

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PÉNDULO INVERTIDO PARA EL
LABORATORIO DE OLEONEUMÁTICA**

REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRONICA
BUCARAMANGA**

2006³

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PÉNDULO INVERTIDO PARA EL
LABORATORIO DE OLEONEUMÁTICA**

REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES

**Tesis de grado presentada como requisito para optar el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director:
JHON FABER ARCHILA TORRES
Ing. Mecánico**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIA MECATRONICA
BUCARAMANGA**

2006

Nota de aceptación

Presidente Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Mayo 2006

AGRADECIMIENTOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA, por aportarme los conocimientos necesarios que fueron aplicados en el presente documento.

Ing. JHON FABER ARCHILA, Director del presente proyecto y quien con sabiduría y dedicación compartió sus grandes conocimientos.

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la oportunidad de estar aquí y demostrarme que con esfuerzo todo se puede.

A mis papas, Fermin Archila Fajardo y Gloria Inés Torres, por infundir en mi la fortaleza y los valores para seguir creciendo como persona y como profesional.

A mi novia Angelica Valencia, y a mi amigo Javier Andrés Pinzón, quienes estuvieron conmigo como apoyo para sacar adelante mi carrera y mi vida.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	17
1. MARCO TEÓRICO	18
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	18
1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO	19
1.2.1 Movimiento Periódico	19
1.2.2 Amplitud	20
1.2.3 Frecuencia Angular	20
1.3 VÁLVULAS CONTRABALANCE	21
1.3.1 Controladores lógicos programables "PLC's	23
1.3.2 Componentes de un PLC	26
1.3.3 Sistemas SCADA	35
2. DISEÑO MECÁTRONICO	44
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN MECATRONICA	44
2.2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO MECATRONICO	45
2.3 PROTOTIPO VIRTUAL	47
2.3.1 Diseño CAD	48
2.3.2 Cinemática del péndulo invertido	50
2.3.3 Modelo CAD	53
2.3.4 Dinámica	61
2.3.5 Resistencia de materiales	70
2.3.6 Simulación CAE	87
2.3.7 Descripción del equipo	102
2.3.8 Modulo de control	115
2.3.9 Modulo de electrónica	125

3. CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS	131
3.1 CONSTRUCCIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO	131
3.2 CONSTRUCCIÓN INTERFASES VISUALES	133
3.3 UNIFICACIÓN DE ETAPAS	135
3.4 UBICACIÓN DEL PÉNDULO INVERTIDO	138
4. PRUEBAS	139
4.1 COMPROBACIÓN DE DATOS TEORICOS CON LOS PRACTICOS	139
4.2 ANÁLISIS DEL ERROR DEL ÁNGULO	140
4.3 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	141
4.4.1 Señales de respuesta de LABVIEW con los FIELD POINT	141
4.4.2 Señales de respuesta de FIELD POINT con el PLC	144
CONCLUSIONES	145
RECOMENDACIONES	147
BIBLIOGRAFIA	148
ANEXOS	149

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Movimiento circular y movimiento armónico	20
Figura 2. Válvula contrabalance	21
Figura 3. Circuito de sostenimiento hidráulico.	22
Figura 4. Configuración más amplia del PLC	26
Figura 5. Relación Tabla de Datos / Programa de Usuario	31
Figura 6. Hardware del RTU	41
Figura 7. Enlace mecánico	44
Figura 8. Organigrama del Diseño mecatronico previo	46
Figura 9. Distancias y longitudes del péndulo	49
Figura 10. Suma de Vectores de las longitudes del péndulo	50
Figura 11. Hoja de cálculo en Excel	53
Figura 12. Péndulo invertido con cabezales de seguridad	54
Figura 13. Péndulo invertido con soportes diagonales.	55
Figura 14. Péndulo Invertido Con Soportes De Seguridad Trapezoidales	56
Figura 15. Péndulo invertido con base maciza	57
Figura 16. Péndulo invertido con base de perfil c250 x 45	58
Figura 17. Péndulo invertido con base en perfil c150 x 15.6	59
Figura 18. Prototipo del modelo existente del pendulo invertido.	60
Figura 19. Discos del péndulo.	61
Figura 20. Barra del péndulo.	62
Figura 21. Dimensiones de la barra del péndulo.	63
Figura 22. Masa de la barra.	63
Figura 23. Longitud de la barra	64
Figura 24. Masa de los bloques de la barra	65
Figura 25. Inercia del péndulo	66

Figura 26. Cargas del péndulo	67
Figura 27. Centro de Masas	67
Figura 28. Posición extrema del péndulo a 37°	68
Figura 29. Posición extrema del péndulo a 127°	69
Figura 30. Carga de compresión	73
Figura 31. Carga de flexión	74
Figura 32. Diagrama de momentos	75
Figura 33. Cortante y flexión en el primer tramo	75
Figura 34. Cortante y flexión en el segundo tramo	75
Figura 35. Cortante y flexión en el tercer tramo	76
Figura 36. Cortante y flexión en el cuarto tramo	76
Figura 37. Cortante y flexión en el quinto tramo	77
Figura 38. Cortante y flexión en el sexto tramo	77
Figura 39. Cortante y flexión en el cuarto tramo	78
Figura 40. Diagrama de Cortante y momento flector	78
Figura 41. Dimensiones del ancla	79
Figura 42. Cargas de rodamiento	80
Figura 43. Diagrama de Cortante de los pernos de los discos	81
Figura 44. Diagrama de cargas del eje del péndulo	82
Figura 45. Diagrama de Cortante y momento flector del eje	83
Figura 46. Flexión del eje del cubo	84
Figura 47. Diagrama de cargas del eje del actuador	84
Figura 48. Diagrama de cortante y momento flector del eje	84
Figura 49. El cubo	85
Figura 50. Eje del cubo	86
Figura 51. Simulación soporte de seguridad	87
Figura 52. Simulación del neopreno	89
Figura 53. Simulación soporte de la base	90
Figura 54. Simulación de la base con párales verticales	91
Figura 55. Simulación de base tipo N	92

Figura 56. Simulación soporte de la base	93
Figura 57. Simulación del eje del actuador	94
Figura 58. Simulación del anclaje	95
Figura 59. Simulación de los soporte de seguridad con la base	97
Figura 60. Simulación del eje del péndulo	98
Figura 61. Simulación del cubo	99
Figura 62. Simulación del vástago del actuador	100
Figura 63. Simulación de la placa de concreto	101
Figura 64. Soporte de seguridad (2 unidades en el equipo)	102
Figura 65. Disco del péndulo (2 unidades en el péndulo)	103
Figura 66. Apoyo trasero del cilindro hidráulico	105
Figura 67. Ejes del equipo	105
Figura 68. Soporte inferior del cilindro hidráulico	106
Figura 69. Base del péndulo	106
Figura 70. Cilindro hidráulico	107
Figura 71. Chumaceras	108
Figura 72. Barra del péndulo	109
Figura 73. Anclaje del cilindro hidráulico al péndulo	109
Figura 74. Modelo CAD del anclaje implementado	110
Figura 75. Circuito hidráulico	113
Figura 76. Circuito hidráulico	113
Figura 77. Organigrama del modulo de control	115
Figura 78. Respuesta del sistema.	116
Figura 79. Diagrama de bloques.	118
Figura 80. Respuesta del sistema de control en simulink	118
Figura 81. Organigrama del control con Labview	119
Figura 82. Interface visual en labview	121
Figura 83. Diagrama graceft del PLC	122
Figura 84. Organigrama del modulo de matlab.	123
Figura 85. Respuesta del sistema con matlab.	124

Figura 86. Circuito de contactos eléctricos	125
Figura 87. Tarjeta de adquisición de datos.	127
Figura 88. Organigrama del modulo de potencia.	128
Figura 89. La interfase grafica de matlab	134
Figura 90. Enlace de etapas de control, potencia con el modelo mecánico.	135
Figura 91. Circuito de comprobación de datos	139
Figura 92. Primera respuesta de control con labview	142
Figura 93. Segunda respuesta de control con labview	143
Figura 94. Respuesta de control del PLC con labviewn	144

LISTA DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Montaje del circuito hidráulico	111
Foto 2. Modelo físico	131
Foto 3. La interfase grafica de labview	133
Foto 4. Módulos de control	136
Foto 5. Prototipo físico.	137
Foto 6. Ubicación del péndulo invertido	138

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de las propiedades mecánicas de los materiales	71
Tabla 2. Comparación de geometrías e inercias.	104
Tabla 3. Variables de acción y Sensores de posición	122
Tabla 4. Mínimo grado de error del péndulo	141

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Programa De Matlab	150
Anexo B. Hoja de cálculo en excel	153
Anexo C. Programa del PLC	154
Anexo D. Programa de control con labview	157
Anexo E. Programa de control del PLC con LABVIEW	158
Anexo F. Programa del microcontrolador	159
Anexo G. Planos de prototipo mecánico	161

INTRODUCCIÓN

Actualmente la Facultad de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Autónoma De Bucaramanga no posee un equipo donde se pueda realizar el control automático de sistemas hidráulicos, por lo tanto con este trabajo se Diseña y Construye un sistema Mecátronico con el propósito de crear un instrumento de apoyo a la enseñanza y el aprendizaje tanto de hidráulica como de control.

El procedimiento que se llevo a cabo para el diseño de este sistema Mecátronico se encuentra consignado en el presente texto y esta organizado de la siguiente manera: un primer capítulo que comprende los objetivos propuestos para el alcance del prototipo final, y una recopilación de información que corresponde al funcionamiento de los elementos que se utilizaron para el desarrollo del mismo.

El segundo capítulo contiene la metodología del diseño Mecátronico, es decir, las principales etapas que condujeron a la implementación de un péndulo Invertido controlado automáticamente, este diseño esta compuesto primero por un prototipo virtual donde se determina en cada instante la posición, la velocidad angular y la aceleración angular del péndulo que describe un arco de circunferencia, además se analizan las fuerzas a las que se encuentra sometido y la resistencia de los materiales que lo componen, posteriormente se evalúa un diseño en CAD, un Diseño CAE , por consiguiente se puede cuantificar los costos en razón de maquinado y compra de los elementos que componen la maquina. Segundo por un modulo de control que consta de un programa o software, que en conjunto con un sistema de adquisición de datos, se encarga enviar y recibir señales para el manejo del ángulo del péndulo invertido, y por ultimo, un tercer un modulo de electrónica, constituido por una fase de potencia, que interactúa entre el sistema de adquisición de datos y el circuito hidráulico, además se describen algunos elementos implementados como son; los finales de carrera que aportan un

ambiente seguro en las prácticas del péndulo, y un circuito de comunicación serial para visualizar y procesar datos en matlab.

En el tercer capítulo se unifican las etapas del diseño mecánico, del modulo de control y del modulo de electrónica que conforman el prototipo final, el cual se logro con base en el análisis de los anteriores capítulos.

El capítulo cuatro corresponde a la realización de las pruebas, donde esta contemplado la comprobación de los valores teóricos con los resultados prácticos, el ensayo de movimiento del prototipo y el control del ángulo del mismo, además se analiza la respuesta del sistema en las fases implementadas.

En el quinto capítulo se escriben las conclusiones y recomendaciones, que son el análisis de las observaciones de las pruebas y las posibles mejoras que se pueden implementar en el prototipo final.

El Diseño e implementación del presente sistema, contribuye al fortalecimiento de la facultad de ing. Mecatrónica de la UNAB en las áreas de Diseño Mecánico, hidráulica, Automatización y control, además este dispositivo complementa la preparación de los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica y estimula la investigación en este campo de la ciencia.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar e implementar un péndulo invertido para el laboratorio de oleoneumática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

ESPECÍFICOS

- Diseñar e implementar un péndulo invertido para la generación de carga en las válvulas contrabalance.
- Visualizar el grado de inclinación del péndulo a través de una interfaz grafica.
- Comparar el valor teórico con el valor real de la fuerza del actuador hidráulico.
- Realizar el control del ángulo del péndulo invertido.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS¹

Desde los tiempos de Galileo Galilei (1564-1642) se conocen estudios sobre el péndulo. Siendo utilizado como medidor del ritmo en fenómenos de periodo relativamente corto.

El primer análisis científico del péndulo fue hecho por Cristian Huygene (1629 – 1695); el contribuyo con la determinación del centro de masa del péndulo real, tiene una masa distribuida y mostró la dualidad entre el péndulo físico y el matemático (péndulo ideal de masa concentrada).

Con esto, el problema técnico del péndulo se convirtió en un problema matemático, es decir, fueron los matemáticos quienes estudiaron este tema.

El péndulo llamo la atención del matemático especialmente por una aparente curiosidad: es un elemento mecánico bastante simple y relativamente fácil para realizar experimentos de medición como desplazamiento angular en función del tiempo, $B(t)$, pero obtener esta solución matemáticamente exacta es improbable, porque hasta hoy día no ha sido posible integrar la respectiva ecuación diferencial no lineal. A raíz de este problema del péndulo se desarrollo una gran cantidad de métodos analíticos para la aproximación de la solución exacta de ecuaciones diferenciales no lineales, debido a la fácil comprobación de dichas soluciones.

El péndulo parametrico, especialmente el que tiene una excitación oscilatoria en su punto de apoyo, empezó a ser campo de actividad científica a partir de los años 30 de este siglo. Debido al rápido desarrollo tecnológico e industrial de la

¹ www.walter-fent.de/physics/pendulum-s.htm

maquinaria, muchas veces sin los estudios dinámicos preliminares, y sin equipos de control, se presentó el fenómeno de la medición o indicación errónea en los equipos de carátula. Al excitarse el indicador (que presenta un péndulo físico) de estos equipos en su punto de apoyo, es decir indican un error. Fue el ingeniero KARL KLOTTER y su asistente GERTRUD KOTTOWSKY quienes analizaron en 1940 por primera vez este problema a fondo y describieron el fenómeno con la ecuación diferencial del matemático MATHIEU.

MATHIEU hasta analizando un problema netamente matemático, propuesto mucho antes por Rayleigh, la solución de una ecuación diferencial cuyos parámetros no son constantes. La solución exacta, más tarde por Floquet, es imposible, sin embargo se pueden encontrar aproximaciones convergentes. POINCARÉ y W. BOLOTIN lo demostraron para variaciones armónicas de los parámetros; MEIXNER encontró soluciones aproximadas para las variaciones periódicas arbitrarias.

Aun la ingeniería moderna encuentra nuevos problemas dinámicos relacionados con vibraciones paramétricas, es decir, el tema es todavía campo de la actividad científica e investigativa, especialmente con el desarrollo de sistemas de computación.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

Se definen algunos conceptos para facilitar la comprensión e interpretación de los movimientos del péndulo.

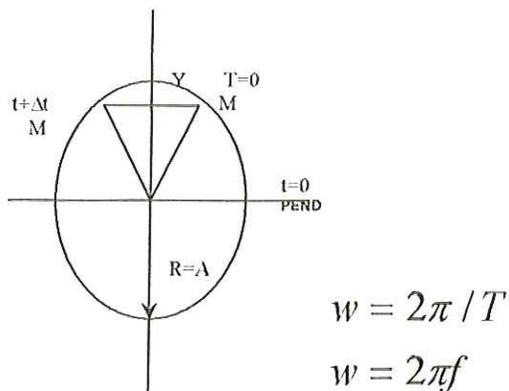
1.2.1 Movimiento Periódico. Es aquel donde el desplazamiento es función del tiempo; se define $A_t = A(t+T)$. Cuando una partícula, M, gira con movimiento circular uniforme ($\omega = \text{constante}$) y es proyectada perpendicularmente sobre el eje

1.2.2 Amplitud. es la máxima magnitud de desplazamiento en el movimiento, se designa con la letra A, su unidad es el metro (m).

1.2.3 Frecuencia Angular. En el movimiento armónico simple, es la máxima velocidad angular (ω) de un punto a lo largo de una trayectoria circular.

En la siguiente figura 1, se observa la relación existente entre el Movimiento circular y el movimiento armónico. La frecuencia, f , del movimiento armónico simple es el número de revoluciones por unidad de tiempo del punto de referencia (M). El tiempo que tarda el punto M en dar una revolución completa es el periodo del movimiento armónico simple; de lo anterior se define la frecuencia (ω) como la relación entre el ángulo barrido, es decir, 2π , y el tiempo utilizando para recorrer dicho ángulo.

Figura 1. Movimiento circular y movimiento armónico



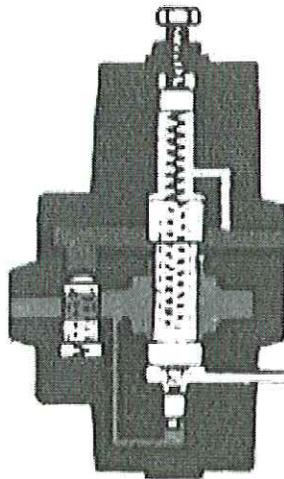
Fuente: http://www.walter-fendt.de/ph11s/pendulum_s.htm

1.3 VÁLVULAS CONTRABALANCE

Algunos procesos de la industria en donde se trabaja obre cargas que poseen un elevado peso se deben diseñar circuitos que posean ciertas características que dependen del tipo de carga que se vaya a manejar.

Por tal razón y para poseer un control total sobre este tipo de cargas se usaran elementos como reductores de presión y válvulas contrabalance para desarrollar circuitos que permitan según las características de la carga tener un control del sistema.

Figura 2. Válvula contrabalance



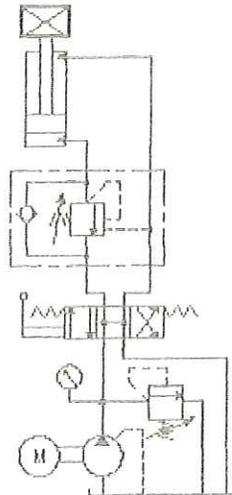
Fuente: http://home.wxs.nl/~brink494/balklep_e.htm

Una válvula de contrabalance es una válvula antirretorno pilotada mejorada. La mayor y más importante diferencia entre estas dos válvulas es que:

- La presión de apertura de una válvula antirretorno pilotada depende de la presión (aplicada por la carga) detrás de la válvula.

- La presión de apertura de una válvula de contrabalance depende de la presión del resorte detrás de la válvula.
- El desempeño dinámico de una válvula de balance es muchas veces mejor que el desempeño dinámico de una válvula antirretorno pilotada.
- La válvula de balance se aplica como una 'válvula de freno' en sistemas de grúas relativamente pequeñas para obtener un control positivo en un cilindro o motor hidráulicos con una carga negativa.

Figura 3. Circuito de sostenimiento hidráulico.



Fuente: http://home.wxs.nl/~brink494/balklep_e.htm

Funcionamiento (ver Figura 3): Cuando se activa el lado izquierdo de la válvula direccional 4/3 el cilindro hará su 'carrera de salida'. El aceite fluye a través de la válvula antirretorno que está integrada en la carcasa de la válvula de balance. Para bajar el cilindro se tiene que activar el lado derecho de la válvula 4/3. Desde ese momento en adelante la presión aumenta en el lado del vástago del cilindro. Esta presión abre la válvula de balance y el aceite del lado del pistón fluye a través

de la válvula de balance y de la válvula direccional de vuelta al depósito. Como la carga ayuda a bajar al pistón-vástago, este podría bajar más rápido de lo que el aceite es suministrado al lado del vástago del cilindro (el cilindro no está bajo control en ese momento). Sin embargo, la presión en el lado del vástago y por lo tanto la presión piloto en la válvula de balance disminuirían y el resorte cerraría la válvula de balance, hasta que encuentre un nuevo 'balance'. Cuando la válvula direccional es puesta repentinamente en su posición central mientras el cilindro cargado estaba bajando, la válvula de contrabalance se cierra inmediatamente. Esto causará un incremento de presión en el lado del pistón del cilindro. Sin embargo, la válvula de contrabalance se abrirá y ajustará la presión y así protegerá al cilindro contra una sobre presión.

1.3.1 Controladores lógicos programables “PLC’s”. El diseño de un PLC llega como una solución necesaria para disminuir el alto costo e inflexibilidad de los sistemas de control industrial basados en relevadores los requerimientos principales para este diseño eran: el dispositivo tiene que ser programable y re-programable, tiene que estar diseñado para un medio ambiente industrial, de bajo costo y competitivo en cuanto a los precios de los dispositivos similares en el mercado.

El resultado fue un aparato operado digitalmente el cual usa una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones internamente, para desarrollar funciones como lógica secuencial, temporizado, conteo, aritmética y control en general a través de módulos de entrada salida digital o análoga con aplicaciones para maquinas o procesos .

Algunas de las ventajas que nos ofrece este dispositivo son aumento de confiabilidad puesto que son diseñados para que funcionen bajo ambientes industriales, menor requerimiento de espacio por la necesidad del usuario a una tendencia descendente en el tamaño, programación y reprogramación, facilidad de

mantenimiento, costo del equipo relativamente bajo tomando en cuenta toda la funcionalidad y flexibilidad que se tiene disponible, re-utilización esto lleva a que si se utilizan en un tiempo para un proceso determinado cuando este termine o deje de funcionar, se podrá reutilizar para otra actividad que se requiera o para un proceso distinto, comunicación con otros dispositivos.

- **Los PLC's en la industria.** Los controladores lógicos programables es uno de los dispositivos que a revolucionado con la industria de la manufactura desde las maquinas y herramientas; algunos usuarios tienen PLC's hace mucho tiempo trabajando en sus fabricas y procesos, conservando la compatibilidad con los nuevos dispositivos que se van adicionando al nuevo sistema, para que estos se puedan integrar con los anteriores, un aspecto muy importante en relación a la compatibilidad es el conjunto de instrucciones, sumando las nueva instrucciones a las anteriores. Las habilidades de las instrucciones nuevas, regularmente se refieren a un cierto número de funciones que los dispositivos de nueva creación van adquiriendo.

Actualmente los PLC's se utilizan en un sinfín de aplicaciones y existe una mayor variedad de oportunidades disponibles para aplicaciones adicionales, de esta manera los PLC's se mueven de soluciones simples de sistemas sencillos en manufactura como maquinas y procesos sencillos a soluciones complejas para sistemas altamente complejos como líneas de producción de alto volumen o plantas de procesos de alto nivel tecnológico.

