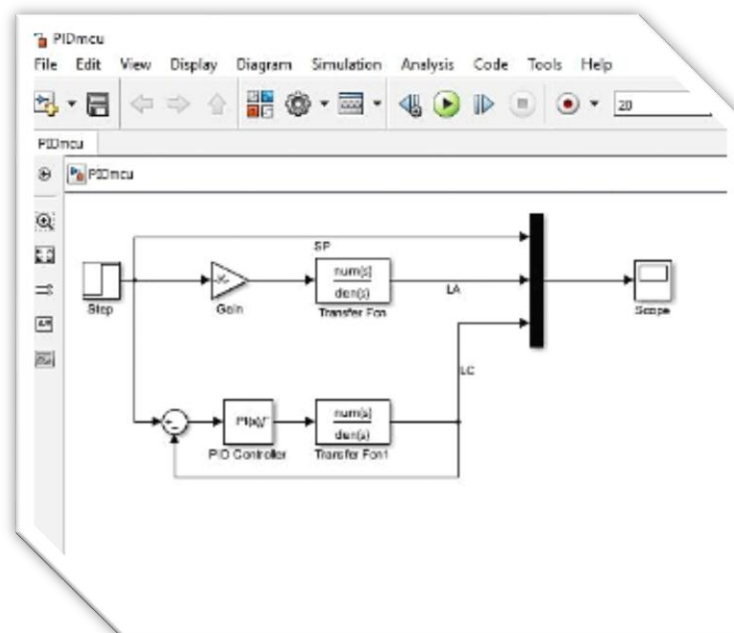


Tras varios intentos probando distintas configuraciones se obtuvo una ecuación de transferencia del sistema con un 84.42% de similitud al comportamiento de la planta bajo las condiciones de control tipo lazo abierto, con una configuración de 2 polos sin retraso, la ecuación de transferencia para esa configuración de la MCU fue:

$$G(s) = \frac{9696(S) + 52000}{S^2 + 1.494(S) + 1.15}$$

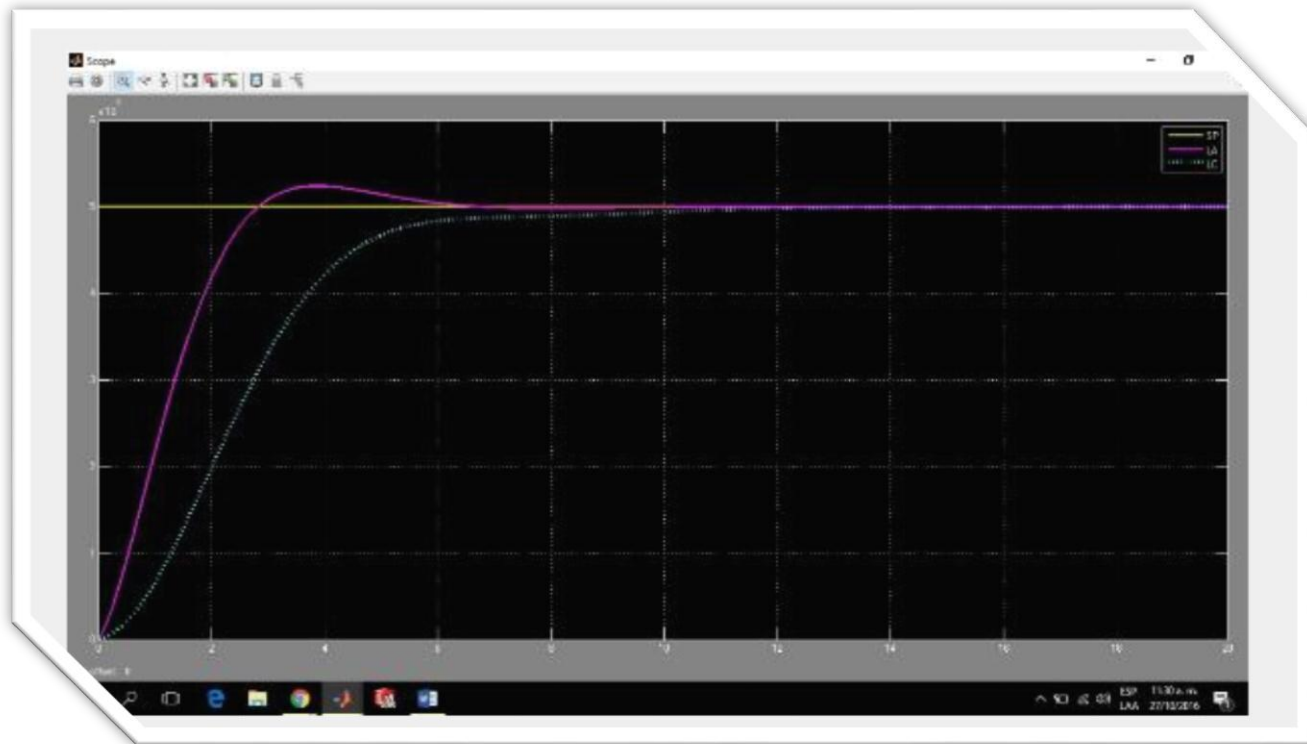
Ahora bien, con el descubrimiento de esta función, se da paso a la utilización de otra herramienta de MatLab llamada simulink, donde se procede a simular el control de lazo cerrado.