Considerado como el cerebro y el sistema nervioso de una fabrica, un controlador basado en un PLC se convierte en una de las herramientas mas utilizadas en el desarrollo de control en el ambiente industrial, el cual es adecuado para tareas de control inteligente, automatización y operación de un sistema en tiempo real.

Los PLC's pueden reducir el tiempo requerido para producir un producto, en especial permitiendo una configuración mas rápida del proceso de control de manufactura y proporcionando monitoreo de las condiciones del proceso, la información que el PLC captura y procesa ayuda para reducir tiempo de proceso industrial; igualmente es de gran ayuda para identificar cuellos de botella o problemas similares en el mismo. Por otro lado el PLC nos ofrece la posibilidad de automatización flexible por las facilidades que tiene en la comunicación con otros dispositivos, esta permite crear redes con un centro de control para monitorear todo el proceso, como estados de la maquinaria y generación de estadísticas en tiempo real, toda esta información es de mucho valor para los niveles administrativos y de operación de la planta.

De esta manera una fábrica automatizada nos ofrece, confiabilidad en el sistema, calidad del producto, flujo de información, reducción de costos por menor tiempo muerto, eficiencia y flexibilidad que es proporcionado en gran parte por uno de los procesadores más utilizados en los procesos productivos el PLC.

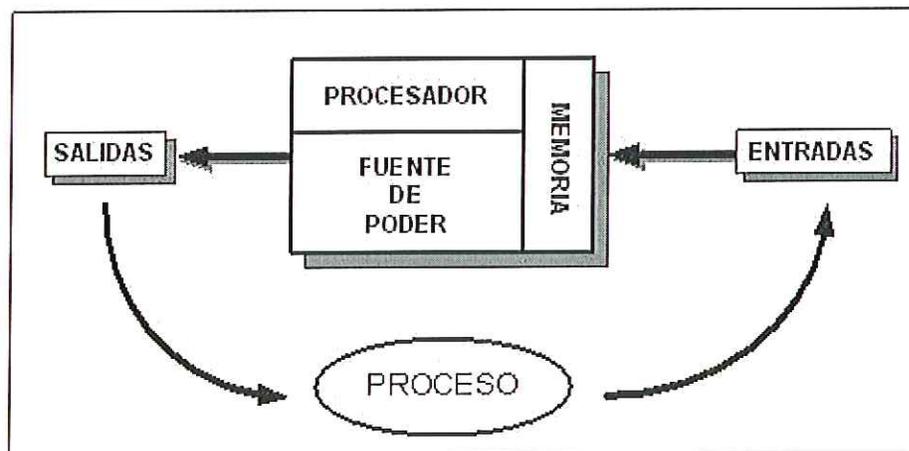
En pocas palabras todo inicia por un proceso productivo que genera las señales análogas y discretas las cuales describen funciones de dispositivos industriales, maquinas o equipos, estas son capturadas y procesadas por dispositivos de control para resolver y ejecutar los programas que están almacenados en su memoria, esta configuración en tiempo real, nos ofrece la opción de que las decisiones que tomen en este procesador se trasladen directamente e inmediatamente a las actividades y operaciones en el piso productivo de la planta, generando la toma de decisiones comparativamente mas rápida y eficientemente, esta información en muchos de los casos se procesa y transfiere a algún otro punto dentro de la organización generando un esquema de toma de decisiones en tiempo real mas efectivo y confiable, estos factores hacen que los dispositivos tengan que ser mas rápidos, flexibles y eficientes, a su vez que incrementan su capacidad.

1.3.2 Componentes de un PLC²

- **El Procesador (CPU).** Es la parte central del sistema en donde se realizan las instrucciones, donde se generan las acciones de control, en pocas palabras la lógica del programa se ejecuta en base a los datos obtenidos por las entradas y determina las señales de salida apropiadas, es decir, se encarga de operar las actividades de todo el sistema incluyendo así mismo.

La CPU esta compuesta por tres partes principales, el procesador, la fuente de poder y la memoria las cuales se pueden observar en la figura 4, la inteligencia de los procesadores esta en base del microprocesador que utiliza en sus circuitos internos, esto quiere decir si el procesador es muy poderoso y rápido, el PLC en conjunto tendrá unas características similares.

Figura 4. Configuración más amplia del PLC



Fuente: http://www.walter-fendt.de/ph11s/pendulum_s.htm

Tiempo de Ejecución (Scan Time). Consiste en el proceso de leer entradas, ejecutar el programa y modificar las salidas en forma cíclica; este ciclo es llamado

² <http://walter-fent.de/ph115/pendulum.htm>

las entradas, esta información la utiliza el procesador para tomar decisiones basadas en instrucciones que están almacenadas en el programa y posteriormente ejecutar acciones operativas en el proceso a través de las salidas y los dispositivos asociados a ellas.

El Scan Time nos define que tan rápido procesa el PLC la información por tanto es una de las características más importantes para la elección de un PLC; puesto que nos dice que tipo usar en caso de que a este se le conecten dispositivos de alta velocidad a las entradas.

Un "scan time" es básicamente un proceso continuo y secuencial de leer el estado de las entradas, evaluar la lógica de control y modificar las salidas de acuerdo a esta lógica, este puede variar del orden de los milisegundos. Depende del procesador utilizado, la cantidad de entradas - salidas y que tan extenso es el programa de control puede hacer que este se incremente o disminuya, en algunas ocasiones este se mide mseg/k (milisegundos por Kilobyte) de memoria programada. En un concepto más amplio existen una serie de parámetros que contribuyen a definir el tiempo de scan entre otros factores tenemos los siguientes: velocidad del procesador utilizado en el PLC, tipo de estructura de entrada salida en la memoria, interfases de entrada y salida utilizada, eficiencia en la ejecución de código e interfases del operador, estos elementos pueden incrementar o reducir el tiempo de "scan".

▪ **Memoria.** La memoria es el lugar donde se puede guardar y almacenar la información de los sistemas digital mientras que esta sea requerida; esta información puede estar formada por datos, programas etc. Existen diferentes tipos de memoria digital para diferentes aplicaciones en el caso de los PLC las memorias más comúnmente utilizadas son:

ROM (READ ONLY MEMORY). Este tipo de memoria (Memoria de Solo Lectura) esta diseñada para almacenar información en forma permanente, como su nombre lo dice, la información que almacena solo se puede leer por lo tanto no se puede alterar, en esencia la memoria ROM es una memoria en la cual la información almacenada no se puede perturbar por los medios ordinarios requiere de medios especiales. Regularmente este tipo de memoria se utiliza para almacenar el programa ejecutivo (programa monitor).

PROM (PROGRAMMABLE READ ONLY MEMORY). La PROM (Memoria de Lectura Solamente Programable) es una variante de memoria ROM que puede ser llamada ROM programable, por lo tanto es una memoria no volátil pero con la diferencia que esta es programable y regularmente se utiliza para almacenar programas de respaldo del programa de control del PLC.

En una memoria PROM cada una de las conexiones en la memoria viene con una pequeña conexión fusible intacta del fabricante y el usuario puede fundir selectivamente estos fusibles para producir en la memoria los datos a almacenar, una vez que la conexión fusible se funde ya no se puede volver a conectarse.

EEPROM (ELECTRICALLY ERASABLE PROGRAMMABLE READ ONLY MEMORY). La memoria EEPROM (Memoria de Lectura Solamente Programable Borrable Eléctricamente) es más versátil puesto que no requiere de equipo especial para su programación o modificación de la información que contiene. Se utiliza para almacenar programas de respaldo del PLC con la gran ventaja que esta disponible para su transformación. Tiene una estructura de transistores MOSFET que contiene una compuerta de silicio sin ninguna conexión eléctrica es decir flotante con la característica de borrado eléctrico, aplicando un voltaje alto se induce una carga que permanecerá aunque se suspenda la energía, e invirtiendo este voltaje esta carga se elimina, la programación y el borrado de EEPROM se hace eléctricamente.

RAM (RANDOM ACCES MEMORY). La memoria RAM es una memoria volátil, esto quiere decir si no existe una fuente de poder que la mantenga activa la información que contiene se pierde, pero su accesibilidad es más rápida para modificación de la información, la utilización es regularmente para mantener el programa de control disponible para el procesador.

La RAM se emplea como medio de almacenamiento temporal para programas y datos, el contenido de las localidades de memoria tiene ciclos de lectura y escritura rápidos y esta es su gran ventaja, la memoria consta de varios registros en el cual se puede almacenar solo una palabra de datos y con una sola dirección única, la capacidad en PLC's varia de 1K, 4K, 8K, 16K, 32K, 128K y 256K y capacidades de palabra de 8 y 16 bits sin embargo se pueden hacer combinaciones para aumentar estas capacidades.

RAM ESTATICA SRAM. La RAM estática es la más comúnmente utilizada en dispositivos digitales, la CPU efectúa en forma continua operaciones de lectura y escritura en su memoria a muy alta velocidad determinada por las propias limitaciones de la CPU.

RAM DINAMICA DRAM. Se caracteriza principalmente por su gran capacidad y bajos requerimientos de energía, esta memoria guarda los unos y ceros en cargas sobre pequeños capacitores, dada la tendencia de los capacitores de fugar la carga después de cierto tiempo se requiere recargar periódicamente estas cargas, esto se llama el proceso de refresco, la estructura de la celda es más sencilla, esto permite colocar 4 veces mas capacidad que las SRAM y el costo por unidad de almacenamiento es $\frac{1}{4}$ de una de tipo SRAM, para aplicaciones de alta velocidad y poca memoria es conveniente la SRAM, y cuando se requiere grandes cantidades de información se utiliza la DRAM.

- **Tabla de datos.** La tabla de datos contiene una imagen del sistema de control, dependiendo de su estado en determinado momento, puesto que tiene el valor lógico de las entradas y las salidas indicándonos que valor lógico tiene cada uno de los dispositivos a los cuales están asociados.

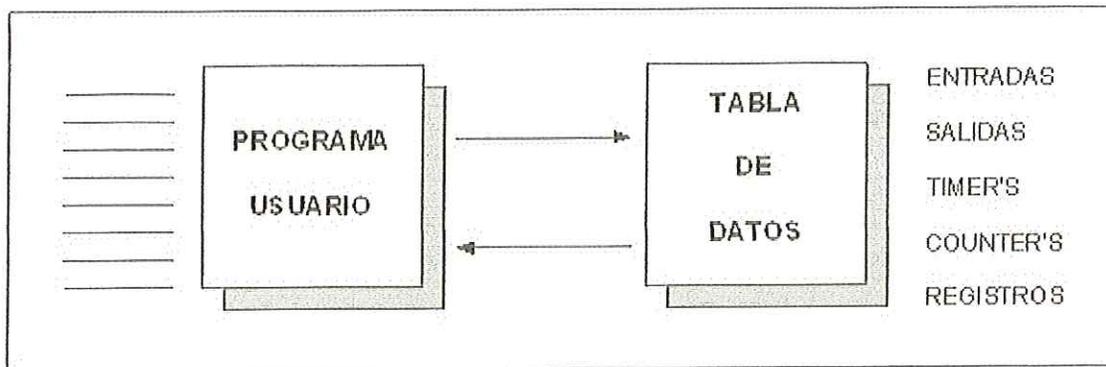
Tabla de Entradas. Es un arreglo de bits que representa el estado de cada una de las entradas digitales, ocupando cada una de ellas un BIT de información, si este es 1 (uno) la entrada determinada esta encendida (ON), si esta es un 0 (cero) la entrada correspondiente esta apagada (OFF). Esta información es modificada en cada ejecución de un (Scan) del programa, en función de lo que pase externamente en el sistema, el valor lógico almacenado en esta tabla es el que se utiliza para la toma de decisiones en el programa.

Tabla de Salidas. Es un arreglo de bits en el cual cada uno de ellos representa una salida y por lo tanto un dispositivo externo, de igual forma que la tabla de entradas; cada uno de los dispositivos de salida tiene una representación lógica con un BIT que esta en 1 (uno) si la salida esta encendida (ON) y es 0 (cero) si la salida esta apagada (OFF), cada ejecución del programa (Scan) se modifica esta tabla y genera las modificaciones correspondientes hacia el exterior.

Tabla de Bits Internos. Todos los PLC's tienen una área de bits, los cuales representan entradas salidas internas, que se utilizaran en los programas como pasos intermedios entre la lógica de las entradas y las salidas externas, el valor lógico de estos esta dentro de la tabla de datos, disponible para el programa o dispositivos que los requieran. Estos conservan información lógica de pasos intermedios de los programas o estados del sistema que son importantes para el programa de control y basados en ellos se genera lógica más compleja o sofisticada.

Registros de Almacenamiento. La información almacenada en las tablas anteriores son del tipo de bits 1 o 0, pero no siempre requerimos únicamente datos digitales 1 o 0 en ocasiones necesita datos más representativos, por otro lado necesitamos representar datos numéricos como el valor de un temporizador, el número de conteos de un contador, etcétera.

Figura 5. Relación Tabla de Datos / Programa de Usuario



Fuente: http://home.wxs.nl/~brink494/balklep_e.htm

▪ **Fuente de Poder.** La principal tarea de la fuente de poder de un PLC es proporcionar energía al hardware del procesador, a la memoria y a las entradas salidas para que estas funcionen, en ocasiones, puede proveer algunos de los voltajes de operación de los módulos de entrada salida que se utilicen en el PLC. La fuente de poder que alimenta el procesador y el PLC en general es una fuente que esta dedicada a proveer energía y en ocasiones es parte del mismo PLC.

Consideraciones de Carga. Fuente de poder para PLC: En esta fuente se requiere alimentar la CPU, los módulos de E/S, probablemente gabinetes (racks) donde se instalan los módulos que también consumen corriente, la consideración de carga es la correspondiente a la cantidad de módulos que se utilicen y su

naturaleza, la cantidad de módulos será la fuente de mayor o menor corriente, la CPU no es un factor determinante para la fuente.

Fuente de Poder para Dispositivos Externos: Para seleccionar la fuente de poder a utilizar en un sistema determinado se tiene que tomar en cuenta entre otras cosas la carga que se va a conectar a este sistema, que tipos de dispositivos se van a conectar a ella, por ejemplo arrancadores de motores, válvulas, focos piloto, sensores, etc. Realizar una evaluación de cargas basados en el consumo de cada uno de los dispositivos tomando en cuenta que se tendrán probables modificaciones futuras.

- **Entradas/Salidas.** Las E/S (ENTRADAS/SALIDAS) es una de las partes más importantes de los PLC's sin lugar a dudas puesto que representan la comunicación con el mundo externo; lo que nos evita preocuparnos por lo que en otros dispositivos se conoce como interfaces. Las E/S son básicamente las interfaces entre los sistemas internos del PLC y los procesos externos para que estos sean monitoreados y controlados.

El relacionar un dispositivo digital como el PLC con el mundo real es la tarea más importante de las entradas y salidas, y poner la información disponible para que este procesador la utilice es su actividad más importante, entre las configuraciones más comunes en su relación con el procesador y las entradas salidas son las siguientes:

Entradas Salidas Integradas (locales). Esta configuración es cuando la CPU y las entradas salidas están en un mismo gabinete (Rack) o en una configuración local, físicamente están localizadas en un mismo lugar y estas regularmente no requieren una configuración lógica desde del punto de vista de hardware o software para su funcionamiento.

Entradas Salidas Distribuidas (remotas). Esta configuración es cuando la CPU y las entradas salidas están remotamente localizadas, físicamente tenemos la CPU localizada en un punto en el sistema y las entradas y salidas se encuentran más cercanamente localizadas a los dispositivos a los cuales están conectadas y regularmente requieren configuración desde el punto de vista de hardware y de software en algunos casos.

Entradas Salidas Compactas. Esta se refiere a que las entradas, salidas y la CPU están en un solo dispositivo, regularmente no requieren ningún tipo de configuración.

- **Tipos de entradas/salidas.** Contamos básicamente con dos tipos de E/S las discretas o digitales y las analógicas, a continuación se desarrollará una explicación un poco más explícita de cada una de ellas.

Entradas - Salidas Digitales. Las unidades de entrada salida nos proporcionan la conexión física entre el mundo digital del PLC y el mundo real del proceso a controlar, a través de circuitos de interfaces que pueden sensar y medir señales físicas, de afuera hacia adentro (entradas) y de adentro hacia afuera (salidas). Las E/S digitales se relacionan con las interfaces de tipo discreto básicamente con señales de tipo ON/OFF, abierto/cerrado.

Entradas Digitales. La función de las entradas digitales es capturar todos los eventos que sucedan en el mundo exterior, para que el PLC los interprete y de esta forma pueda tomar decisiones respecto a lo que se le programó. Para realizar esta actividad es necesario que los módulos de entrada tengan asociados dispositivos capaces de detectar estos cambios de estado en los sistemas a controlar como interruptores, sensores, selectores etc. O cualquier elemento que nos ayude a desarrollar esta tarea.

Salidas Digitales. La función de las salidas digitales es las acciones que el PLC tenga que realizar en el sistema, se llevaran a cabo por medio de los dispositivos conectados a ellas y estos a su vez tienen influencia sobre las variables del sistema, como la velocidad de un motor, temperatura de un horno, nivel de un tanque de almacenamiento etc, estos dispositivos conectados a las salidas se encenderán o apagaran según sea la necesidad, por lo tanto las salidas manejan el sistema de acuerdo a lo que el PLC les indique.

Entradas - Salidas Análogas. En algunos campos de aplicación de los PLC's se requieren utilizar señales de E/S de tipo continua (análoga), que a diferencia de las E/S discretas, este tipo de señales presentan varios niveles, es decir la señal en forma de valores de voltaje o corriente que muestra en forma similar la señal física que se está analizando.

▪ **Módulos análogos de entrada.** Los módulos análogos de entrada son módulos inteligentes que transfieren señales análogas de transductores de variables físicas continuas a datos numéricos que representan variables físicas como información en la tabla de datos, utilizando las instrucciones de transferencia de datos, el proceso consiste en lo siguiente:

a) El transductor análogo toma una variable física que puede ser temperatura, presión, nivel, etc. y la traduce a un valor en voltaje o corriente según el transductor utilizado.

b) Este voltaje o corriente en el módulo de entrada análoga es convertido en un valor digital utilizando un convertidor Análogo Digital el valor obtenido es proporcional al voltaje o corriente en la entrada.

c) Este dato es transferido a la tabla de datos en la memoria utilizando instrucciones de manejo de información.

Módulos análogos de salida. Los módulos de salida análoga son módulos inteligentes que transfieren datos de la memoria y los presentan en los módulos como voltajes o corrientes que a su vez están conectados a dispositivos de campo como actuadores análogos y esta actividad se lleva a cabo de la siguiente manera:

a) El módulo análogo recibe del procesador un dato numérico utilizando las instrucciones de manejo de información.

b) Este es trasladado por medio de un convertidor digital análogo a un valor proporcional de voltaje o corriente en la salida.

c) Este voltaje o corriente es conectado a un actuador análogo que modifica el comportamiento del proceso modificando alguna de las variables físicas a las cuales afectan (velocidad, desplazamiento, temperatura, etc.).

1.3.3 Sistemas SCADA². En los sistemas de control de procesos existen los elementos que interactúan con el medio ya sean, para recibir datos, como los sensores, o para modificarlo como los actuadores, y los elementos de control, los cuales se encargan de procesar toda la información proveniente de los sensores, la analizan y generan una respuesta hacia los actuadores.

Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition, control y adquisición de datos de supervisión) están dentro de este tipo de elementos de control, proporcionando no sólo control y supervisión de un gran número de procesos, los cuales pueden estar a grandes distancias entre sí, sino que también presentan información relacionada de forma amigable, tal que un usuario la pueda entender.

² http://home.wxs.nl/vbrink494/balklep_e.htm

Los primeros sistemas SCADA fueron sistemas que se modificaban según su propósito, los fabricantes atendían las peticiones de los compradores que requerían de un sistema de control para su industria, de acuerdo a estas pautas, modificaban un SCADA antiguo y le agregaban los nuevos requerimientos, en algunos casos omitían funciones que no se requerían y vendía el nuevo producto al fabricante. Estos eran sistemas que generaban reportes periódicos a partir de señales que representaban medidas y condiciones de estado, muchas de estas provenientes de lugares remotos, el monitoreo y control eran muy simples, la muestra de los datos se daba con contadores y lámparas, tiempo después los computadores se encargaron de recolectar los datos, y también de presentarlos sobre una pantalla, realizando actualmente, funciones de control mucho más complejas.

Los actuales proveedores de sistemas SCADA crean diferentes módulos, para procesos específicos, se puede encontrar entonces, módulos para procesamiento de papel y celulosa, industria de aceite y gas, hidroeléctricas, plantas de agua, control de fluidos, etc. Además estos sistemas tienen la capacidad de integrarse a la parte gerencial del proceso, proveyendo información que es necesaria a la hora de tomar decisiones económicas cotidianas.

Dada esta última tendencia es imperativa la creación de sistemas de control precios y confiables, para esto se usan sistemas redundantes, en los cuales se toma un controlador SCADA en paralelo al sistema de control primario, y también un sistema de reserva del mismo situado en un lugar distinto al del proceso. Esta arquitectura proporciona la transferencia de automática de la responsabilidad del control de cualquier ordenador, en caso de que uno falle, y evita una interrupción significativa de las operaciones.

Los sistemas SCADA agrupan puntos de un proceso, los cuales proporcionan información tanto analógica como digital o de estado (por ejemplo, abierto o

cerrado). A su vez pueden enviar datos y controlar el secuenciamiento de las operaciones, aplicando las reglas funcionamiento que el proceso requiere.

Un SCADA esta compuesto por una estación principal (llamada Estación Principal, Master Terminal o MTU); una o varias estaciones recolectoras de datos de campo llamadas Remote Terminals Units o RTU y el software apropiado para el proceso, el cual es usado para monitorear y controlar remotamente los dispositivos de campo. Los sistemas SCADA ofrecen elementos de control a lazo abierto y lazo cerrado, cubren áreas geográficas grandes, comunicándose entre dispositivos por una LAN (Local Area Network o Red de área local). El control puede ser automático o realizado a través de comandos por un usuario, la adquisición de datos es realizada por el RTU, los cuales exploran los elementos conectados a ellos (sensores de temperatura, presión, nivel, etc.) en intervalos muy cortos, la MTU explora los RTU a una velocidad menor, los datos entonces serán recibidos e interpretados, en caso de una lectura grave, dará una alarma y se procederá a la corrección pertinente.