Figura 77. Simulación control lazo cerrado vs control lazo abierto MCU con set point de 50000 Lbf



Después de programar la simulación se procede a visualizar gráficamente los resultados.

Figura 78. Comportamiento control lazo abierto vs lazo cerrado MCU con set point de 50000 Lbf



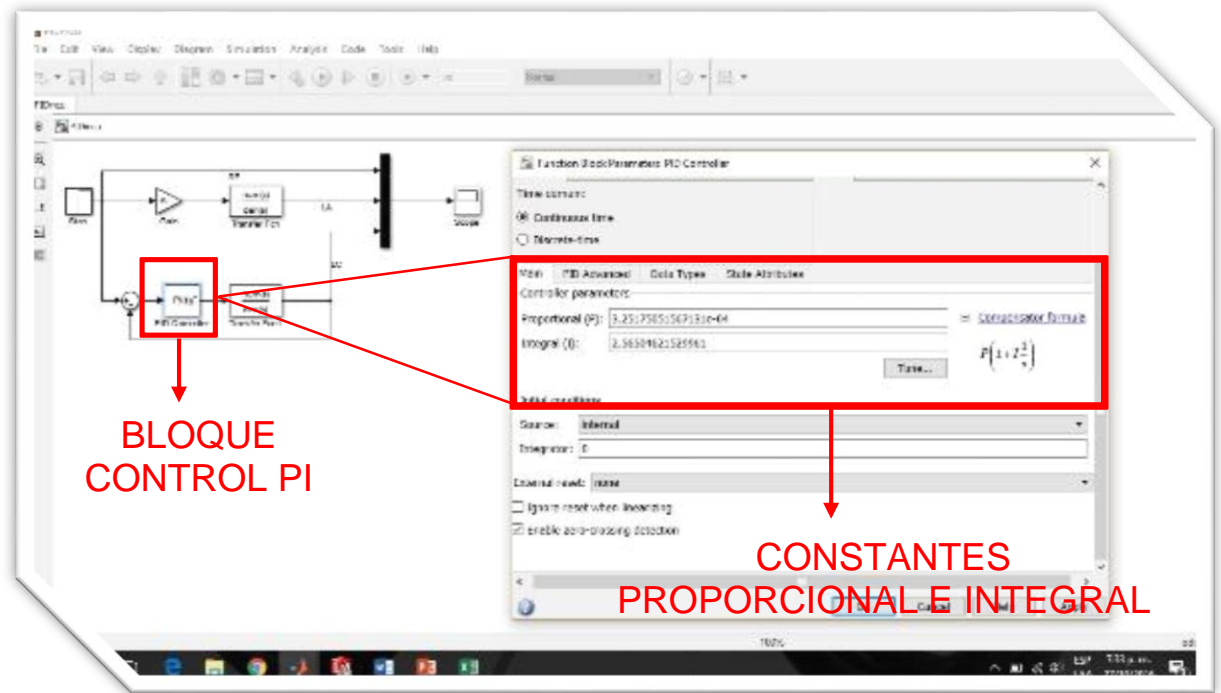
Donde el trazo amarillo corresponde al set point, el trazo magenta al control de lazo abierto y el trazo azul punteado al controlador PI retroalimentado.

Después de visualizar que el comportamiento del control proporcional-integral es el deseado para el set point, se procede a buscar el bloque de simulink que contiene las constantes proporcional e integral para este comportamiento como se ilustra en la figura 79.

Sabiendo que el tiempo integral se define como $T_i = \frac{1}{I}$, se conoce ya la información completa para introducir en la programación del autómata.

Este procedimiento debe realizarse para cada set point que la MCU vaya a trabajar (más de 50 en la práctica), lo que lo hace largo y tedioso, por lo que, a pesar de haber servido como pista, y servido para la obtención de la función de transferencia para el set point especificado, se decide recurrir al método de Ziegler-Nichols mejorado por Chien, Hrones y Reswick (CHR).

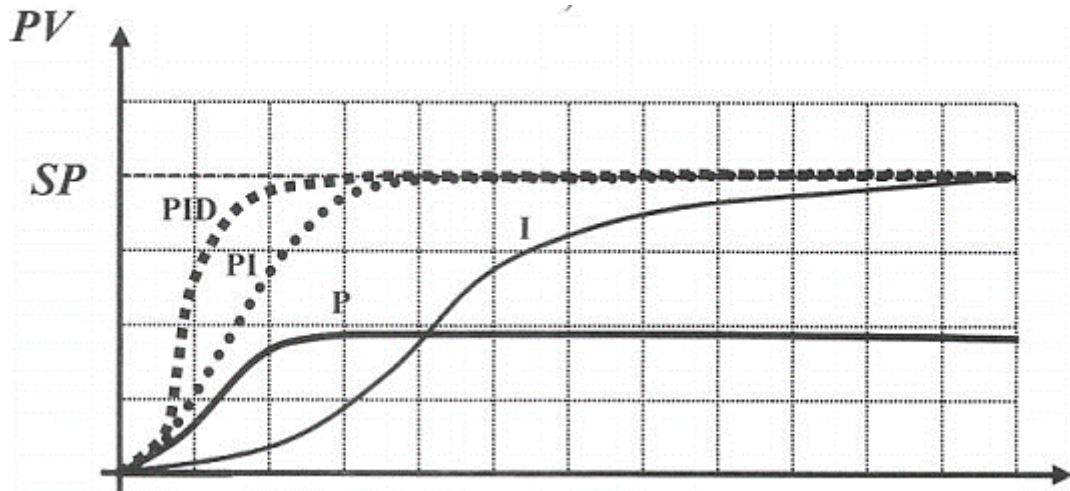
Figura 79. Obtención de las constantes proporcional e integral



5.2.5.2 Ajuste empírico del controlador usando Método de Ziegler-Nichols mejorado por Chien, Hrones y Reswick (CHR). Este método de sintonización es basado en el capítulo 6 (control de procesos mediante autómatas programables) del libro AUTÓMATAS PROGRAMABLES Y SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN, de Enrique Mandado Pérez.

Este método de sintonía, denominado CHR constituye una variante del método Ziegler-Nichols en bucle abierto. Para este proyecto es necesario que la maquina trabaje sin sobre-oscilación, por tal razón se toma como referencia el método de Chien, Hrones y Reswick los cuales proponen ajustes de los parámetros según se quiera obtener la repuesta más rápida sin sobre-oscilación (Overshoot) (ver figura 80). Además, en este caso se toman las recomendaciones de los valores de los parámetros del regulador ante cambios de la variable de consigna Set point (ver tabla 9).

Figura 80. Criterio de optimización del método CHR sin sobre-oscilación



Fuente: Autómatas programables y sistemas de automatización, ENRIQUE MANDADO PERÉZ

Tabla 9. Tabla de ajuste de los parámetros de un regulador PID

		0% de sobreoscilación	
		Consigna SP	Perturbación
Parámetro	K_p	$0,6/a$	$0,95/a$
	T_i	$1 \cdot \tau$	$2,4 \cdot \tau$
	T_d	$0,5 \cdot L$	$0,42 \cdot L$

Fuente: Autómatas programables y sistemas de automatización, ENRIQUE MANDADO PERÉZ

Para poder aplicar el método CHR, se debió primero realizar Método de Ziegler-Nichols con identificación en bucle abierto en la MCU. Esto fue posible siguiendo las recomendaciones establecidas en el libro guía anteriormente citado. Todo esto con el fin de calcular los parámetros necesarios para introducir en la anterior tabla. Método usado en el ajuste empírico:

1) Abrir bucle de control y ajustar:

- $K_p=1$
- $T_i= \infty$
- $T_d=0$

2) Aplicar un escalón a la variable Set point

3) Obtener los tiempos donde la tangente de la curva del proceso sea de máxima pendiente.