Los datos de lectura, pueden ser de tres tipos, digitales (on/off) asociados a alarmas, análogos representados a través de gráficos, y de pulso (conteo de revoluciones de un medidor). La muestra de estos datos se hace a través de una pantalla, generalmente, en una representación gráfica de la planta o proceso a controlar, los datos que cambian se muestran como dibujos de primer plano denominados "foreground ", y la planta es un fondo estático (background), el "foreground " es actualizado a medida que los datos de lectura van cambiando, otros valores de tipo analógico representan sus cambios a través de una gráfica. Estos datos pueden ser mostrados continuamente, o por disposición del operario cuando este considere relevante chequearlo.

- **MTU – Master Terminal Unit.** La MTU es la parte central de los sistemas SCADA, en ella, se realizan las operaciones indispensables para el control de la

planta, a su vez, es la encargada de mostrar toda la información referente, como también su correspondiente recopilación.

A continuación un listado de las principales funciones de una MTU:

- **Adquisición de datos:** realiza toda la recolección de datos provenientes de los RTU.
- **Trending:** todos los datos que son recolectados ingresan a una base de datos, los cuales, pasan a ser graficados. El trending grafica en tiempo real y almacena comportamientos o tendencias para su posterior análisis.
- **Procesamiento de alarmas:** las MTU analizan los datos, y en caso de una condición anormal genera una señal de alarma.
- **Control:** automatización de los procesos, a través del control en lazo cerrado.
- **Visualizaciones:** gráficas que representan la planta y que a su vez informan cambios o estados que esta tiene, (por ejemplo, tanque desocupado, o válvula cerrada).
- **Informes:** generación de reportes del proceso, estos son enviados mediante una red LAN a otras estaciones de trabajo.
- **Mantenimiento del sistema:** en todo proceso de control es indispensable un plan de seguridad, en los casos de los sistemas SCADA se habla de sistemas Mirror, los cuales toman el mando en caso de que el sistema principal falle.

- **Interfaces con otros sistemas:** proporcionan la transferencia de datos a sistemas de índole corporativa, como el procesamiento de órdenes de trabajo, de compra, etc.
- **Seguridad:** controla el acceso a distintas partes del sistema.
- **Administración de la red:** monitoreo de la red de comunicaciones.
- **Administración de la base de datos:** Es la encargada de la reconfiguración del sistema, es decir, agregar cambios, como nuevas estaciones de trabajo, condiciones de seguridad, etc.

Las MTU de los sistemas SCADA son compatibles con la mayoría de las plataformas o sistemas operativos existentes, anteriormente, este tipo de sistemas requerían de equipos que sobrepasaban las cualidades de los existentes, lo que exigía el diseño de un hardware específico. En los 70 y a principios de los 80, los SCADA operaban bajo la plataforma RSX11M, la cual trabajaba en equipos PDP11 de la Digital Equipment Corporation, posteriormente se empezó a trabajar con Unix, sin embargo, la tecnología de la computación fue avanzando, trayendo consigo nuevas y mejores características que permiten que un sistema SCADA pueda trabajar ahora en cualquier equipo, actualmente se usan plataformas como Windows NT, QNX y Solaris (estas últimas bajo plataforma UNIX).

Adquisición de datos. La forma en que se ha venido tratando la transferencia de los datos ha ido cambiando a medida de que los sistemas se han vuelto mucho más complejos, rápidos y rigurosos.

Al principio, la comunicación entre la MTU y los RTU del sistema trabajaban a través de un protocolo de interrogación (polling), en el cual la central indagaba periódicamente los RTU, estos compartían la información, sin embargo, nunca informaban por cuenta propia y siempre esperaban a que la MTU los indagara

para informar de algún cambio. Los RTU se encargaban de procesar los datos provenientes de los instrumentos de lectura, así como también de la conversión de las señales análogas a digitales. Sistemas más modernos, permitían a RTU's más inteligentes procesar la información que le llegaba, y agruparla por horas, la central se encargaba entonces de preguntar a los RTU sobre algún cambio, si la respuesta era negativa, pasaban al siguiente. Los valores umbral que se consideraban para que el RTU determinara que hubo algún cambio en el valor reciente, oscilaban entre el 1 y el 2 por ciento de la señal anterior. Este protocolo se llama de reporte por excepción, y puede reducir el tráfico de comunicaciones, siempre y cuando hubiera algún cambio lento en el sistema a controlar.

Un adelanto en este tipo de comunicación, permite al RTU reportar los cambios sin que éste espere una pregunta previa por parte de la central, reduciendo el uso del sistema de comunicaciones y permitiendo así el control de un mayor número de RTU's. Sin embargo se realizaba un chequeo a todas las unidades, si una de ellas llegara a fallar, el sistema nunca se daría por enterado. Para evitar que dos RTU interfirieran en su comunicación, si estos llegaran a enviar datos simultáneamente, se utilizaba el sistema de acuse de recibo, el cual informa que los datos pudieron ser procesados. Una respuesta negativa haría que el RTU reenviara los datos.

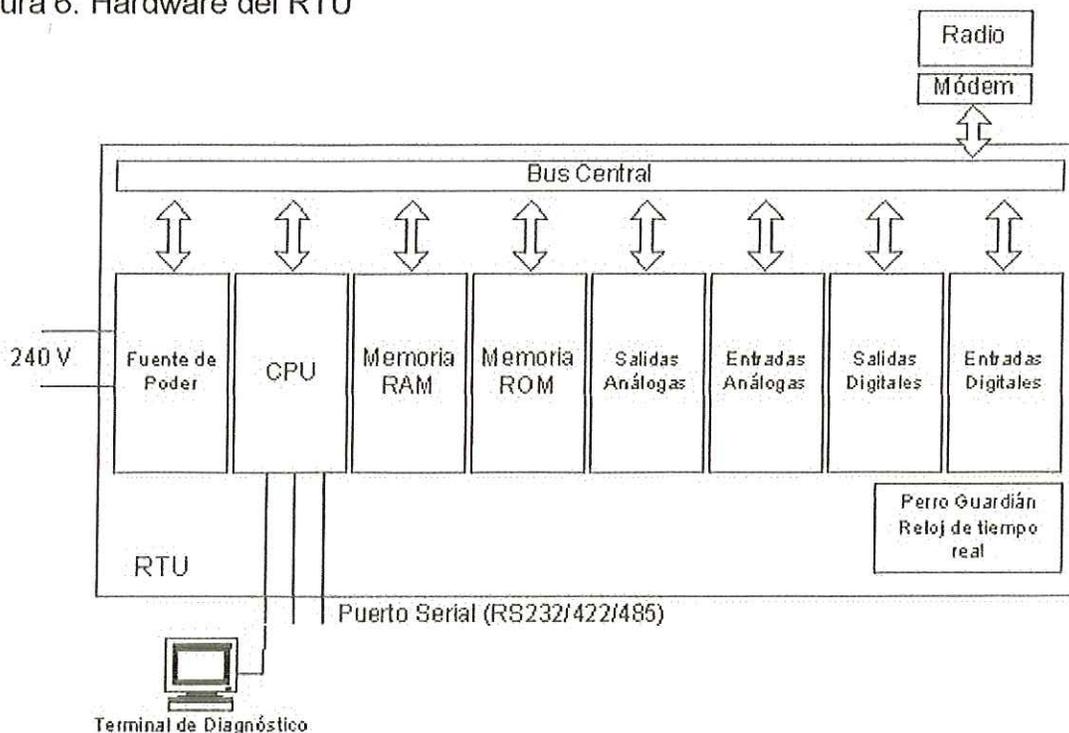
Para manejar los fallos de comunicaciones que se podrían originar en la transmisión de los datos, los sistemas SCADA tienen como operatoria normal incorporar un sistema de seguridad en la interrogación, en la cual se exige que cada RTU se debe comunicar periódicamente, si no responde, entonces se procederá a realizar un número de recomprobaciones. Las fallas en las respuestas previas, harán que el RTU en cuestión sea marcado como "fuera de servicio".

RTU – Remote Terminal Units. El RTU es la unidad encargada de la recepción de los datos provenientes de los elementos de adquisición de datos tales como sensores, y del manejo de los actuadores que trabajan sobre el sistema. A su vez,

se encarga de la emisión de los datos hacia el MTU y de la recepción de respuestas provenientes de este.

Existen dos tipos de RTU's, los básicos denominados "single boards", y los modulares que son más completos y funcionales, los primeros, están compuestos por una sola tarjeta que contiene puertos de entradas y salidas tanto digitales como análogas, la cantidad de puertos depende del modelo del equipo, los cuales son fijos y no dan posibilidad de cambio sobre el mismo modelo, así un aumento en el número de entradas (mas sensores, por ejemplo) implicaría un cambio de equipo. Los modulares son equipos más completos, constan de una tarjeta madre sobre la cual se pueden agregar módulos o tarjetas, de igual o diferentes funciones, se pueden apreciar módulos de entradas y salidas digitales, así como su versión analógica, módulos de control de motores, válvulas, etc.

Figura 6. Hardware del RTU



Fuente: http://home.wxs.nl/~brink494/balklep_e.htm

El hardware del RTU, *figura 6*; está compuesto por una CPU o unidad central, la cual es el cerebro de todo el equipo, una memoria RAM, donde se almacenan los datos mas recientes, una ROM, donde se almacenan programas y datos más importantes, un puerto de comunicación ya sea de tipo serial o módem, una fuente de alimentación (con batería incluida, previniendo fallas eléctricas), un perro guardián, el cual se encarga de reiniciar el RTU en caso de fallos, un sistema de protección eléctrica, las interfaces de entrada y de salida y un reloj de tiempo real. Controlando o supervisando el comportamiento del RTU, tenemos los programas o el software, conformado por: un sistema operativo en tiempo real, un driver para la comunicación con la central, un driver para los módulos de entradas y salidas, un programa que permita la exploración, procesamiento y grabación de la información proveniente del campo, además de que interactúe con las peticiones de la central, un módulo que permita la configuración del usuario de parámetros propios del RTU como la habilitación o deshabilitación de entradas y salidas, un módulo de diagnóstico de datos y un sistema de archivos con soporte para la descarga de programas realizados por el usuario.

Cuando un RTU explora los módulo de entrada, lo hace a una frecuencia muy alta, entregando esta información al MTU cuando este la requiera, en el caso de que el MTU es el que haga la petición, sin embargo, los RTU puede realizar operaciones sobre los elementos de campo conectados a él, como cambios de estado, control del tiempo entre los cambios y almacenaje de datos. Puede realizar un procesamiento de alarmas, y ejercer sobre ellas las acciones de control correspondientes de acuerdo a la acción que determine el MTU.

La capacidad del RTU depende del modelo, los grandes pueden procesar cientos de entradas de información y además conectar RTU's de menor tamaño. Los de menores características se denominan sistemas stand-alone minúsculos, funcionan con baterías las cuales pueden durar mas de un año, guardan los datos provenientes de campo en memorias de tipo EPROM o FLASH ROM, no pueden

manejar un protocolo de comunicaciones, por lo que sólo se puede acceder a la información por vía manual a través de un operador, su cerebro es un procesador limitado compuesto por un chip simple con poca memoria.

Los sistemas STAND-ALONE pequeños le siguen en categoría, estos tienen la capacidad de tomar datos de los sensores periódicamente, pueden manejar protocolos de comunicaciones y su alimentación es una batería de energía solar de alto rendimiento.

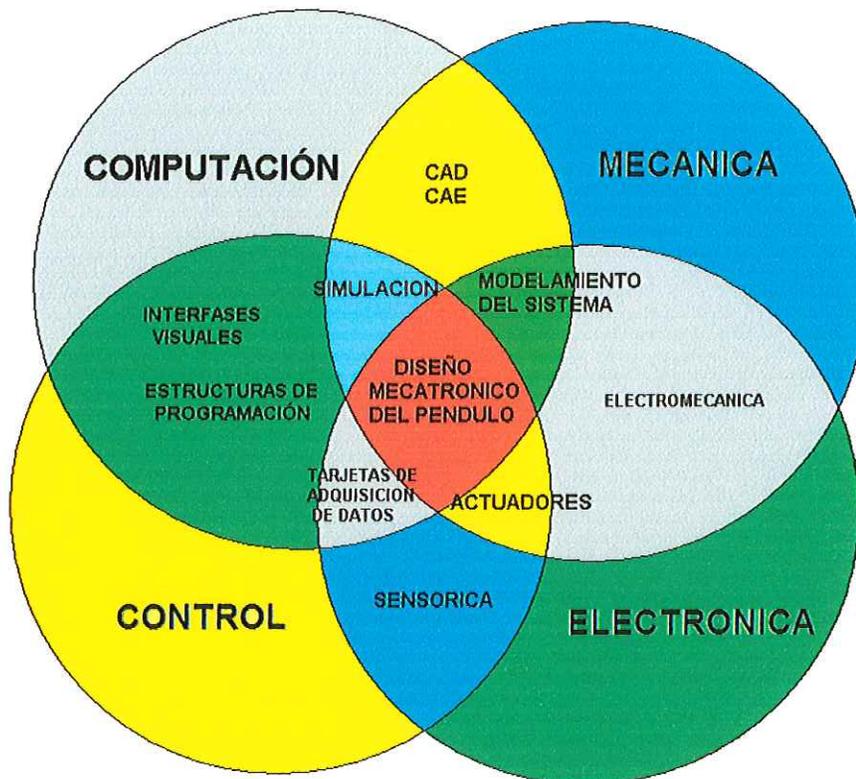
Los sistemas medios son ordenadores industriales single board exclusivos para este propósito. Los sistemas grandes son un completo control de planta con todas las alarmas visuales y sonoras, se comunican sobre LAN de alta velocidad.

Dado el alto número de fabricantes y la carencia de una estandarización, en especial en el área de comunicaciones, es virtualmente imposible conectar dos RTU de diferente origen directamente, sin embargo, se han creado emuladores y conversores de protocolos que permiten la interacción de sistemas totalmente diferentes. Algunos estándares han comenzado a emerger para RTU's, como DNP's e IEC870 para las comunicaciones y el IEC1131-3 para programar RTU's.

2. DISEÑO MECÁTRONICO

2.1 CONCEPTUALIZACIÓN MECATRONICA

Figura 7. Enlace mecatrónico



Fuente: Autor

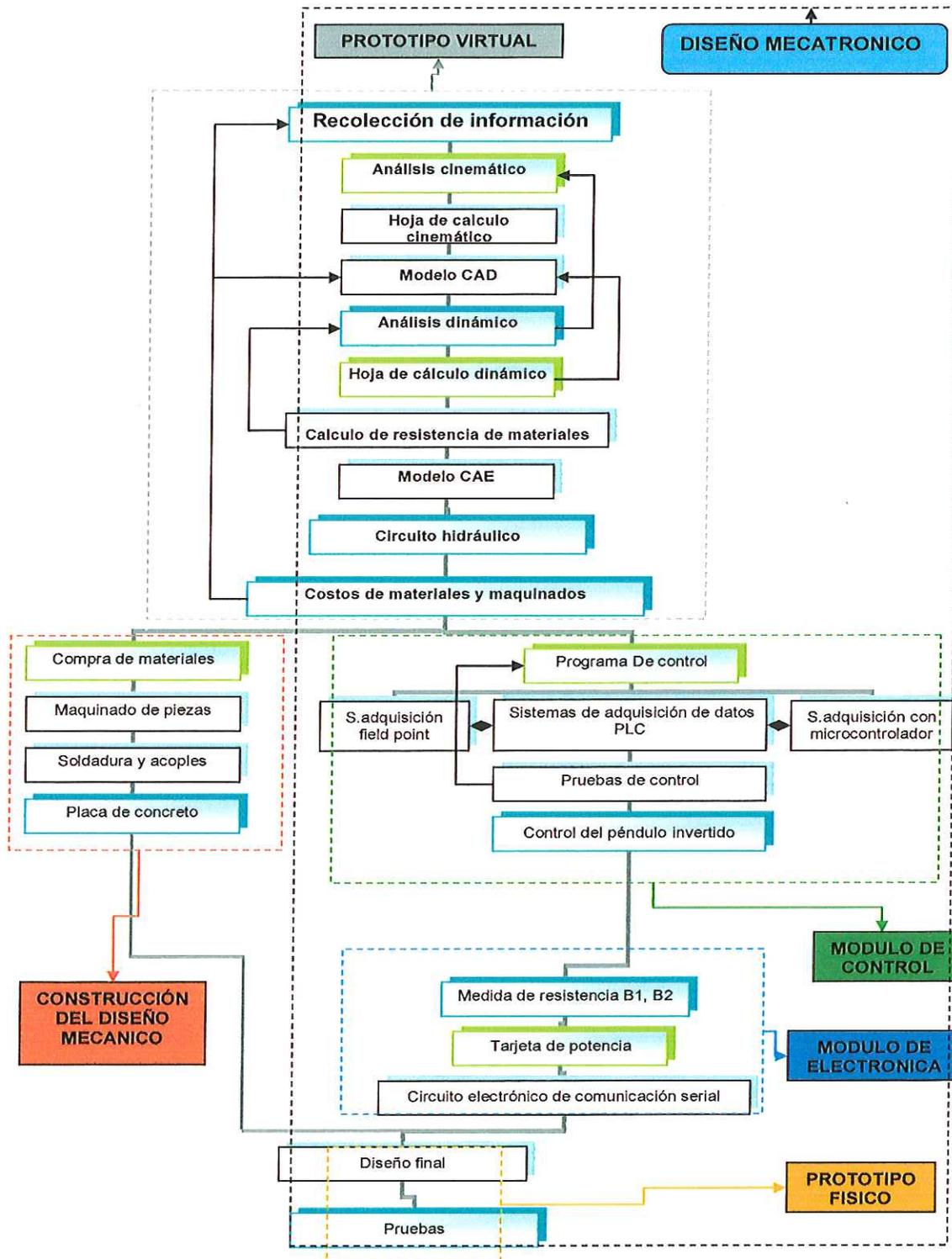
El diseño mecatronico contiene cuatro fases que se enlazan entre si para conformar en su totalidad el **péndulo invertido**, las cuatro fases son: **Mecánica, computación, electrónica y control**; en la fase de control y mecánica se derivan las válvulas direccionales encargadas de controlar el péndulo, el control de estas válvulas está supervisado y controlado por un software y un sistema **SCADA**, que nace del enlace de las áreas de computación y control, en conjunto con lo anterior

aparece la relación control, electrónica y computación, donde se realiza el montaje de los módulos de Field Point, el PLC y la tarjeta de adquisición de datos, las cuales se enlazan con la conexión de mecánica, electrónica y control que es la respuesta del actuador del circuito hidráulico; la fase siguiente pertenece a la etapa de Mecánica y electrónica, enlazando la electromecánica, ésta es la interfase de los elementos mecánicos que intervienen en el movimiento y los elementos accionarios, compuesta por el circuito hidráulico y la fase de potencia. En el enlace de la área de mecánica y computación se origina el diseño asistido por computador, que a su vez es apoyado por la simulación que esta suscrita al lazo entre mecánica, computación y electrónica, además con base en la computación, la electrónica y mecánica se construye el modelamiento del sistema que me permiten pronosticar la posición, velocidad y aceleración actual del péndulo. Para finalizar la fase de electrónica y control, que vincula la sensorica, que me permite medir cualquier cantidad física continúa y posteriormente convertirla en una señal discreta.

2.2 METODOLOGÍA DEL DISEÑO MECATRONICO

El diseño mecatrónico esta dividido en cinco aspectos importantes, el primero comprende los fundamentos básicos del equipo mecánico, que son: su principio de funcionamiento, sus características técnicas y de diseño, y sus campos de aplicación; el segundo aspecto corresponde a la construcción y el acople del dispositivo mecánico, el tercer aspecto corresponde el montaje de los módulos de adquisición de datos y los sistemas de interfase visual, en el cuarto aspecto se desarrolla la tarjeta de potencia y la tarjeta de adquisición de datos, para el manejo de la alimentación de los solenoides y el manejo de las señales análogas respectivamente, finalmente, se lleva a cabo las ensayos correspondientes del prototipo, donde se evalúa de manera directa las etapas implementadas. (Ver Figura 8.Organigrama del Diseño mecatronico previo)

Figura 8. Organigrama del Diseño mecatronico previo



Fuente: Autor

2.3 PROTOTIPO VIRTUAL

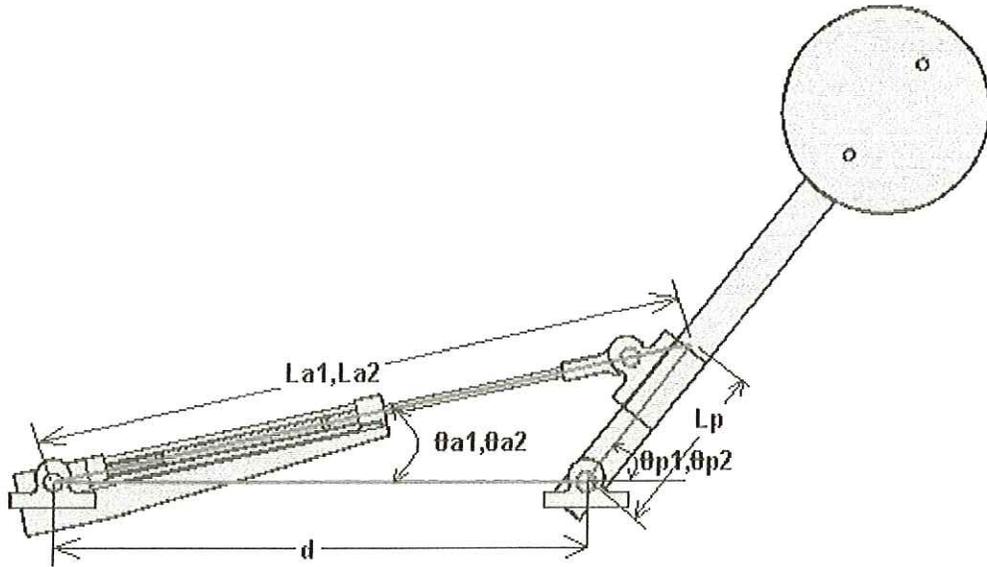
El organigrama nos permite dar un vistazo del proceso realizado para plasmar el péndulo invertido; el **prototipo virtual** comprende las siguientes fases: fase de **la recopilación de información**; proyectos previamente hechos, las características de las estructuras de los mismos, perfiles, la clase de material utilizado, información de válvulas contrabalance, sistemas SCADA, puertos de comunicación serial (RS-232) y además el levantamiento del diseño mecánico anterior. Fase del **Análisis cinemático** estudia el movimiento de la geometría, se construyen las ecuaciones relacionadas con el desplazamiento, la velocidad angular y la aceleración angular del péndulo invertido; Todas las ecuaciones y longitudes se introducen en una hoja de cálculo para facilitar el cambio permanente de las mismas. Con los datos de los ángulos se procede a desarrollar la fase del **Modelo CAD**, mediante un software se diseña pieza por pieza, tomando las longitudes encontradas en el análisis cinemático, además se diseñan varios modelos CAD. En la siguiente fase del **Análisis dinámico** se estudia la relación existente entre las fuerzas aplicadas al péndulo, su masa y movimiento. Se plantearon las ecuaciones que intervienen en la rotación del péndulo y las cargas que actúan en él, además se introducen el desarrollo de una hoja de cálculo para el análisis de las piezas implementadas. En la fase de la **Resistencia de Materiales** y en la fase del **Análisis CAE** se determinan los esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad que intervienen en cada una de las piezas utilizadas en el péndulo invertido, éste proceso se desarrolla después de los resultados arrojados por las ecuaciones de la cinética. Otro fase importante es el montaje del **El circuito hidráulico**, que tiene como finalidad la retención de la carga en cualquier instante de tiempo, esta detención del movimiento angular del péndulo es posible por las válvulas contrabalance, encargadas de la suspensión del peso por medio de la retención del aceite. Por ultimo tenemos la fase de la elección de los **materiales y maquinado de las piezas (COSTO)** donde se aprovecha al máximo los elementos existentes en el laboratorio de oleóneumática

con el fin de disminuir los costos del prototipo físico, en este apartado se permite considerar el costo del material y del maquinado del prototipo propuesto gracias al análisis de las fases anteriormente descritas, con esta valoración se llegó al diseño final.