4) Registrar el valor de peso máximo al que llega el sistema

5) Calcular las variables K , ζ y L

- $k=PV/SP$
- $\zeta=1,5(t_2-t_1)$
- $L=t_2-\zeta$

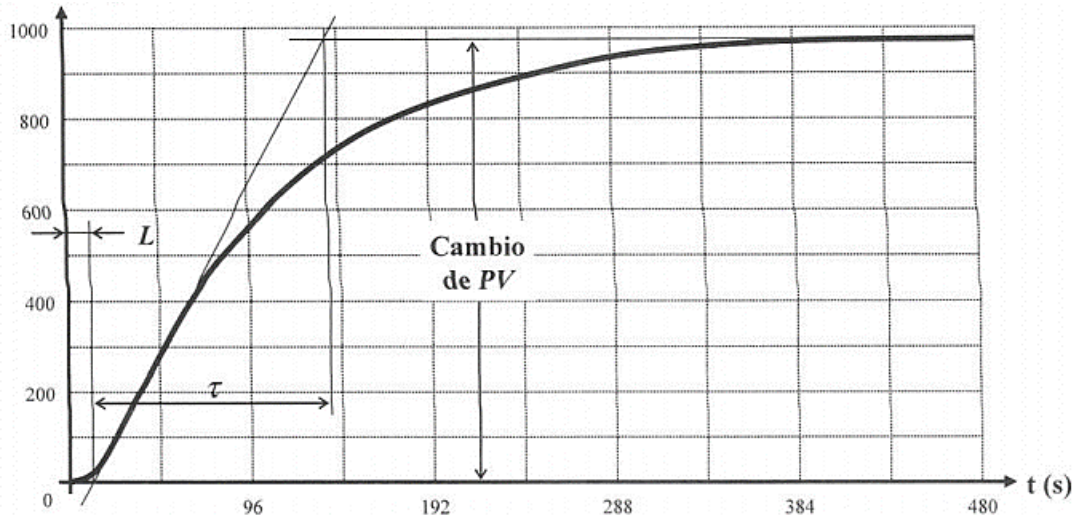
6) Calcular la variable a :

- $a=K*L/\zeta$

7) Con la variable a calculada, se procede a calcular K_p y T_i usando la tabla de ajustes de parámetros dados anteriormente.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de los parámetros requeridos usando el método de ajuste empírico de Ziegler-Nichols

Figura 81. Ejemplo de parámetros de ajuste empírico



Fuente: Autómatas programables y sistemas de automatización, ENRIQUE MANDADO PERÉZ

5.2.5.3 Ajuste de la MCU por el método Ziegler-Nichols mejorado CHR. Este ajuste se realizó para el rango de la máquina de 25.000 Lbf a 50.000Lbf bajo los siguientes parámetros:

- Debido al comportamiento de la servo-válvula, se definió la unidad de K_p usada en la prueba igual a 0,00037
- $T_i = \infty$
- $T_d = 0$
- Presión del sistema 2000 PSI
- Valor del Setpoint 50.000 Lbf

Resultados obtenidos:

- $t_1 = 1,45$ s
- $t_2 = 2,81667$ s
- $PV = 44675$ Lbf

Cálculos:

- $k = PV/SP = 0,8935$
- $\zeta = 1,5(t_2 - t_1) = 2,055$
- $L = t_2 - \zeta = 0,765$
- $a = K * L / \zeta = 0,3326$

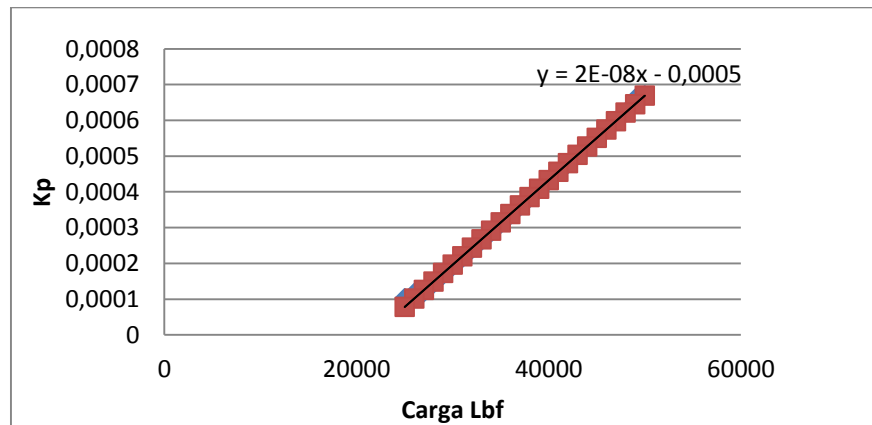
Usando las tablas CHR

- $K_{p\text{teorica}} = 0,6/a = 1,795585033$
- $K_{p\text{MCU}} = K_{p\text{teorica}} * K_{p\text{prueba}} = 0,00067$
- $T_{i\text{MCU}} = \zeta = 2,05$

Ya que las constantes de la MCU para los diferentes valores de fuerza varían, se calcularon de la manera anterior las constantes K_p y T_i para todo el rango de operación. Con esto se logró identificar las ecuaciones de comportamiento de dichas constantes. Gracias a esto se llegó a la conclusión de realizar un control adaptativo, el cual se explica en otra sección.

En la siguiente grafica está el comportamiento de la K_p .

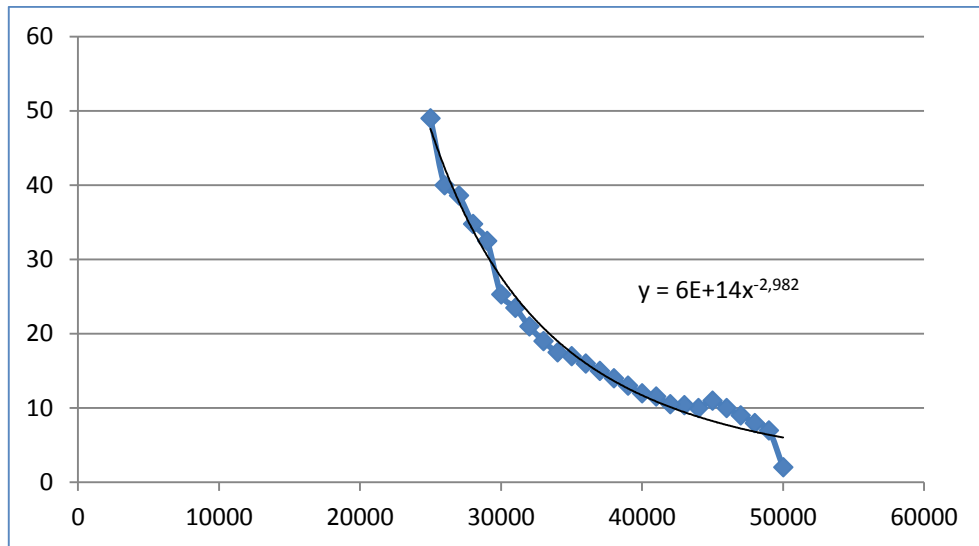
Gráfico 4. Comportamiento de la K_p



La ecuación del comportamiento de KP es: $Kp = [2E-08 * (\text{Setpoint})] - 0,0005$

En la siguiente grafica está el comportamiento del Ti:

Gráfico 5. Comportamiento del Ti



La ecuación del comportamiento de Ti es: $Ti = (6E+14) * (\text{Setpoint})^{-2,982}$

Estas ecuaciones se introdujeron en la programación de la MCU logrando así tener la sintonización correcta para cada set point a trabajar, y este mismo proceso se realizó para los demás rangos de operación de la máquina.