Las **retroalimentaciones** contenidas en el organigrama están organizadas en el siguiente orden: se inicia con un análisis del segmento inferior, es decir los costos de maquinados y materiales encadenados para ser evaluados paso por paso según sea la gravedad del error con el modelo CAD y si hay necesidad a la recopilación de información; igualmente sucede con la etapa de resistencia de materiales ligada al análisis dinámico para constatar que el material utilizado es el adecuado y que el estudio de las deformaciones es correcto, si no se cumplen estas condiciones se procede, del análisis dinámico al análisis cinemático, donde se introducen nuevos valores de longitud y velocidad; la salida del vástago del actuador en el apartado del análisis dinámico se conecta hacia el Modelo CAD, debido a que la geometría del péndulo genera fuerzas grandes, por la masa del mismo, y las dimensiones de las piezas. En el modelo CAD se construyen nuevos elementos teniendo en cuenta factores como áreas, espesores, tipo de material y parte física, es decir, aquellos que influyen en el diseño.

2.3.1 Diseño CAD. El diseño de CAD se realizó a partir del análisis de los ángulos de inclinación, teniendo en cuenta las distancias del péndulo y del actuador. Este procedimiento se llevó a cabo mediante una hoja de cálculo en Excel, igualmente se hizo una simulación del movimiento del prototipo físico en el programa Solid Edge. A continuación se describen las ecuaciones que hicieron posible el diseño, la realización del prototipo y cada una de las partes del péndulo invertido:

Figura 9. Distancias y longitudes del péndulo



$$l_p = \frac{l_{a1} \text{sen} \theta_{a1}}{\text{sen} \theta_{p1}}$$

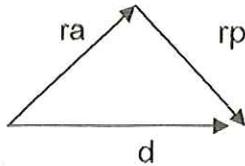
$$d = l_{a1} \cos \theta_{a1} - l_p \cos \theta_{p1}$$

$$\theta_{p2} = \pm a \cos \left(\frac{l_{a2}^2 - l_p^2 - d^2}{2dl_p} \right) \Leftrightarrow \theta_{a2} = a \text{sen} \left(\frac{l_p \text{sen} \theta_{p2}}{l_{a2}} \right)$$

Para resolver la posición del péndulo se obtienen las formulas que lo rigen en relación al triángulo formado por la distancia del actuador extendido y retraído con la barra del péndulo, además la longitud entre centros y la distancia del anclaje al eje de rotación. Aplicando los teoremas de la trigonometría del coseno y seno, la suma de vectores y las correspondientes longitudes se hallan la velocidad y la aceleración angular asumiendo la velocidad axial del vástago del actuador de $1\text{cm}/\text{sg}$.

2.3.2 Cinemática del péndulo invertido. A continuación se plantean y se resuelven las ecuaciones de cinemática tomando las longitudes correspondientes al péndulo y los ángulos que se forman entre si:

Figura 10. Suma de Vectores de las longitudes del péndulo



Fuente: Autor

Se plantea la ecuación de cierre del circuito:

Donde:

- ra: distancia del actuador
- rp: distancia del péndulo
- d : distancia de los puntos de apoyo del péndulo

$$\vec{d} + \vec{r}_p = \vec{r}_a$$

Se deriva la ecuación en ambos lados del igual y se obtienen las Velocidades:

$$\frac{d}{dt}(\vec{d} + \vec{r}_p) = \frac{d}{dt}(\vec{r}_a)$$

Desarrollando la derivada se consigue la siguiente expresión:

$$i\omega_p l_p e^{i\theta_p} = i\omega_a l_a e^{i\theta_a} + \dot{l}_a e^{i\theta_a} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

En esta ecuación se asume la velocidad de salida del actuador \dot{l}_a , se realizan los despejes en la ecuación:

$$i w_p l_p = i w_a l_a e^{i(\theta_a - \theta_p)} + \dot{l}_a e^{i(\theta_a - \theta_p)}$$

A continuación se Descompone la parte real e imaginaria, teniendo en cuenta que:

$$ie^{i\theta} = i \cos(\theta) - \text{sen}(\theta)$$

$$0 = -w_a l_a \text{sen}(\theta_a - \theta_p) + \dot{l}_a \cos(\theta_a - \theta_p)$$

De la anterior igualdad se despeja la velocidad angular del actuador:

$$w_a = \frac{\dot{l}_a \cos(\theta_a - \theta_p)}{l_a \text{sen}(\theta_a - \theta_p)}$$

Se Procede de la misma forma a despejar la parte real e imaginaria de la ecuación:

1.1 para poder despejar la velocidad angular del péndulo.

$$i w_p l_p e^{i(\theta_p - \theta_a)} = i w_a l_a + \dot{l}_a$$

Se obtiene:

$$w_p = \frac{\dot{l}_a}{l_p \text{sen}(\theta_p - \theta_a)}$$

Para hallar la aceleración angular se realiza un procedimiento muy similar, se deriva la ecuación 1.1:

$$i \frac{d}{dt} (w_p l_p e^{i\theta_p}) = i \frac{d}{dt} (w_a l_a e^{i\theta_a}) + \frac{d}{dt} (\dot{l}_a e^{i\theta_a})$$

Derivando resulta la siguiente expresión:

$$i l_p (w_p^2 e^{i\theta_p} + \alpha_p e^{i\theta_p}) = i (\alpha_a l_a e^{i\theta_a} + w_a \dot{l}_a e^{i\theta_a} + i l_a w_a^2 e^{i\theta_a}) + i \dot{l}_a w_a e^{i\theta_a}$$

La expresión se reduce:

$$i\omega_p^2 l_p e^{i(\theta_p - \theta_a)} + l_p \alpha_p e^{i(\theta_p - \theta_a)} = 2i\dot{l}_a \omega_a + l_a \alpha_a + i l_a \omega_a^2$$

Descomponiendo en imaginario:

$$\omega_p^2 l_p \cos(\theta_p - \theta_a) + l_p \alpha_p \operatorname{sen}(\theta_p - \theta_a) = l_a \omega_a^2$$

Se obtiene la aceleración angular:

$$\alpha_p = \frac{l_a \omega_a^2 - \omega_p^2 l_p \cos(\theta_p - \theta_a)}{l_p \operatorname{sen}(\theta_p - \theta_a)}$$

- **Resultados de las ecuaciones.** Para hallar la aceleración angular se resuelve y se reemplaza en la ecuación las variables de ω_p, ω_a .

$$l_a = 1.484m, l_p = 0.439m, \dot{l} = 0.01m/sg$$

$$\theta_p = 37^\circ, \theta_a = 10.2^\circ$$

Reemplazando se obtiene el siguiente resultado:

$$\omega_p = 0.05 \operatorname{rad}/sg, \omega_a = 0.013 \operatorname{rad}/sg, \alpha = 0.0036 \operatorname{rad}/sg^2$$

Figura 11. Hoja de cálculo en Excel

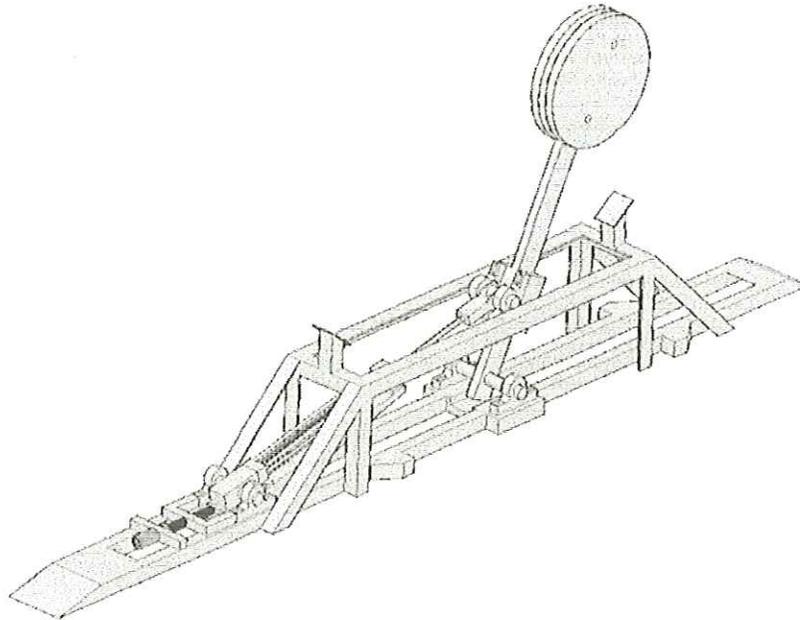
HOJA DE CALCULO

momento inercia (z)	77.65	kg*m ²	presión max en la bomba	100	Bar
Fuerza max en el vástago	2934,918	Lbs	Fuerza max en actuador	3148,571	Lbs
Velocidad	1,000	cm/s	Velocidad	1,000	cm/s
Teta p	37,000	0,645771823	Teta p	127,000	2,21656815
Inercia	776500,000	kg*cm ²	Inercia	776500,000	
La min	89,000		La min	89,000	
La max	128,000		La max	128,000	
Lp	43,000		Lp	43,000	
centroide	0,906		masa	97,000	kg
B	43,000		B	21,000	
Ifa	25,000		Ifa	25,000	
La	149,000		La	99,000	
Teta a	0,175	10,00174443	Teta a	0,170	9,753373537
Omega a	-0,013	-0,75475009	Omega a	0,005	0,298030275
Omega p	-0,051	-2,9351707	Omega p	0,026	-1,49875579
Alfa p	-0,004	-0,219239	Alfa p	0,000422	0,024203466
Alfa a			Alfa a		
Peso Disco	66130,00	kg*cm/sg ²	Peso Disco	66130,00	kg*cm/sg ²
Peso de Barra	29762,00	kg*cm/sg ²	Peso de Barra	29762,00	kg*cm/sg ²
Teta	1,10	63,0015971 0,4539634	Teta	0,48	27,24656275 0,889044099
Beta	0,65	36,99991348 0,7966355	Beta	0,93	52,99987606 0,601816026
Longitud	99,00	cm	Longitud	99,00	cm
L/2	44,00	cm	L/2	44	cm
Fa	563116,84	5631,168411 Nw	Fa	212712,62	2127,125226 Nw
Fa	1242,68	Lbs	Fa	477,90	Lbs
A	0,00	m/s ²	An	0,00	m/s ²
Fx	544710,99	Nw	Fy	97023,66734	Nw
área del actuador vástago	0,001305	m ²	área del actuador	0,0014	m ²
presión en el actuador retroceso	4238443,23	42,38443227 cumple	presión en el actuador extensión	1.519.375,16	15,19375162 cumple
Fa Estática recog	552855,04	Nw	Fa Estática recog	212727,28	Nw

Fuente: Autor

2.3.3 Modelo CAD. Para llevar a cabo este diseño se utilizó el programa Solid Edge, donde se realizó un prototipo inicial que se evaluó en cada una de las fases del prototipo virtual, debido al incumplimiento del modelo en alguna de estas fases se realizó una retroalimentación, por lo tanto se levantaron y se analizaron seis prototipos, que fueron sometidos a modificaciones y restauraciones de las piezas del mismo, con base en ello se optó por un prototipo mecánico fiable tanto en la parte de costos como en la resistencia de materiales y el peso.

Figura 12. Péndulo invertido con cabezales de seguridad



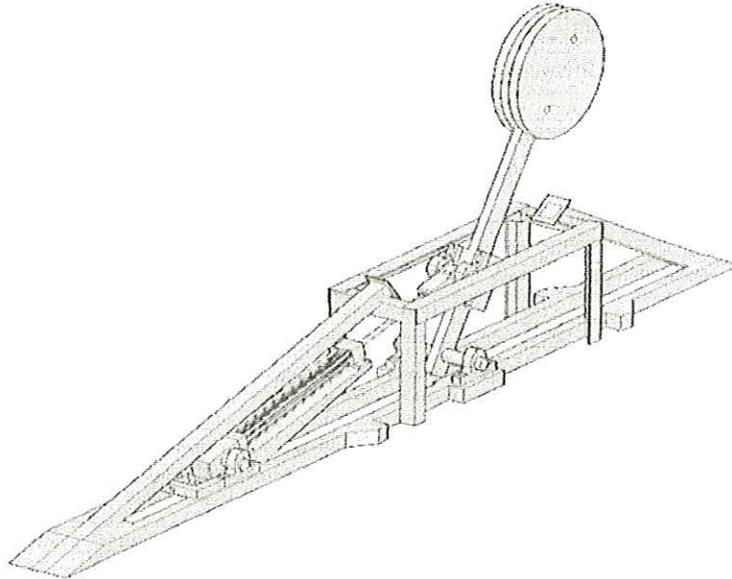
Fuente: Autor

Este es el primer diseño que se planteó, dicho prototipo aprovecha el material de la Universidad Autónoma de Bucaramanga para construir los soportes de seguridad, que son elaborados con base en los perfiles en "L" existentes en el modelo anterior, estos reflejaron una resistencia al impacto deficiente, por consiguiente fue el motivo de construir un nuevo prototipo virtual.

Las ventajas más notorias son: el rango del ángulo es variable por que consta de un tornillo de graduación en las chumaceras, La estructura es liviana, en comparación con las demás y los costos de los soportes son muy bajos.

Entre las desventajas tenemos el elevado costo del maquinado y del material de la base y por último el desensamble y ensamble de las piezas es complicado, debido a su conjunto como única pieza.

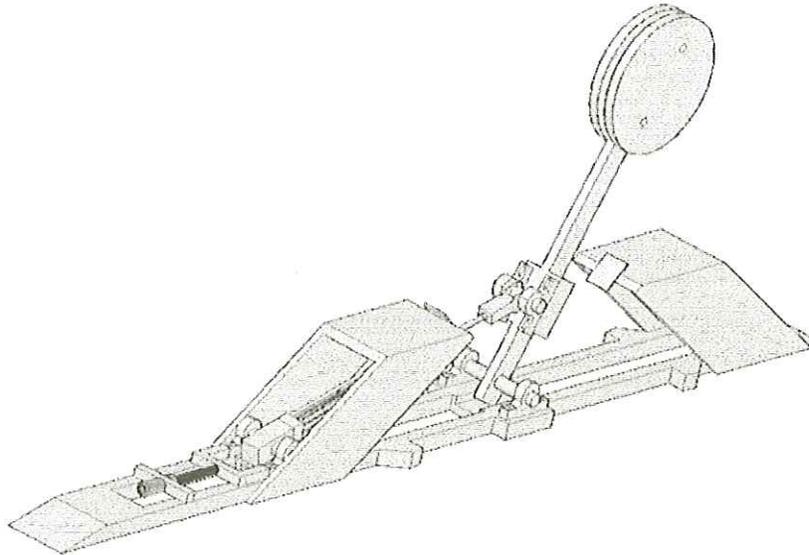
Figura 13. Péndulo invertido con soportes diagonales.



Fuente: Autor

El diseño se construyó de tal manera que los soportes y la base fueran una sola pieza, pero no se tuvo en cuenta que la estructura con dicha forma es más pesada, además los cabezales de seguridad son construidos a base de perfiles comprometiendo la resistencia de la carga al impacto. Los soportes están puestos en forma diagonal, y reposan sobre un caballete que los mantiene en una posición rígida.

Figura 14 .Péndulo Invertido Con Soportes De Seguridad Trapezoidales

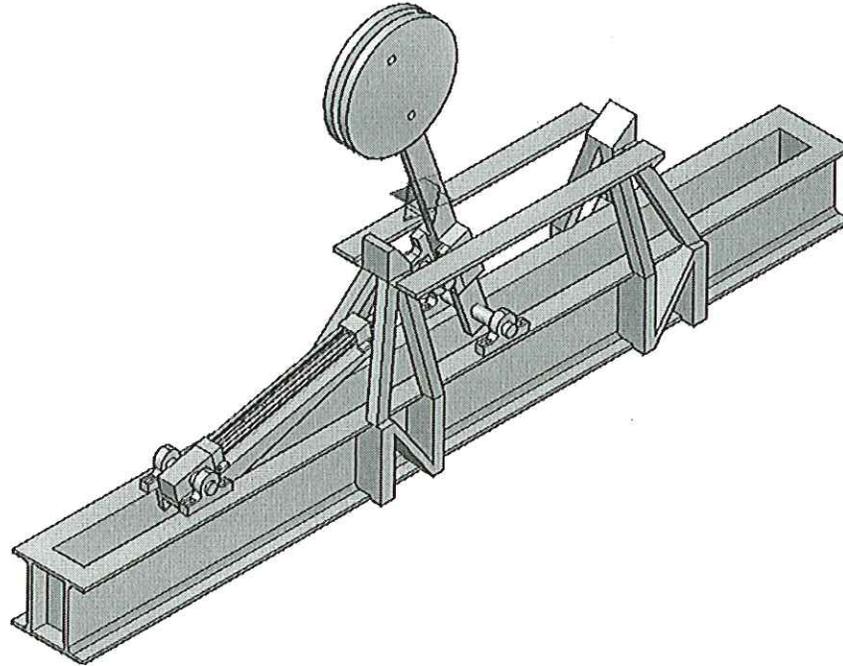


Fuente: Autor

Los soportes de seguridad son de perfil trapezoidal, su peso es la mitad de los soportes tipo torre y su costo es bajo, sin embargo los soportes del péndulo son débiles por que la carga de impacto ocasiona una deflexión lateral en ellos, comprometiendo la estructura, además el empotramiento de la base con la superficie del suelo resulta difícil de guindar por que la pieza es maciza y es de un espesor considerable.

Consta de un tornillo de graduación que varía la longitud entre centros y a su vez el ángulo de aplicación, su ventaja es la base que resiste la carga de impacto, ya que la estructura de la base esta sometida a esfuerzos de compresión.

Figura 16. Péndulo invertido con base de perfil c250 x 45

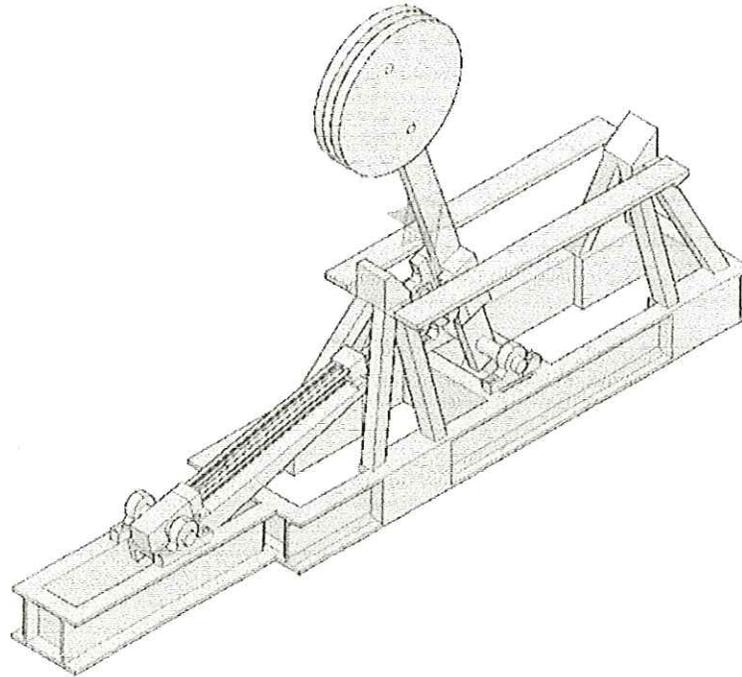


Fuente: Autor

Este diseño consta de dos soportes que resisten los esfuerzos generados por el impacto, éstos tienen forma de torre, pesan 32 Kg., por lo tanto tiene un peso moderado, buena rigidez y un tamaño normal en relación con el conjunto.

Su gran ventaja radica en que el centro de masa de la base con respecto del centro de masa del péndulo, es más cerca debido a la simetría del conjunto; por consiguiente se evitan momentos elevados en los anclajes. Su desventaja esta en la base por el costo del perfil en "C", además los refuerzos laterales tipo "N" son difíciles de acoplar y su estructura corre el riesgo de ruptura.

Figura 17. Péndulo invertido con base en perfil c150 x 15.6

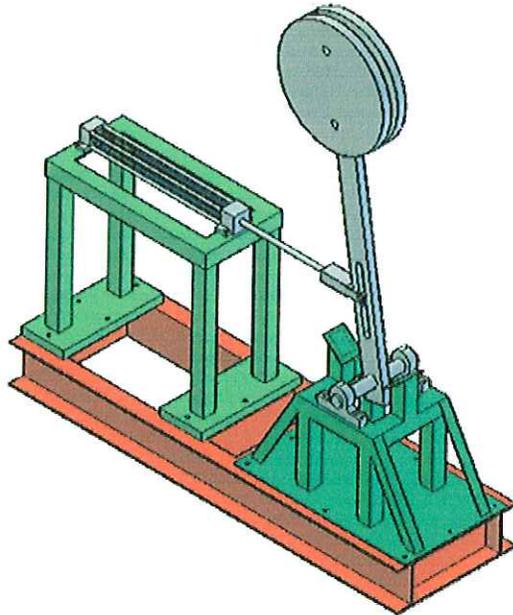


Fuente: Autor

En este diseño fue el escogido, donde se aprovecho el material existente en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, que se utilizo para la fabricación de la base del péndulo.

Los soportes en forma de torre y la base del péndulo, constan de una buena resistencia al impacto, además tiene un tamaño moderado y cuenta con una serie de ventajas tales como; el maquinado de las piezas, el empotramiento con la superficie terrestre, el acople y desensamble de los elementos. La base es la mas liviana de todas con un peso de 150kg. El costo de materiales es moderado y su presentación estética es muy buena. Cabe mencionar que algunas piezas se modificaron, tales como el anclaje del cilindro hidráulico con la barra del péndulo y las barras de seguridad.

Figura 18. Prototipo del modelo existente del péndulo invertido.



Fuente: Autor

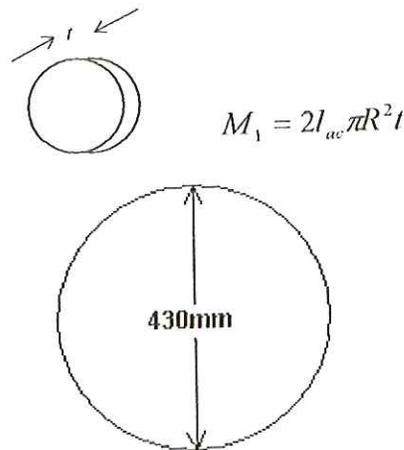
En este diseño el prototipo existente se diseña en el software de CAD (Solid Edge), ya terminado se simula su movimiento y se observa que la pieza de anclaje del cilindro hidráulico y la barra del péndulo ocasionan una colisión que afecta en el vástago del cilindro, ocasionando carga de flexión y carga radial en sello del actuador y por consiguiente, se concluye que el prototipo hecho no reúne las condiciones necesarias de seguridad, movimiento y resistencia de materiales, además los soportes no están diseñados para soportar la carga de impacto que podría ocurrir si un elemento falla.

El péndulo no está empotrado sobre una placa de concreto causando vibraciones indeseadas, que conllevan a un levantamiento de los pernos que guindan la estructura con la superficie del suelo.

2.3.4 Dinámica. Después del análisis de cinemática se procede a calcular la carga dinámica que se crea en consecuencia a las inercias. Esta carga es mayor en magnitud de las cargas estáticas o cargas en estado de reposo.

Procedimiento. Se plantea la ecuación que rige el sistema, se halla la carga haciendo momentos en el eje del péndulo y la inercia de las piezas que componen el prototipo virtual, resolviendo la ecuación y determinando la fuerza que se genera en vástago del cilindro, se procede a establecer la presión de la bomba requerida para el movimiento del péndulo.

Figura 19. Discos del péndulo.



Fuente: Autor

Inercia de los discos: Los pesos de los discos son:

Wd1=Wd2=33,74kg peso de un solo disco, en totales suma

Wd1+Wd2=67.48kg peso total

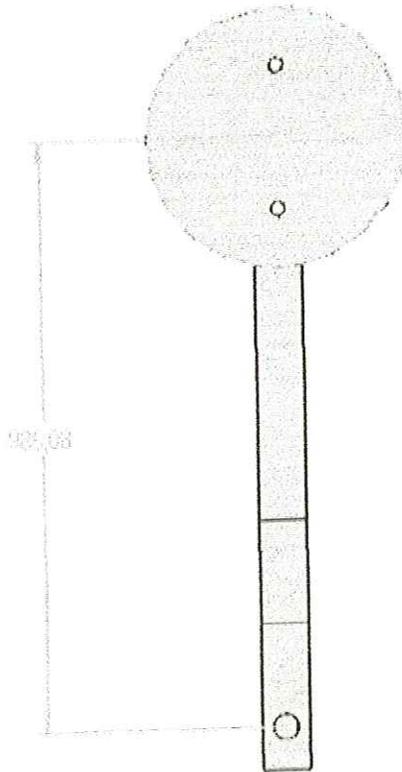
El momento de inercia de los discos es:

$$I_{discos} = \frac{1}{2}mr^2$$

Remplazando en la ecuación:

$$I_{discos} = \frac{1}{2}(67.48)(.215)^2 = 1.55kgm^2$$

Figura 20. Barra del péndulo.



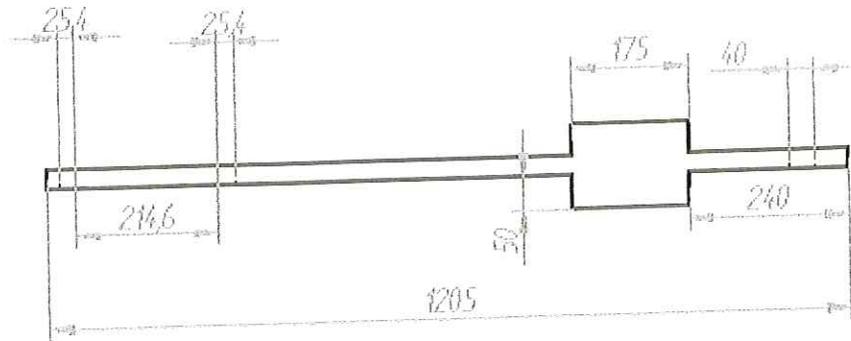
Fuente: Autor

Con respecto al eje del sistema:

$$I_{tdiscos} = I_{discos} + (Wd1 + Wd2) * L^2$$

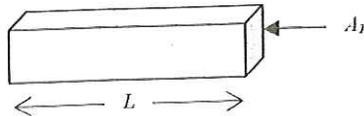
$$I_{tdiscos} = 1.55 + (67.48) * (.986)^2 = 67.15kgm^2$$

Figura 21. Dimensiones de la barra del péndulo.



Fuente: Autor

Figura 22. Masa de la barra.



Fuente: Autor

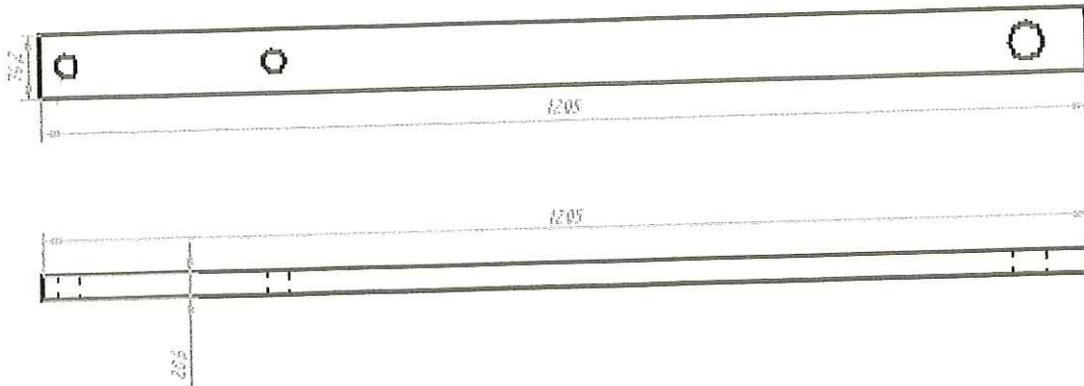
Inercia de las barra

$$M_2 = A_r \cdot L \cdot l_{Ac}$$

El peso de la barra total es **Wb= 30,37kg**

Para hallar la inercia total de la barra se descompuso la misma en varias secciones así:

Figura 23. Longitud de la barra



Fuente: Autor

Barra 1

$$I_{wb} = \frac{1}{12}(wb)(c^2 + a^2)$$

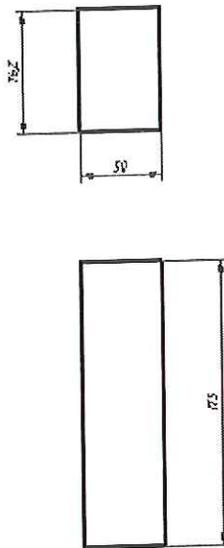
$$I_{wb} = \frac{1}{12}(20)(.0762^2 + 1.205^2) = 2.43 \text{kgm}^2$$

Respecto al eje del sistema:

$$I_{wbt} = I_{wb} + (Wb)(L)^2$$

$$I_{wbt} = (2.43) + (20)(0.602)^2 = 9.7 \text{kgm}^2$$

Figura 24. Masa de los bloques de la barra



Fuente: Autor

Bloque guindados a la barra

$$I_{wsb} = \frac{1}{12}(5.7)(0.0762^2 + 0.175^2) = 0.0173 \text{kgm}^2$$

En el eje principal:

$$I_{wsbt} = (0.0173) + (5.7)(0.257)^2 = 0.3937$$

El momento de inercia total de la barra es:

$$I_{btotal} = I_{wb} + 2I_{wsbt} = 9.7 + 2(0.3937) = 10.5 \text{kgm}^2$$

INERCIA DEL EJE

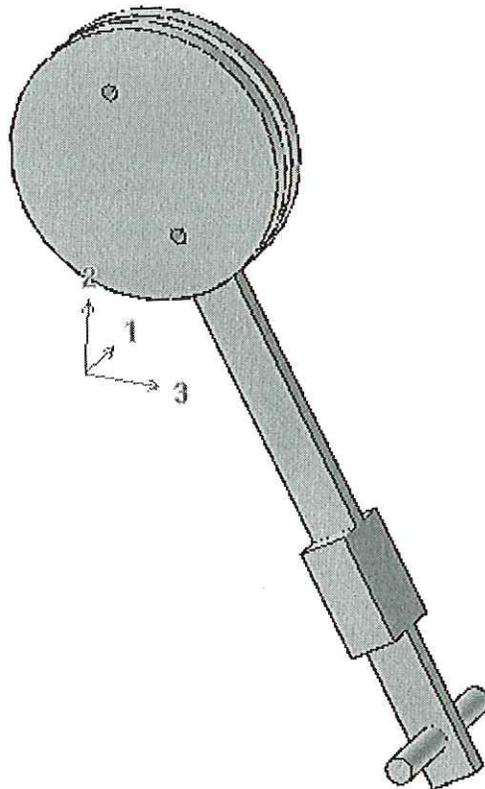
El eje del péndulo pesa:

$$W_{eje} = 3.09 \text{kg}$$

$$I_{eje} = \frac{1}{2}ma^2$$

$$I_{eje} = \frac{1}{2}(3.09)(0.020)^2 = 6.18 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

Figura 25. Inercia del péndulo



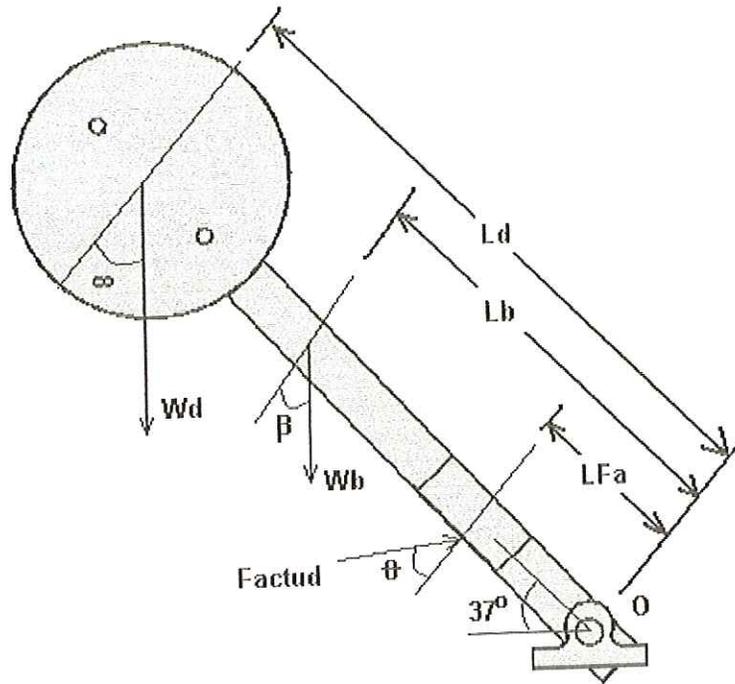
Fuente: Autor

Inercia total del péndulo

$$I_{totalpen} = I_{discos} + I_{barra} + I_{eje}$$

$$I_{totalpen} = 67.15 + 10.5 + 6.18 \times 10^{-4} = 77.65 \text{ kgm}^2$$

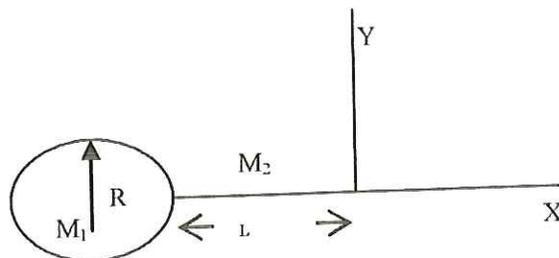
Figura 26. Cargas del péndulo



Fuente: Autor

DCL del sistema del péndulo, se procede a ubicar cada uno de los pesos y fuerzas del péndulo invertido, los cuales están ubicados en cada uno de los centros de masas correspondientes.

Figura 27. Centro de Masas



Fuente: Autor

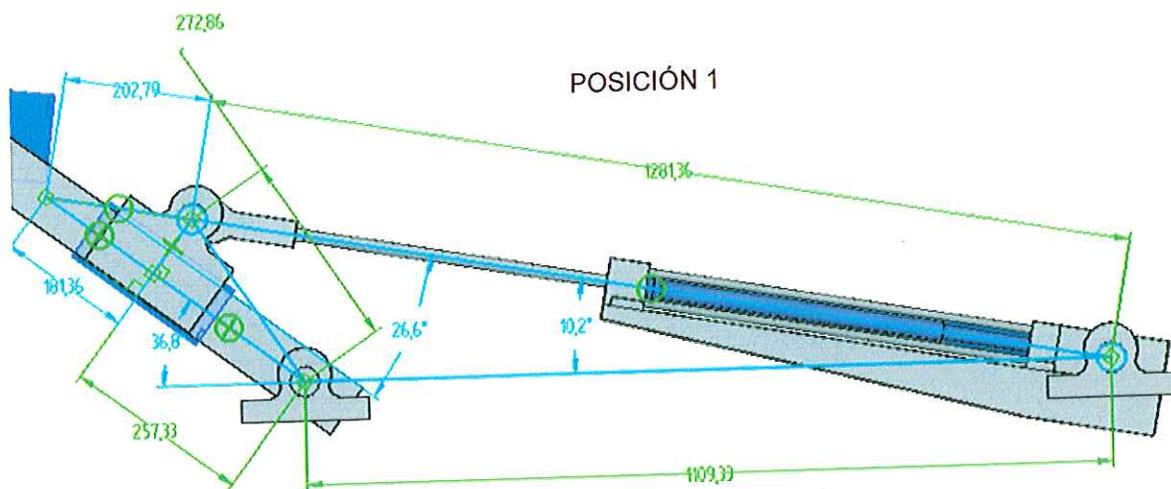
Centro de masas

$$I_{cm} = \frac{M_1(R+L) + M_2\left(\frac{L}{2}\right)}{M_1 + M_2}$$

Ya realizando el diagrama de cuerpo libre se construye la ecuación correspondiente de momento en "o", se escogió la inclinación del péndulo a 37°.

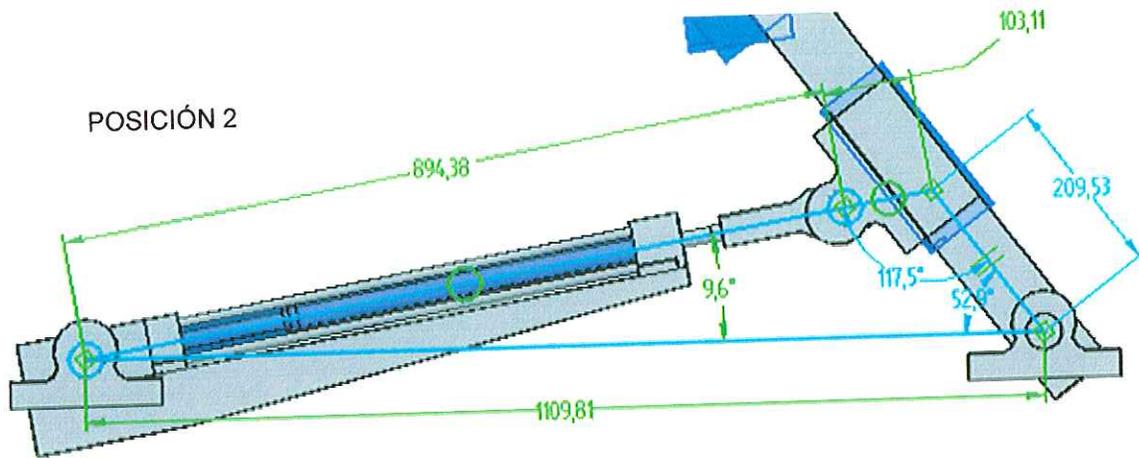
Por ser la posición más crítica o donde el actuador se encuentra a 26.9° con respecto a la horizontal, donde se debe generar la mayor fuerza del actuador y los pesos se encuentra en una posición clave para aplicar los mayores momentos; llevado a cabo este procedimiento se conoce si la bomba tiene la suficiente presión para manejar la carga.

Figura 28. Posición extrema del péndulo a 37°



Fuente: Autor

Figura 29. Posición extrema del péndulo a 127°



Fuente: Autor

Ecuación 1.2

$$\sum m_o = I_{totalpend} * \alpha = -F_{actud} * \cos(\theta) * LF_a + Wb * \cos(\beta) * (L_b) + Wd * \cos(\infty) * (L_d)$$

Nota: La carga dinámica depende de la velocidad de salida del vástago del actuador hidráulico, ésta velocidad es un factor muy importante en el diseño, ya que una celeridad axial muy grande ocasiona una inercia alta, que se ve reflejada en la carga dinámica, causando un comportamiento totalmente distinto en el análisis de la resistencia de los elementos de la maquina.

Teniendo la ecuación, se procede a despejar la variable F_{actud} , la relación de ángulos y distancias al centro de masa se presentan a continuación:

Ángulos

$$\beta = 37^\circ, \alpha = 37^\circ, \theta = 63$$

Momento de inercia total

$$I = 77,65 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Centro de masas

$$L_{F_a} = 0.257 \text{ m}, L_b = 0.440 \text{ m}, L_d = 0.986 \text{ m}$$

Pesos

$$W_d = 661.3 \text{ N}, W_b = 297.626 \text{ N}$$

Remplazando estas variables se halla el resultado de F_{actud} :

$$F_{actud} = 5451.91 \text{ N}$$

Estos cálculos dependen de los valores de la cinemática ya propuesta, si se modifican estos valores ocasionan automáticamente un cambio en la fuerza del actuador.

2.3.5 Resistencia de materiales. Este estudio parte de la fuerza que se ejerce en el vástago del actuador con la barra del péndulo en la posición extrema de 37° . Los análisis de resistencia de las piezas se evaluaron de dos formas, la primera con una simulación con el software de elementos finitos (ANSYS), y la segunda con los cálculos teóricos que se comparan con las soluciones que nos arroja el programa de simulación para estimar cierto grado de certeza. El principal requerimiento del diseño mecánico es que el vástago del péndulo no tenga fuerzas o momentos que generen flexión para evitar posibles daños; la fuerza que debe soportar el vástago son cargas totalmente axiales.

En el software de simulación se evalúan los esfuerzos, factor de seguridad y deformaciones que son generados en cada una de las piezas del péndulo, que al ser analizadas se concluye la confiabilidad de la pieza. Las piezas se modelaron

con factores de seguridad altos debido a las características del terreno donde se va a ligar o empotrar, pues la placa sólo soporta un esfuerzo de una tonelada por metro cuadrado.

En este apartado de resistencia de materiales se diseñaron algunas piezas por carga -impacto, ofreciendo un modelo con una seguridad adicional, previniendo posibles caídas del péndulo, causadas por falla del sistema hidráulico, mecánico o electrónico.

Tabla 1. Descripción de las propiedades mecánicas de los materiales

PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES				
NOMBRE DE LA PIEZA	GRADO DE MATERIAL	RESISTENCIA DE LA TRACCIÓN <i>kg / mm²</i>	LIMITE ELÁSTICO <i>kg / mm²</i>	DUREZA BRINELL 30/10
BASE	1020	40	31	140/180
SOPORTE DE SEGURIDAD	1045	60	38	250/280
DISCO DEL PÉNDULO	1045	60	38	250/280
EJES	1020	40	31	140/180
SOPORTE INFERIOR CH CILINDRO HIDRÁULICO	1020	40	31	140/180
CILINDRO HIDRÁULICO	ND	ND	ND	ND
CHUMACERAS	1045	60	38	250/280
BARRA DEL PÉNDULO	1045	60	38	250/280
ANCLAJE DEL CILINDRO HIDRÁULICO	1020	40	31	140/180

Fuente: Autor

▪ **Diseño por carga de impacto.** Este factor es el más crítico del diseño, y ocurre por la colisión de la barra del péndulo con el soporte de seguridad tipo torre, el esfuerzo generado por esta carga es:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{m * V_0 * E}{v}}$$

Donde:

$$m = 100Kg$$

$$V_0^2 = 5.88m/sg$$

$$E = 8.3Gpa$$

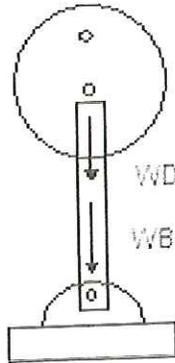
$$v = 1.5e - 0.3m^3$$

$$A = 7.8e - 0.3m^2$$

Por lo tanto el esfuerzo máximo para el soporte con el neopreno es $\sigma = 57.040.336,6Pa$, se tiene que la carga estática que produce en la barra la misma energía de deformación que la carga de impacto es: $F = 45399Kgf$

▪ **Diseño por carga de compresión.** La barra del péndulo sostiene la masa de los discos, la máxima carga de compresión se presenta cuando el péndulo se detiene en su posición vertical. Esta situación de fuerza es muy frecuente por que es la posición inicial del equipo.