6. CONCLUSIONES

- Con el montaje y automatización de la máquina de calibración universal se generó un desarrollo tecnológico que brinda un aporte de suma importancia al concepto de pozo y campo petrolero inteligente.
- Se diseñó y construyó un sistema hidráulico para un servosistema de fuerza, el cual se usa en la máquina de calibración universal de celdas de carga. Se logró garantizar una capacidad máxima de 50.000 Lbf y todo el montaje hidráulico puede soportar una presión de hasta 3000 psi.
- Con el autómatas basado en PLC Siemens se consiguió trabajar en perfecta sincronía con la servoválvula, Celda de carga y demás componentes del sistema MCU, además se logró crear una programación capaz de suplir las necesidades de la MCU automatizada.
- Con la interface humano – maquina (HMI) desarrollada exclusivamente para la MCU, se logró aplicar los conceptos básicos de un sistema automatizado, esto a su vez sirvió para dotar a la MCU con tres Modos de interface de alto nivel, y dos opciones de calibración.

7. RECOMENDACIONES

- Instalar un COOLER como sistema de refrigeración en la unidad hidráulica con capacidad de enfriar 5 HP

$$POTENCIA = \frac{Pb \times Qb}{1714}$$

$$POTENCIA = \frac{2000 \times 3.3}{1714} = 3.85 \text{ HP}$$

- En los sistemas servo actuados la vibraciones son comunes, así que se recomienda instalar un acumulador hidráulico el cual las eliminará.
- Para poder controlar los tres rangos de trabajo de manera eficiente, se debe instalar una válvula de seguridad con tres niveles de presión.

BIBLIOGRAFÍA

2BP BLOGSPOT. [En línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://2.bp.blogspot.com/Y3ZB6bvM9ik/Ucb8AG4IMVI/AAAAAAAAAfU/XR27uVgZUEk/s1600/uno.png>>

4B BLOGSPOT. Arduino [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://4.bp.blogspot.com/PAk1ZLISfo/T_eVzsFq8tl/AAAAAAAAAJQ/l7q_xXrklm8/s1600/ide+arduino+2.png>

EBAC. Manómetro 3000psi [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://tienda.ebac-control.com/47/manometro-0-3000-psi.jpg>>

ECPLAZA. Siemens: Salidas análogicas [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://img.ecplaza.com/my/aotewellsiemens/4.jpg>>

HIDRÁULICA & NEUMÁTICA. Filtros de presión [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.hnsa.com.co/filtros-de-presion/>>

_____. Válvulas aisladoras de manómetro [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.hnsa.com.co/valvulas-aisladoras-de-manometro/>>

_____. Válvulas servo DDV proporcionales [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.hnsa.com.co/valvulas-servo-ddv-proporcionales/>>

IEEE STRUDENT BRANCH UPV. Arduino Mega [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.ieee.upv.es/wp-content/uploads/2012/10/arduino_mega_iso2_800.jpg>

INARSEV. CPU 315F-2PN/DP [en línea]. Disponible en internet: <URL:<http://www.inaserv.com/spool/gfx/d1312967669-6ES7317-6FF03-0AB0.jpg>>

INFORMAZIONE. National Instruments [en línea]. Disponible en Internet: <URL:http://www.informazione.it/pruploads/accd994a-4166-49db-83daa0aceb25f969/02080806_9431_p.JPG>

KOMPASS. Hydraulic Components [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.kompass.com.tw/product/fa/45-1.htm>>

MANTENIMIENTO MUNDIAL. Selección correcta de un aceite industrial [en línea]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/bo2.pdf>>

MARION FLUID POWER. Spin on filters [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.marionfluidpower.com/filters/spin-on-filters>>

SAPIENSMAN. Bomba de engranajes [en línea]. Disponible en Internet: <URL:<http://www.sapiensman.com/neumatica/images/bomba-de-engranajes.jpg>>

SENSEL MEASUREMENT. ICF450-ICF700 Tension compression compression pancake load cell [en línea]. Disponible en Internet: <URL: http://www.sensel-measurement.fr/201-large_default/lcf450-lcf700-tension-compression-pancake-load-cell.jpg>

SIEMENS. Siwarex U [en línea]. Disponible en Internet: <URL:http://w3.siemens.com/mcms/sensorsystems/SiteCollectionImages/wt/Productpics/siwarexu_z.jpg>