Figura 30. Carga de compresión



Fuente: Autor

La máxima carga de compresión es la suma de los pesos de los discos W_D con el peso de la barra W_B

$$W_{COMP} = W_D + W_B$$

$$W_{COMP} = (67,48Kg + 30,37Kg) \times 9,8m / sg^2 = 958,93NW$$

$$A_T = A_B - A_{eje}$$

Se restan las áreas de la barra a la del eje y se halla el factor de seguridad,

$$A_T = (0,0762 \times 0,0286) - \left(\frac{\Pi \times (0,040)^2}{4} \right) = 0,0092m^2$$

$$\sigma_{COM} = \frac{958,93N}{0,00092m^2} = 1042315,2N / m^2$$

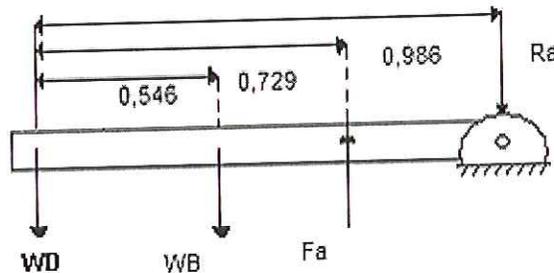
$$Sy = 38Kg / mm^2 \times \frac{1mm^2}{0,001^2m^2} = 31Mpa$$

$$FactorSg = \frac{31Mpa}{1042315,2N / m^2} = 29,74$$

▪ **Momento flector de la barra del péndulo.** El momento flector máximo del modelo ocurre cuando la barra del péndulo invertido se encuentra en una posición horizontal (0° o 180°), como el rango útil del péndulo es de 37° a 127° con respecto a la horizontal, los límites trazados de estos ángulos se deben a que el péndulo descansa en los soportes de seguridad, si se analiza la barra y los discos del péndulo en una posición extrema se obtendrá un diseño fiable y conservador.

Estas son las distancias de la barra al peso de los discos:

Figura 31. Carga de flexión



Fuente: Autor

Realizamos momentos en W_D para hallar la reacción R_a

$$\sum_{M_O} = W_D \times 0,986 + W_B \times 0,44 - f_a \times 0,257 = 0$$

Fuerza del actuador en posición horizontal

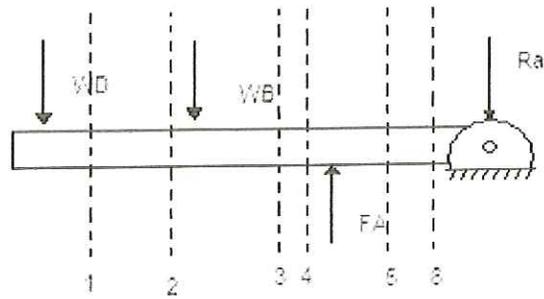
$$F_a = 3046 \text{NW}$$

$$\sum_{M_C} = R_a \times 0,986 + F_a \times 0,729 - W_B \times 0,546$$

$$R_a = 2087,7 \text{NW}$$

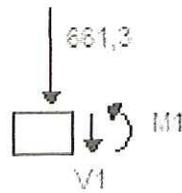
En seguida se toma como cuerpo libre la porción de viga a la izquierda de la sección y se obtiene:

Figura 32. Diagrama de momentos



Fuente: Autor

Figura 33. Cortante y flexión en el primer tramo

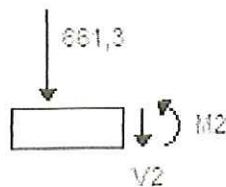


Fuente: Autor

$$+\uparrow \sum_{jy} = 0 \quad -661,3N - V_1 = 0 \quad V_1 = -661,3NW$$

$$+\uparrow \sum_{My} = 0 \quad (20N)(0) + M_1 = 0 \quad M_1 = 0$$

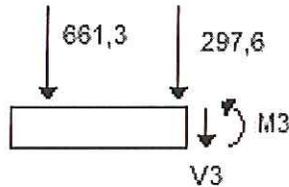
Figura 34. Cortante y flexión en el segundo tramo



Fuente: Autor

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum_{Fy} = 0 & \quad -661,3N - V_2 = 0 \quad V_2 = -661,3N \\
 + \uparrow \sum_{M2} = 0 & \quad (661,3)(0,546) + M_2 \quad M_2 = -361Nm
 \end{aligned}$$

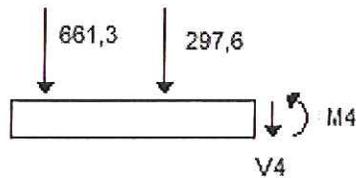
Figura 35. Cortante y flexión en el tercer tramo



Fuente: Autor

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum_{Fy} = 0 & \quad -661,3 - 297,6 - V_3 = 0 \quad V_3 = -958,9N \\
 + \uparrow \sum_{M3} = 0 & \quad (661,3)(0,546) + 297,6(0) + M_3 = 0 \quad M_3 = -361Nm
 \end{aligned}$$

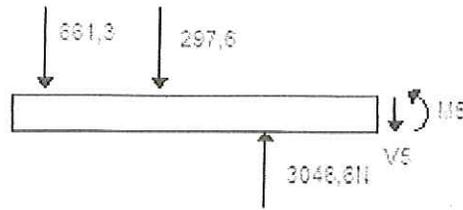
Figura 36. Cortante y flexión en el cuarto tramo



Fuente: Autor

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum_{Fy} = 0 & \quad -661,3 - 297,6 - V_4 = 0 \quad V_4 = 958,9N \\
 + \uparrow \sum_{M4} = 0 & \quad (661,3)(0,729) + 297,6(0,183) + M_4 = 0 \quad M_4 = -536,54Nm
 \end{aligned}$$

Figura 37. Cortante y flexión en el quinto tramo

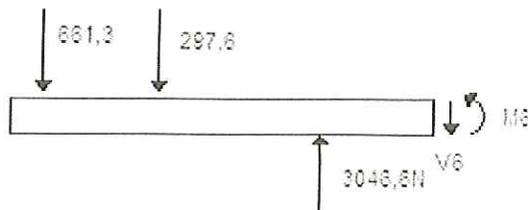


Fuente: Autor

$$+\uparrow \sum_{F_y} = 0 \quad -661,3 - 297,6 + 3046,6 - V_5 = 0 \quad V_5 = 2087,7N$$

$$+\uparrow \sum_{M_5} = 0 \quad (661,3)(0,729) + 297,6(0,183) + M_5 = 0 \quad M_5 = -536,54$$

Figura 38. Cortante y flexión en el sexto tramo

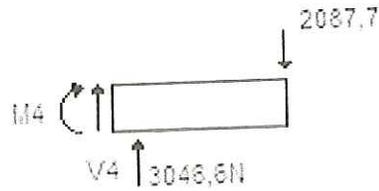


Fuente: Autor

$$+\uparrow \sum_{F_y} = 0 \quad -661,3 - 297,6 + 3046,6 - V_6 = 0 \quad V_6 = 2087,7N$$

$$+\uparrow \sum_{M_6} = 0 \quad 661,3(0,986) + 297,6(0,440) - 3046,6(0,257) = 0 \quad M_6 = 0$$

Figura 39. Cortante y flexión en el cuarto tramo



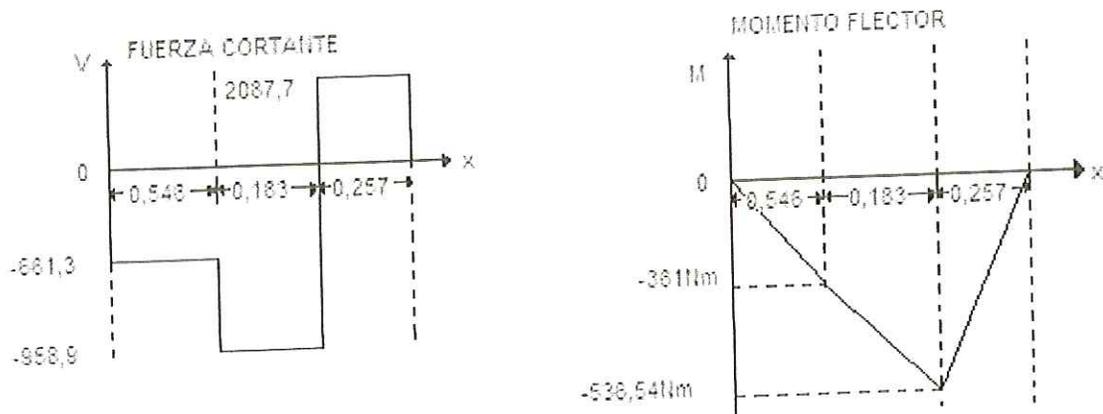
Fuente: Autor

$$\uparrow + \sum F_y = 0 \quad -2087,7 + 3046,6 + V_4 = 0 \quad V_4 = -958,9$$

$$\uparrow + \sum M_A = 0 \quad -M_4' - 2087,7(0,257) = 0 \quad M_4 = 536,53$$

Ahora se trazan los seis puntos mostrados en los diagramas de cortante y momento flector. El cortante es el valor constante entre cargas concentradas, y el momento varia linealmente; se obtienen así los diagramas de fuerza cortante y de momento flector mostrados:

Figura 40. Diagrama de Cortante y momento flector



Fuente: Autor

Se resuelve la ecuación para hallar el esfuerzo

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$c = \frac{h}{2} = \frac{0,0762}{2} = 0,0381m$$

$$I = \frac{1}{2}(b)(h)^3 = \frac{1}{2}(0,0286)(0,0762)^3 = 1,05 \times 10^{-6}$$

$$\sigma = \frac{(-536,54)(0,0381)}{1,05 \times 10^{-6}} = 19,468,737,14pa$$

Para 1045 el esfuerzo es:

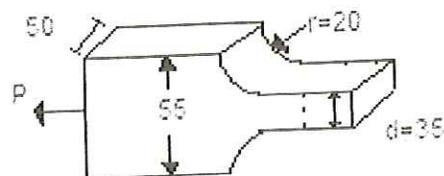
$$38Kg/mm^2 \times \frac{1mm * 1mm}{(1 \times 10^{-3})(1 \times 10^{-3})} = 38,000,000pa$$

El factor de seguridad determina que la barra no fallara por flexión:

$$Fs = \frac{38,000,000}{19,468.737,11} = 1,95 \cong 2$$

- **Esfuerzo y deformación en carga axial.** Debido a que el actuador genera una fuerza para romper la inercia del péndulo esta fuerza se ve reflejada en la parte trasera del ancla y se convierte en una carga axial para el ancla, se dibujan sus dimensiones:

Figura 41. Dimensiones del ancla



Fuente: Autor

$$P = 5474,46NW$$

$$\frac{D}{d} = \frac{55mm}{35mm} = 1,57$$

$$\frac{r}{d} = \frac{20mm}{35mm} = 0,57$$

$$\frac{P}{A} = \sigma_{med} = \frac{5474,46}{(0,035)(0,050)} = 3,128,262.857$$

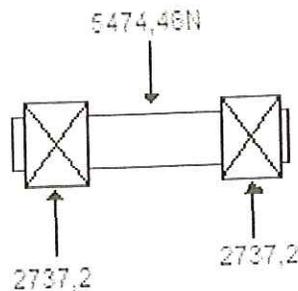
$$K = 1.35$$

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{max}}{1,72}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{med} * 1,72 = 3,128,262.857 * 1,72 = 5,380,612,1pa$$

- **Rodamientos.** El valor máximo de carga se produce cuando el péndulo esta 37°

Figura 42. Cargas de rodamiento



Fuente: Autor

$$F_{med} = 2737.2 \text{ KN}$$

E_c = carga dinámica $P = xF_{med} + yF_{ax}$ F_{med} : fuerza media (radial)

E_c = carga estática $P = 0,6F_{med} + 0,5F_{ax}$ F_{ax} : fuerza axial

La fuerza axial dinámica se considera un 20% de F_{med} .

$$F_{ax} = F_{ra} * 0,2$$

Para esta relación axial-radial < 0,2

$$X=1, Y=0$$

La carga dinámica es:

$$P_D = (1)(2737,2NW) + (0)$$

$$P_D = 2737,2NW$$

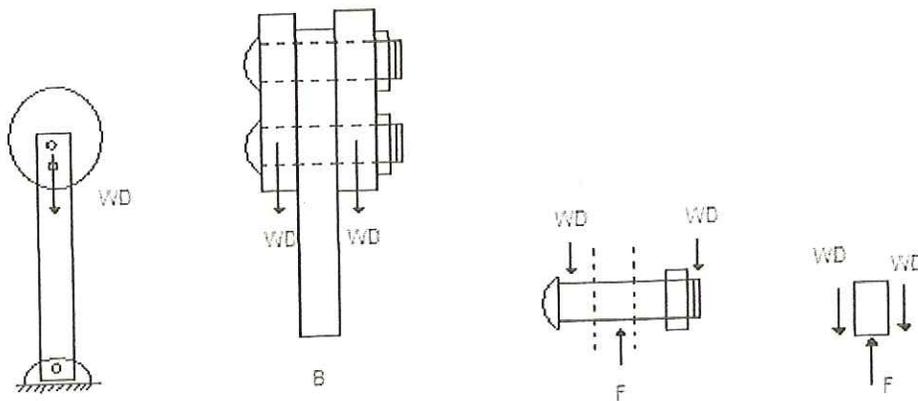
La carga estática

$$P_E = (0,6)(2737,2) + (0,5)(0,2)(2737,2)$$

$$P_E = 1916,04$$

- **Cortante doble de los pernos.** Los pernos están cargados a cortante doble y en los orificios se generan fuerzas de abollamiento debido al peso de los discos.

Figura 43. Diagrama de Cortante de los pernos de los discos



Fuente: Autor

$$\downarrow + \sum_{jy} = W_D + W_D - F = 0$$

$$F = 2W_D \rightarrow W_D = \frac{F}{2}$$

$$\gamma_{med} = \frac{F}{2A} = \frac{2W_D}{2A} = \frac{(33,65)}{\frac{\pi(12,7 \times 10^{-3})^2}{4}}$$

$$\gamma_{m2d} = 2610184,4 \text{ pa}$$

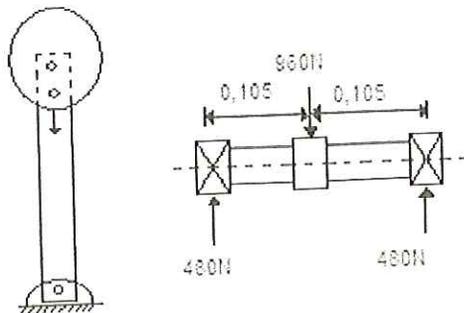
Se utilizaron tornillos grado 8° características $S_y = 33000 \text{ psi}$ entre $\Theta(1/4'' - 1 1/2'')$
Cortante Adm.

$$\sigma = \frac{S_y}{2} = 16500 \text{ psi} \rightarrow \frac{lbf}{\text{in}^2} \times \frac{4,448}{1/b} \times \frac{\text{in}}{25,4} \times \frac{\text{in}}{25,4} = 113.757.827,51 \text{ pa}$$

$$Ns = \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{113.757.827}{2.610.184,4} = 43$$

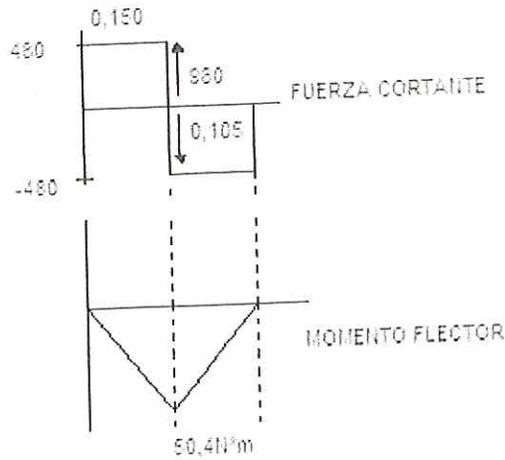
▪ **Carga flexión en el eje del péndulo.** La máxima carga se da cuando el péndulo esta en posición vertical.

Figura 44. Diagrama de cargas del eje del péndulo



Fuente: Autor

Figura 45. Diagrama de Cortante y momento flector del eje



Fuente: Autor

$$c = D/2 = \frac{0,040}{2} = 0,020$$

$$I = (1/2\pi^4) = 2,51 \times 10^{-7} m^4$$

$$M = 50,4 Nm$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = 4,010,704,56 pa$$

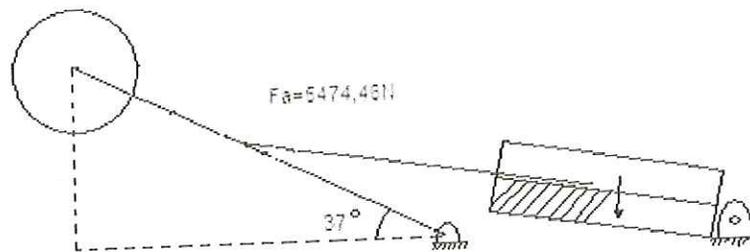
Para Acero 1020

$$S_y = 31 Kg / mm^2 \rightarrow 31,000,000 pa$$

$$Ns = \frac{31,000,000}{4,010,704.56} = 7$$

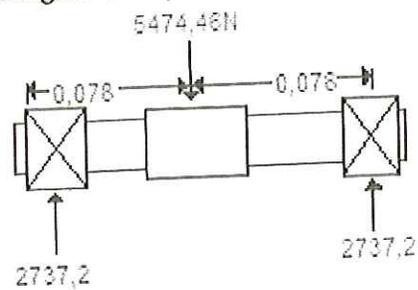
- **Flexión del eje del cubo.** Cuando el péndulo está 37° en el arranque es donde se genera la mayor carga del eje.

Figura 46. Flexión del eje del cubo



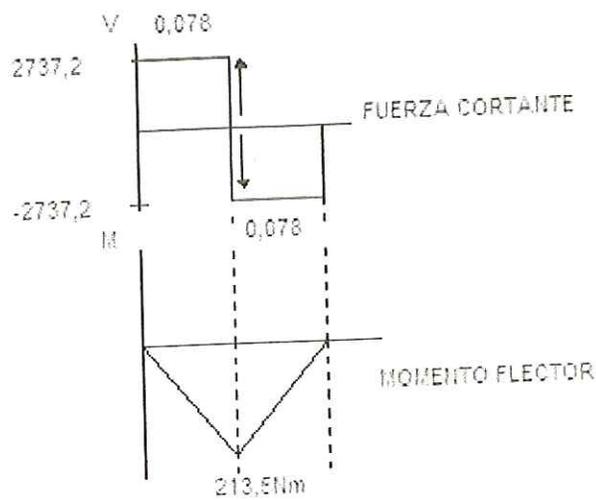
Fuente: Autor

Figura 47. Diagrama de cargas del eje del actuador



Fuente: Autor

Figura 48. Diagrama de cortante y momento flector del eje



Fuente: Autor

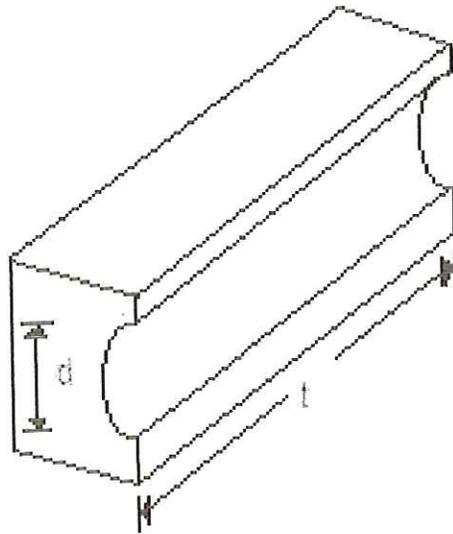
$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$c = \frac{0,04}{2} = 0,02$$

$$I = (1/2\pi^4) = 1/2\pi(0,02)^4 = 2,51 \times 10^{-7} = 17,011,952.19$$

$$Ns = \frac{31,000,000}{17,011,952,19} = 1.8$$

Figura 49. El cubo



Fuente: Autor

Aplastamiento del cubo

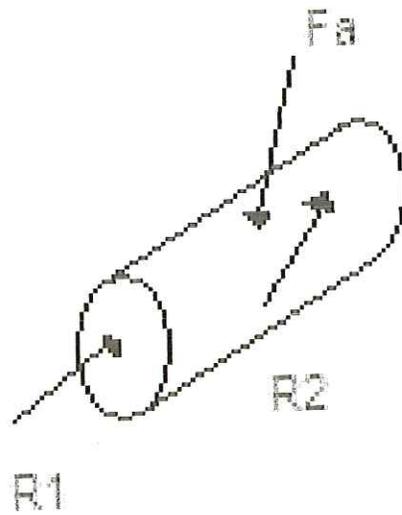
$$d = 0,040m$$

$$t = 0,065m$$

$$\sigma = \frac{5474,46}{2,6 \times 10^{-3}} = 2105561,5pa$$

$$Ns = \frac{38000000}{2105561,5} = 14,7$$

Figura 50. Eje del cubo



Fuente: Autor

Cortante del eje del cubo

$$R_1 = R_2 = 2737,2$$

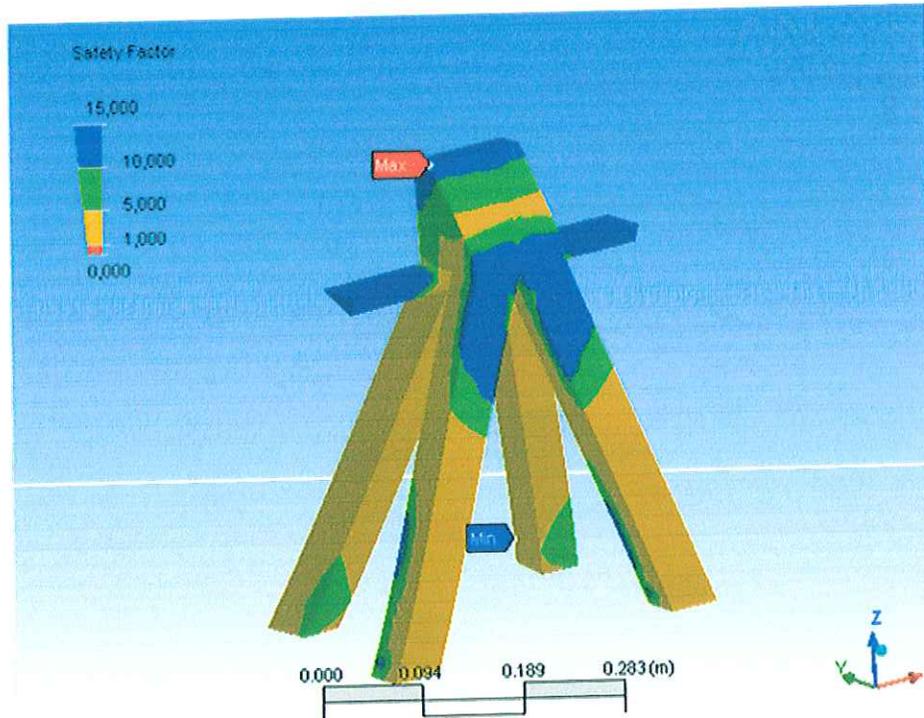
$$\gamma = \frac{Fa/2}{A} = \frac{2737,2N}{\frac{\pi(0,04)^2}{4}}$$

$$\gamma = 2,178,194.5N/m^2$$

$$Ns = \frac{15500000}{2178194,5} = 7,11$$

2.3.6 Simulación CAE

Figura 51. Simulación soporte de seguridad



Fuente: Autor

El soporte tiene un peso de 30 Kg., fue simulado para que resista la carga de impacto de 40 Toneladas recibida por la barra del péndulo, esta carga se genera por la posibilidad de falla del sistema hidráulico; los cabezales utilizados en la construcción final fueron realizados con un cilindro macizo de 4" de diámetro, los cuales descansan sobre unas barras diagonales que sirven de soporte; el ángulo del cabezal del primer soporte es de 53° , su carga es mínima a comparación del segundo, debido a que su ángulo de inclinación es de 37° y recibe una carga de 40000 Kg.-f. En el diseño se puede observar que no presenta ruptura en ninguna de sus partes, sin embargo su factor de seguridad de 1.5 no es muy alto, éste está ubicado en el apoyo trasero izquierdo.

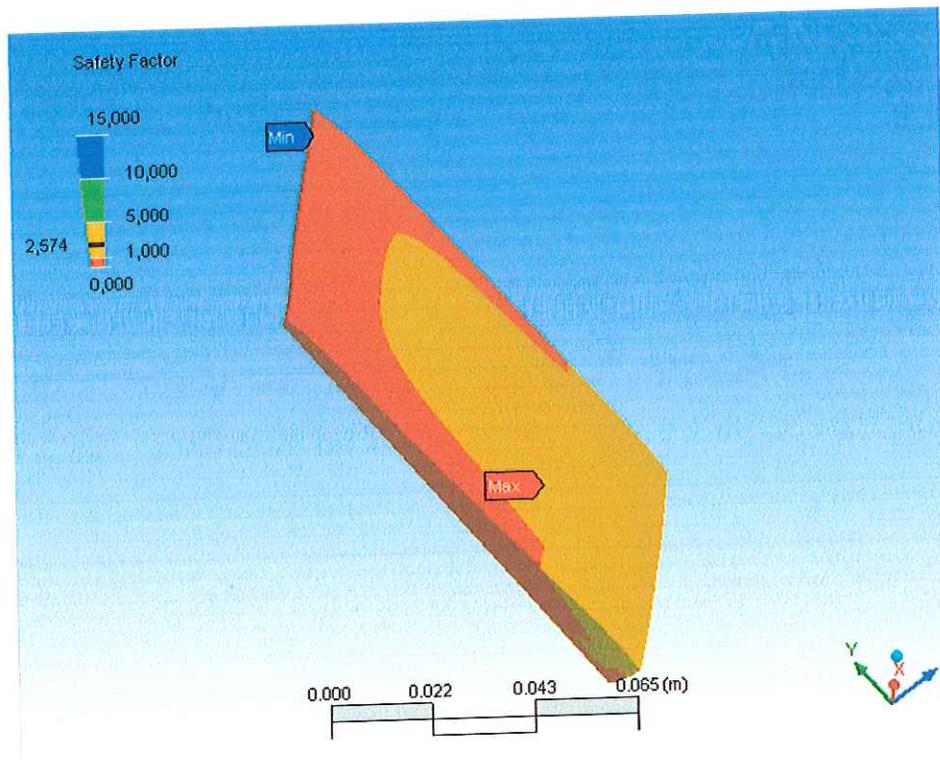
Los cálculos realizados sobre la carga de impacto sugieren las siguientes hipótesis, teniendo en cuenta la fórmula de la energía cinética $T = \frac{1}{2}mv_v^2$ transferida integralmente en la estructura:

- No se disipa energía durante el impacto
- El cuerpo que golpea no debe rebotar ni retener parte de su energía. Esto a su vez requiere que la inercia de la estructura sea despreciable comparada con la inercia del cuerpo que la golpea.

Estos requisitos no se satisfacen, y sólo parte de la energía se transfiere a la estructura. Por tanto, la energía cinética que se transfiere uniformemente a la estructura lleva un diseño más conservador.

Estos soportes fueron llevados al diseño final por su confiabilidad, el costo de estos soportes fue relativamente alto, debido a la clase de material con el que fueron construidos (acero 1045) y con un esfuerzo admisible de $38 \frac{\text{Kg}}{\text{mm}^2}$; los soportes se guindan a la base mediante una platina de acero que tienen unas perforaciones para poder unir con pernos a la base.

Figura 52. Simulación del neopreno

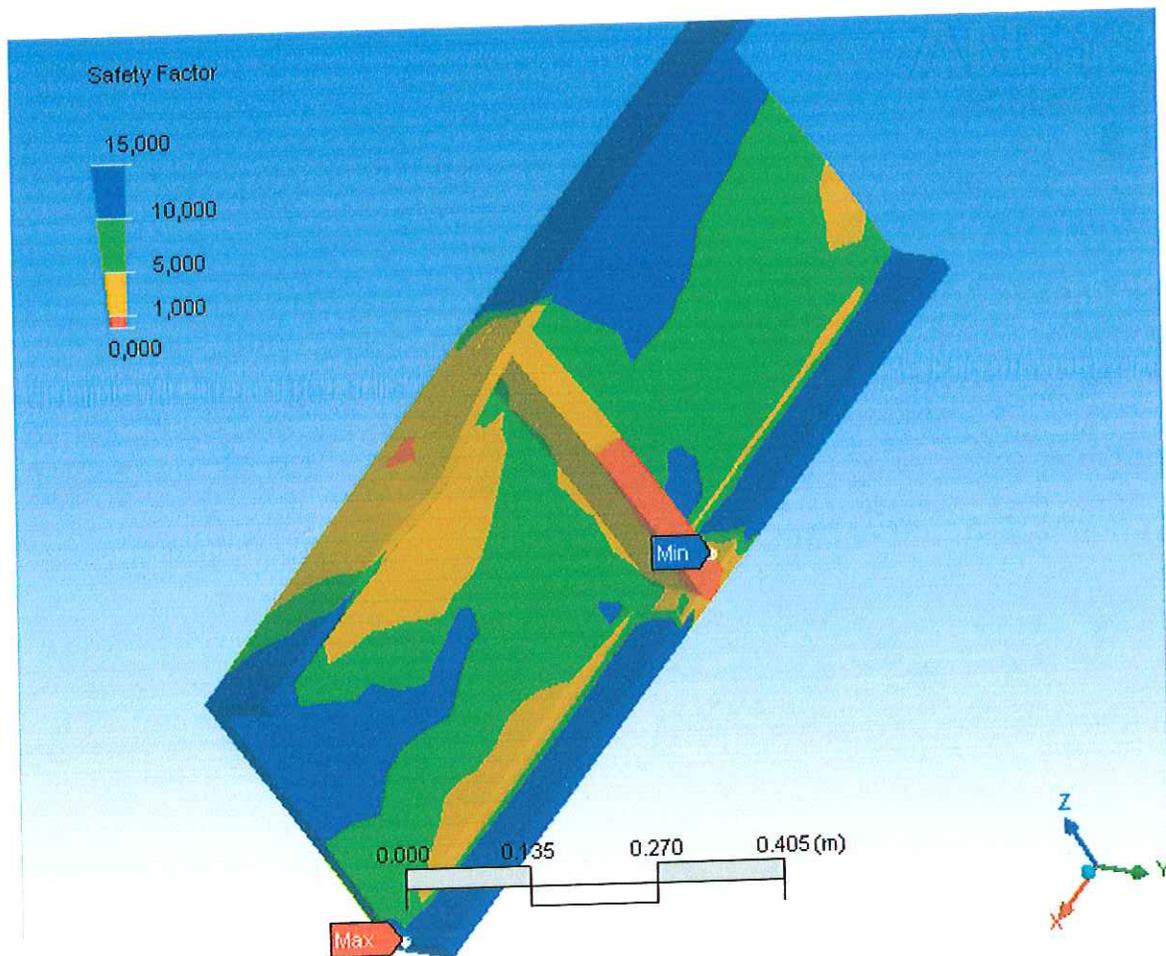


Fuente: Autor

Al analizar los soportes de seguridad se presentaron algunos inconvenientes con las altas reacciones generadas por la carga de impacto en los apoyos de soporte, debido a esto se agregó un neopreno en los cabezales de soporte para absorber parte de la energía transmitida por el impacto y evitar las vibraciones indeseadas para la base y la estructura del edificio. Las dimensiones del caucho son: un espesor de 10mm y un ancho de la misma forma del cabezal del soporte de seguridad. En la simulación se puede observar que el caucho se comprime y se deforma hasta el punto en que se destruye, como se puede observar el caucho sufre una deformación mayor en la parte superior debido al perfil de los esfuerzos que se generan cerca de la carga; el análisis del factor de seguridad es menor que 1, por lo tanto el caucho debe ser remplazado en el caso que ocurra un accidente. El caucho se acopla al cabezal de los soportes, mediante un pegante especial de

alta resistencia a los esfuerzos cortantes producidos por la carga. Las características de este caucho son resistencia última a la tensión 15Mpa, densidad 910, Kg/m³ ductibilidad 600 en 50mm.

Figura 53. Simulación soporte de la base

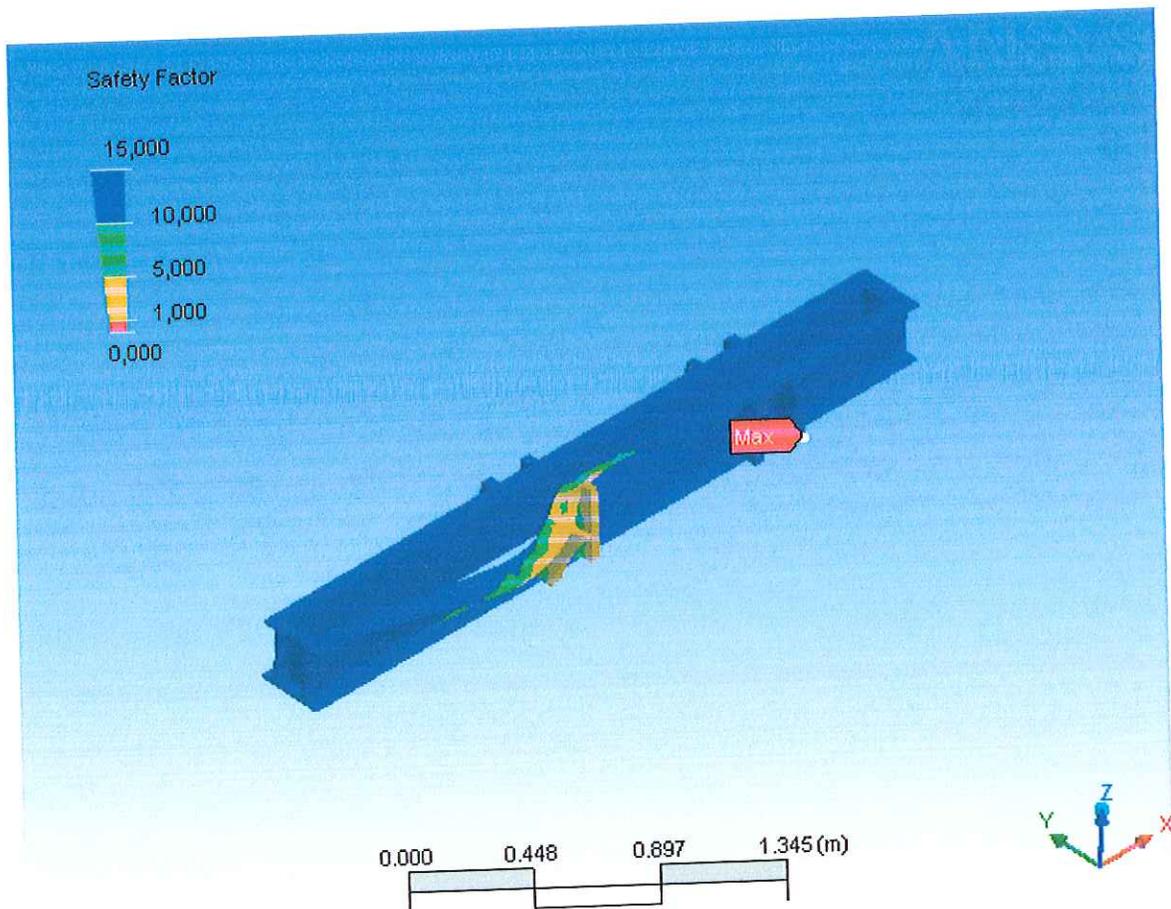


Fuente: Autor

El primer diseño de la base se simuló con un soporte vertical para resistir el impacto recibido por la barra, el material utilizado es acero 1045, como se puede observar en la simulación este refuerzo falla en la parte inferior, ya que la carga de compresión es muy alta y su espesor es mínimo; a causa de esta prueba se optó

por colocar una doble columna de refuerzo para soportar mejor la carga, además tenemos una ruptura en la parte superior del perfil C, causado por la deformación de la columna de acero donde se generan esfuerzos catastróficos.

Figura 54. Simulación de la base con párales verticales

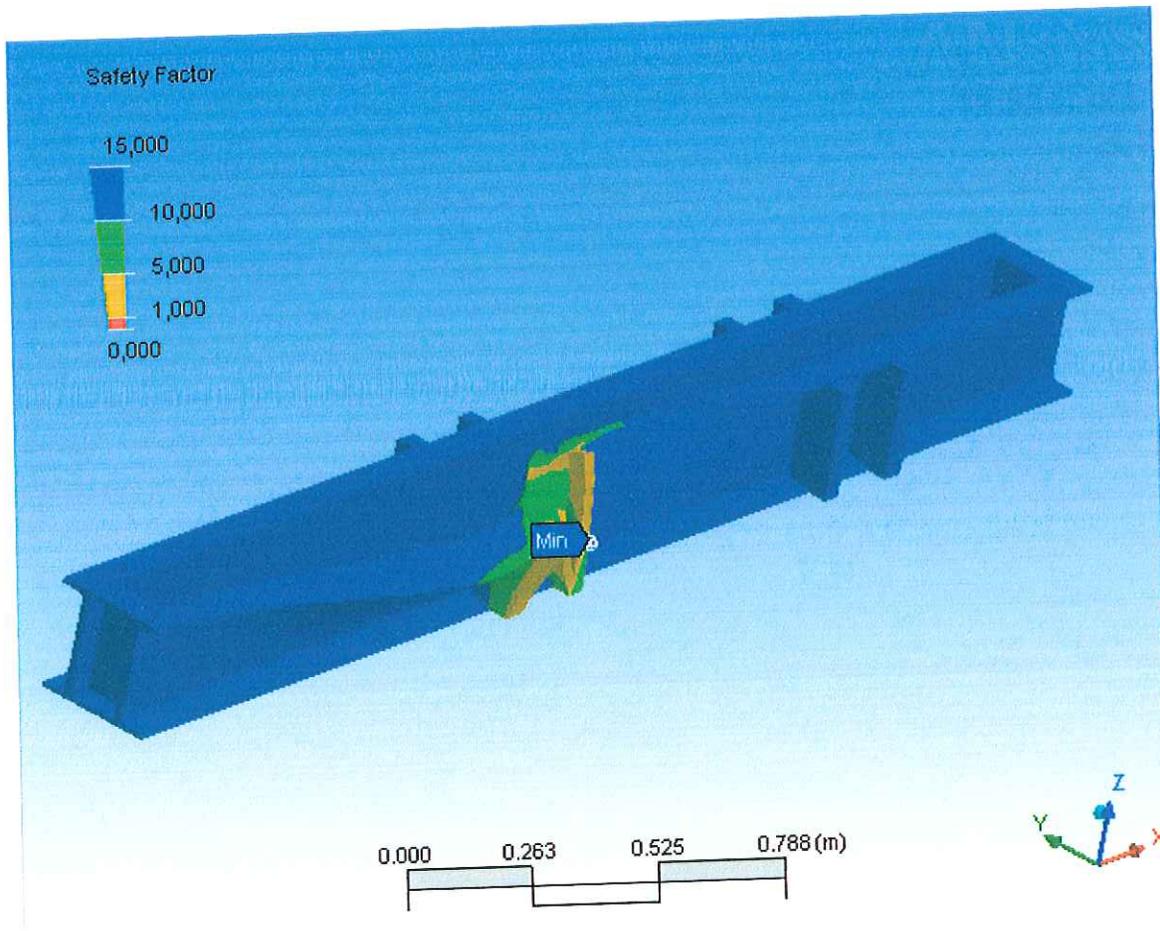


Fuente: Autor

Encontrados los soportes adecuados para manejar la carga de impacto se procedió a diseñar la base que transmitirá estos esfuerzos a los cimientos; se diseñaron muchas clases de bases que resistieran, esta base tiene un factor de seguridad menor de 1.2, no es muy alto, pero la resiste; el diseño se tubo que

cambiar debido a la dificultad para acoplar los soportes a la base. Esta consta de refuerzos tipo columnas, fácil de construir y de un bajo costo en relación con las demás.

Figura 55. Simulación de base tipo N

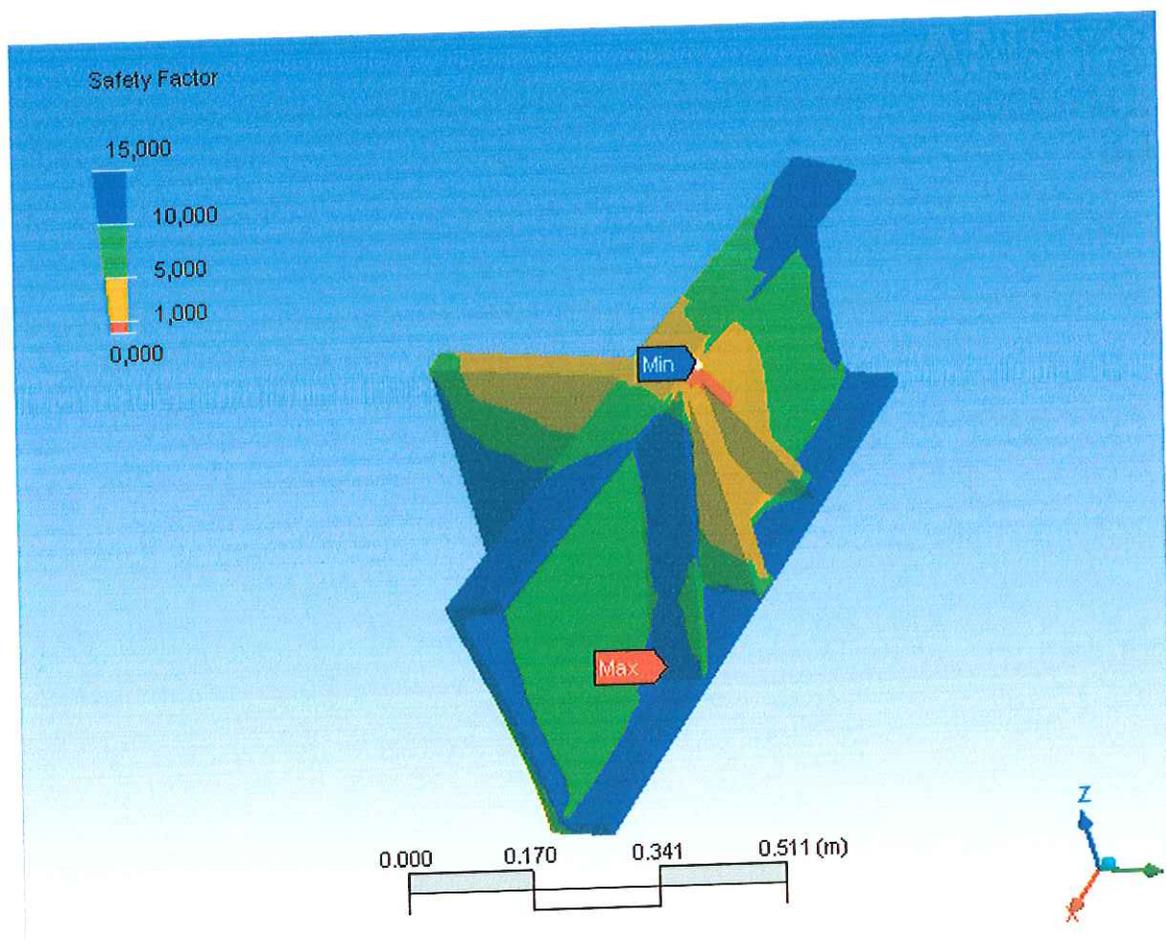


Fuente: Autor

Debido a que el anterior refuerzo de la base fallo, se eligió construir un diseño de refuerzo diagonal en "N", como se observa en la figura la base sufre una deformación de flexión en las columnas de refuerzo y fuerzas de torsión en la base, la base tiene un factor mínimo de seguridad 1.2. La barra minimiza los esfuerzos

en las columnas de la derecha y la izquierda, por que evita que absorban toda la reacción de los soportes distribuyéndolo en toda la barra , además gracias a estas fuerzas y al espesor se presentan pandeos en las columnas que disminuyen con la diagonal.

Figura 56. Simulación soporte de la base

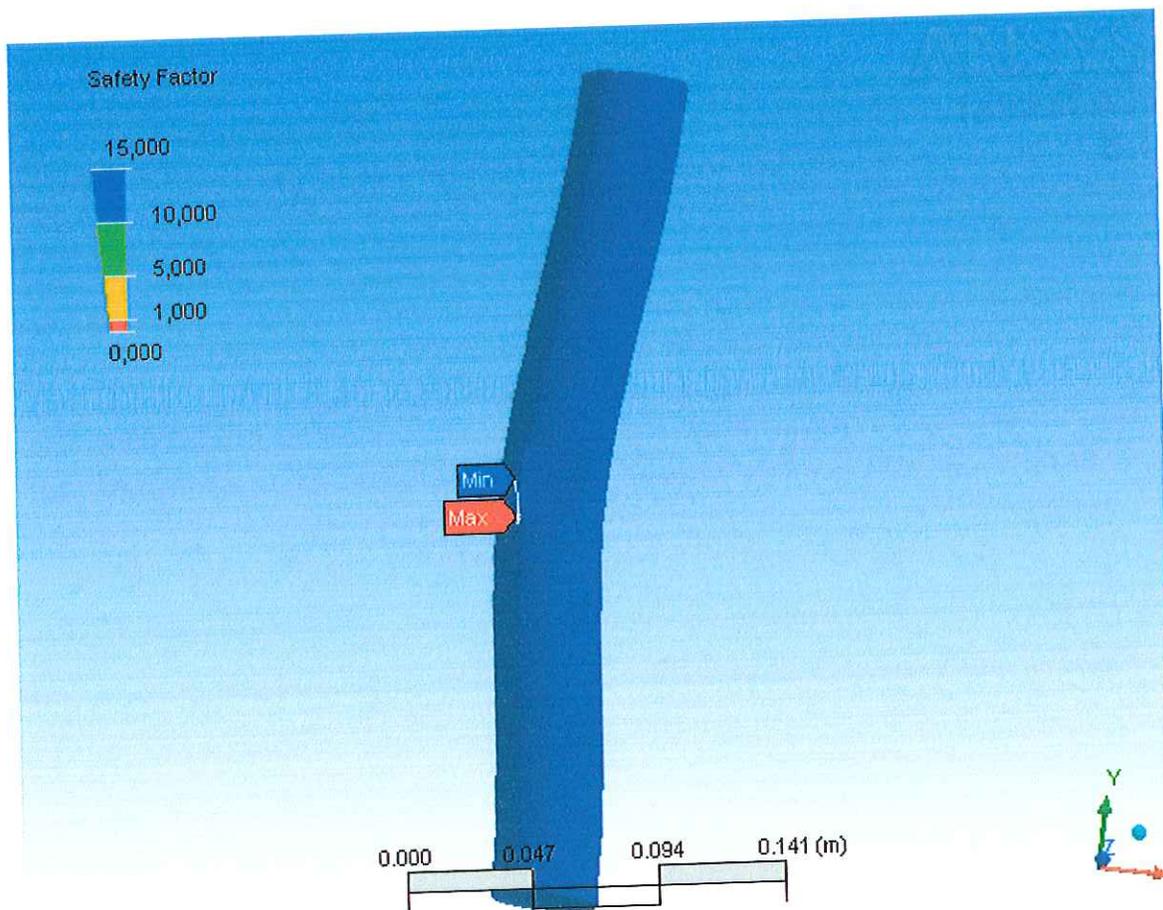


Fuente: Autor

Debido a que el anterior refuerzo no presta un fácil acoplamiento para los soportes y la base, se construyo un diseño de doble refuerzo diagonal y una viga

transversal al perfil de la base del péndulo que evitan la flexión del refuerzo; sin embargo como se observa la falla no es en la parte inferior si no en la parte superior del refuerzo, esto se debe a la distribución de fuerzas en la base a causa del ángulo de los apoyos de los soportes de seguridad. El factor de seguridad es menor de 0.8, por lo tanto la estructura no es fiable.

Figura 57. Simulación del eje del actuador

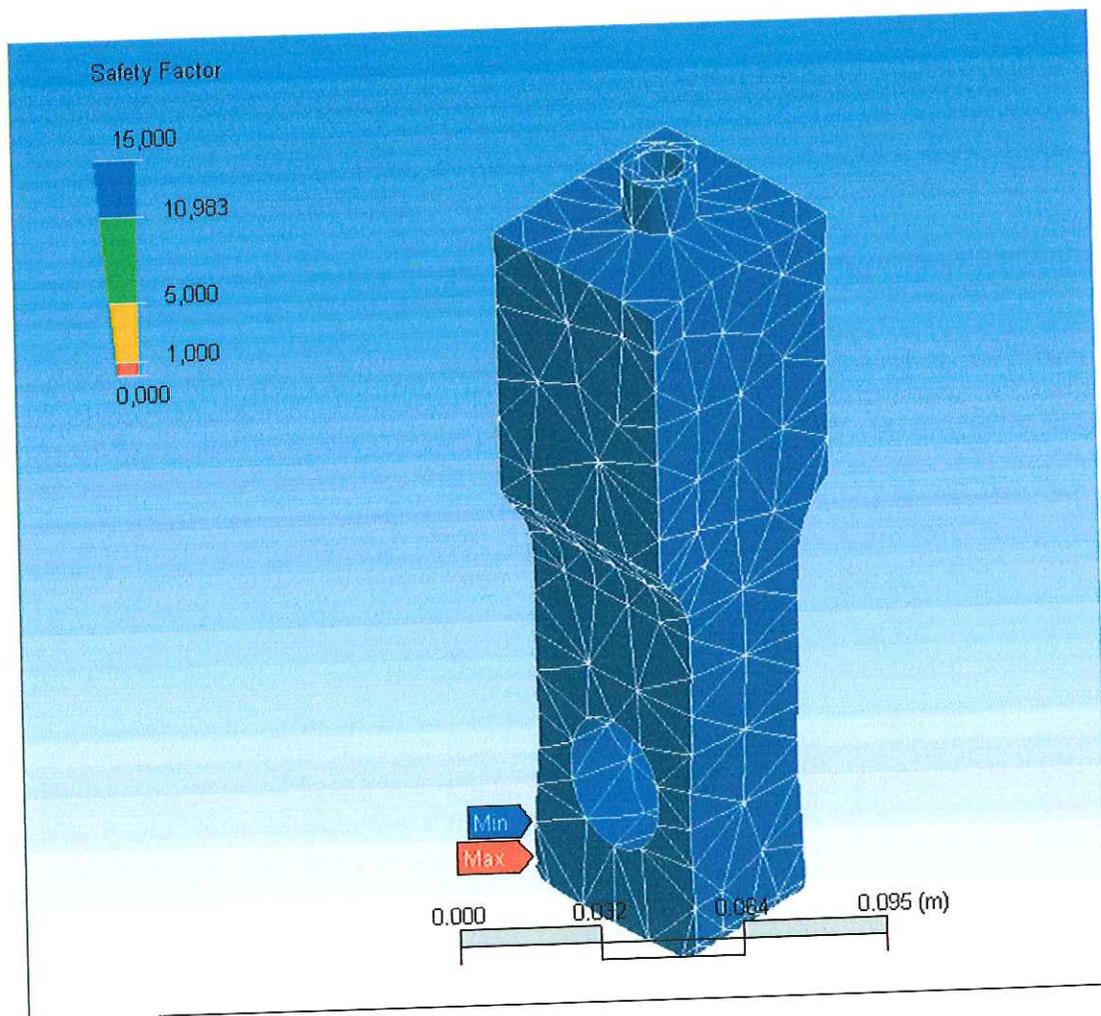


Fuente: Autor

Se simulo el eje más crítico de la estructura, alojado en el cubo que se encuentra conectado con el cilindro hidráulico, el cual resiste una carga de 549.37kgf,

ocasionado un momento flector en todo instante de tiempo, a lo largo del mismo; en la simulación se admitieron cargas puntuales, ya que el cubo ocupa un área periférica considerable en el eje y gracias a ello se obtiene un diseño confiable. En la figura se denota que el factor de seguridad es alto, por consiguiente la simulación de los otros ejes que intervienen en el prototipo se obvió, pues las cargas que soportan son más pequeñas y las longitudes de los mismos son cortas. El material de los ejes es acero 1020, que por sus características físicas resiste las cargas aplicadas por el péndulo.

Figura 58. Simulación del anclaje



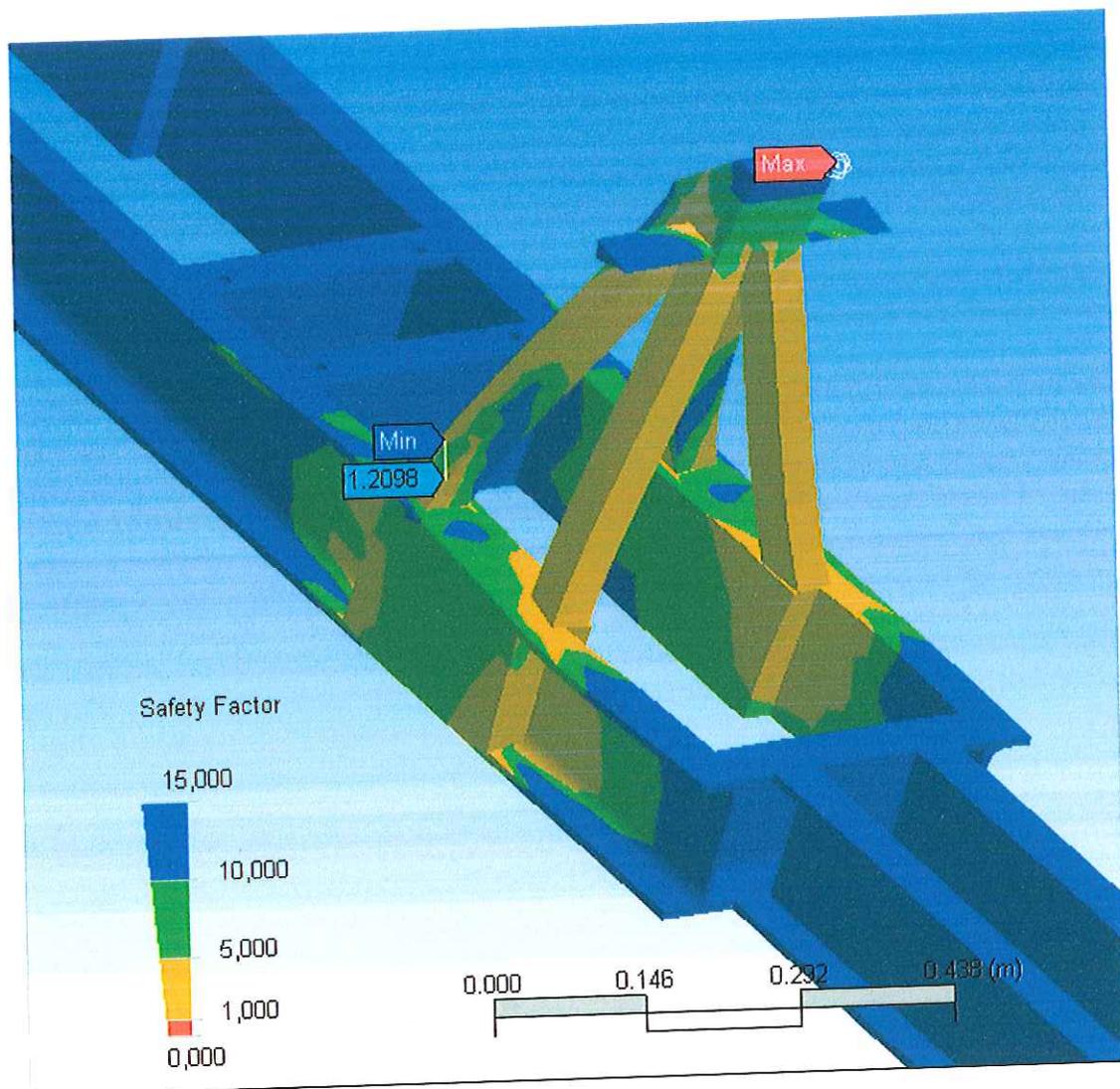
Fuente: Autor

En el diseño de la estructura se dispuso un anclaje acoplado a un extremo del vástago del actuador, que transmite el movimiento axial del mismo a un movimiento rotacional del péndulo, esto es posible, por que el anclaje es atravesado por un eje de 1¾" que esta soportado en sus extremos por unas chumaceras esqualisables alojadas en la barra del péndulo; la función de las chumaceras es evitar que se transmitan momentos flectores en el anclaje y que sólo se transfieran cargas axiales al actuador, evitando daños en los sellos y consiguiendo un alargamiento de la vida útil de los elementos.

Como se observa en la figura se efectuó el análisis de la pieza y se obtuvo un factor de seguridad $F_s > 15$, proporcionando una alta fidelidad en el diseño, este fragmento de la estructura en particular tiene un factor de seguridad muy alto, por que acopla el actuador al péndulo; como la placa del edificio esta para resistir una carga de $17 \text{Ton}/\text{m}^2$, este valor es crítico por si ocurre un daño en el anclaje, causando carga de impacto que originaria esfuerzo hasta $18 \text{Ton}/\text{m}^2$ en la superficie de contacto.

En la pieza los mayores esfuerzos se obtienen en la reducción y cambio de área; ubicado en el roscado del vástago, y en la perforación del eje que atraviesa el anclaje. El maquinado final resulto más sencillo, resistente y económico construirlo como una pieza maciza y robusta, en vez de un diseño ranurado en el centro donde se aloja el eje.

Figura 59. Simulación de los soporte de seguridad con la base

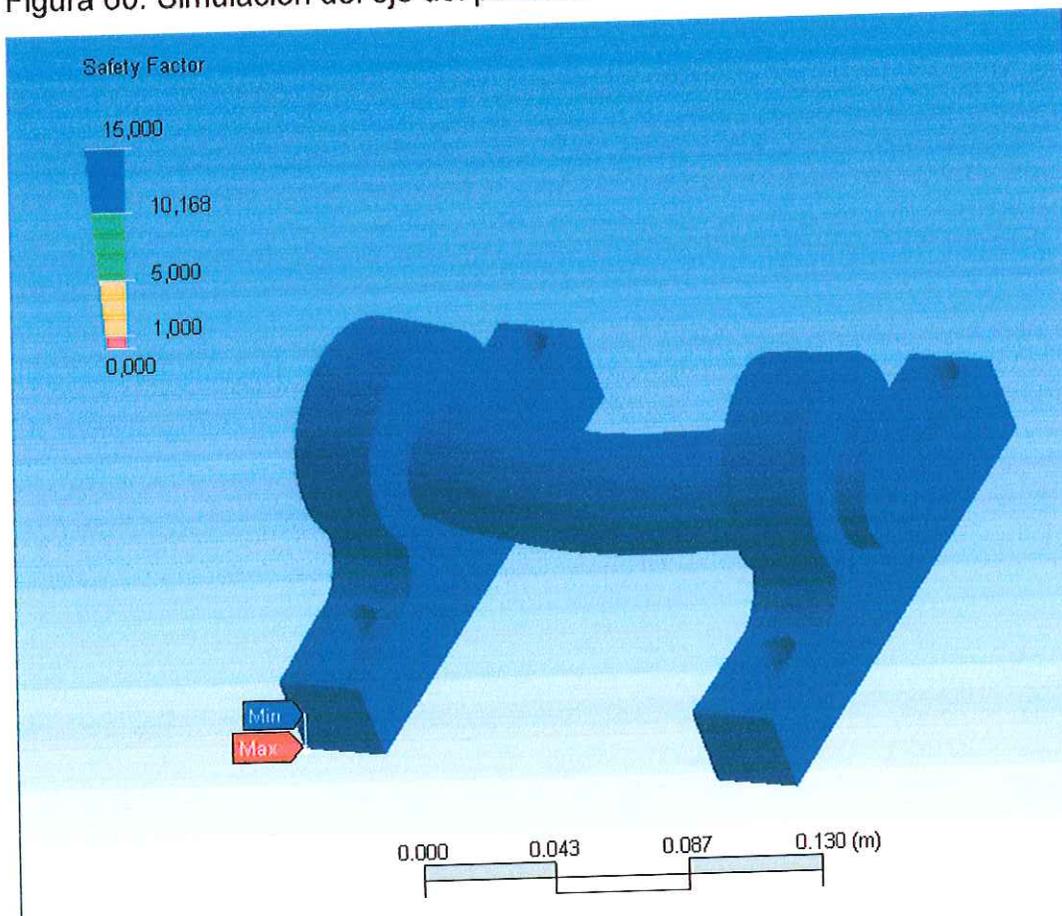


Fuente: Autor

La base de péndulo es la pieza donde están conectados el péndulo y los soportes de seguridad, su función es: aparte de alojar los elementos que componen el péndulo, es poder resistir la carga de impacto y el peso de la estructura. La base esta diseñada en un perfil estructural tipo "C", de dimensiones 152mmx54mmx8.7mm que se encuentra reforzado por 8 cajuelas empotradas de acero estructural.

El esfuerzo crítico mostrado en la figura es causado por el impacto, que afecta los apoyos de las barras diagonales de los soportes de seguridad, debido a esta condición se mejoro la distribución de esfuerzos soldando dos platinas en sus asientos que se acoplan fácilmente a la base con pernos de 3/8". El factor mínimo de seguridad de la base es $F_s > 1.2098$, que genera deformaciones despreciables en el material, además como se ve en la figura los soportes de seguridad se inclinan hacia atrás, originado esfuerzos de tensión y compresión en las fibras de la base, estos momentos de flexión se transfieren a los chazos causando un posible levantamiento de la estructura, por lo tanto se agrego cada 30cm un perno de sujeción.

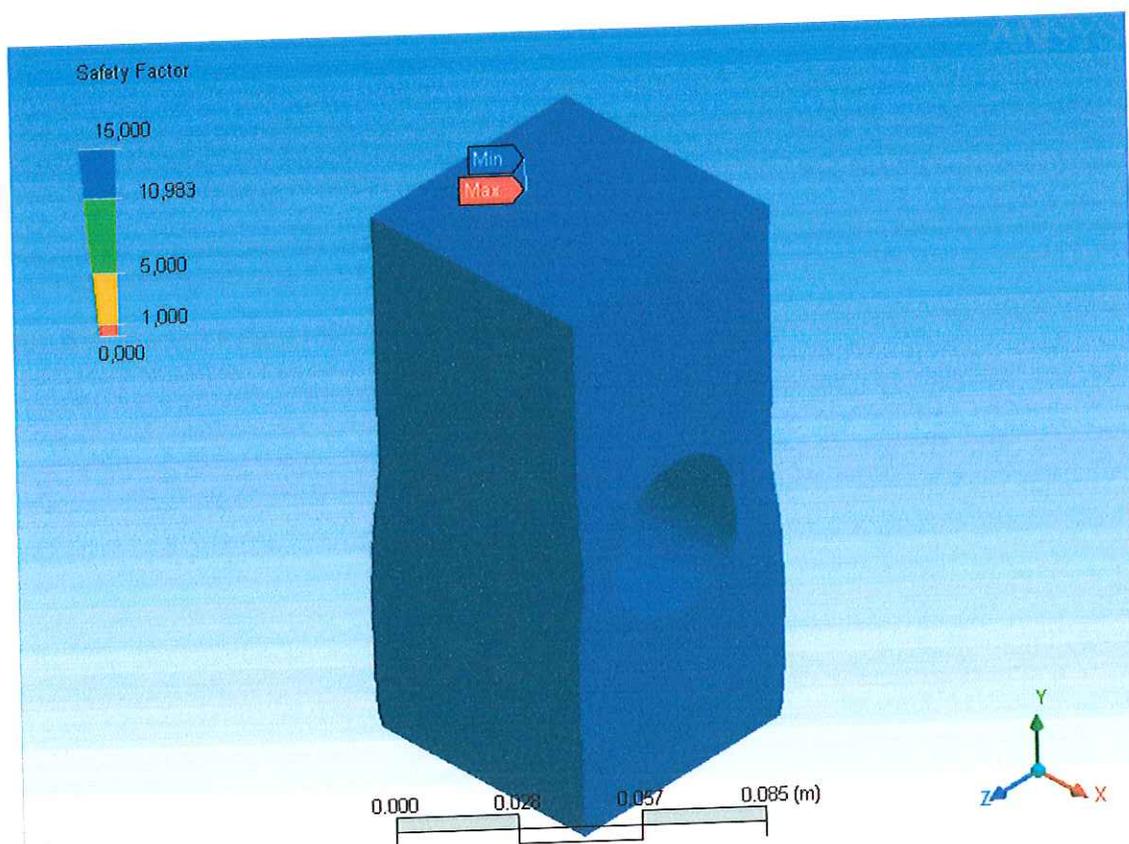
Figura 60. Simulación del eje del péndulo



Fuente: Autor

La rotación del péndulo es posible por un eje que se encuentra en la parte inferior de la barra, de diámetro de 1¼". La resistencia del eje se obtiene del análisis teórico por carga cortante y flexión, por lo tanto los esfuerzos hallados teóricamente no difieren en una gran proporción con los datos conseguidos en la simulación del eje, que vemos en la figura. El factor de seguridad del elemento simulado es $F_s > 15$, con este factor tenemos un elemento totalmente conservador.

Figura 61. Simulación del cubo

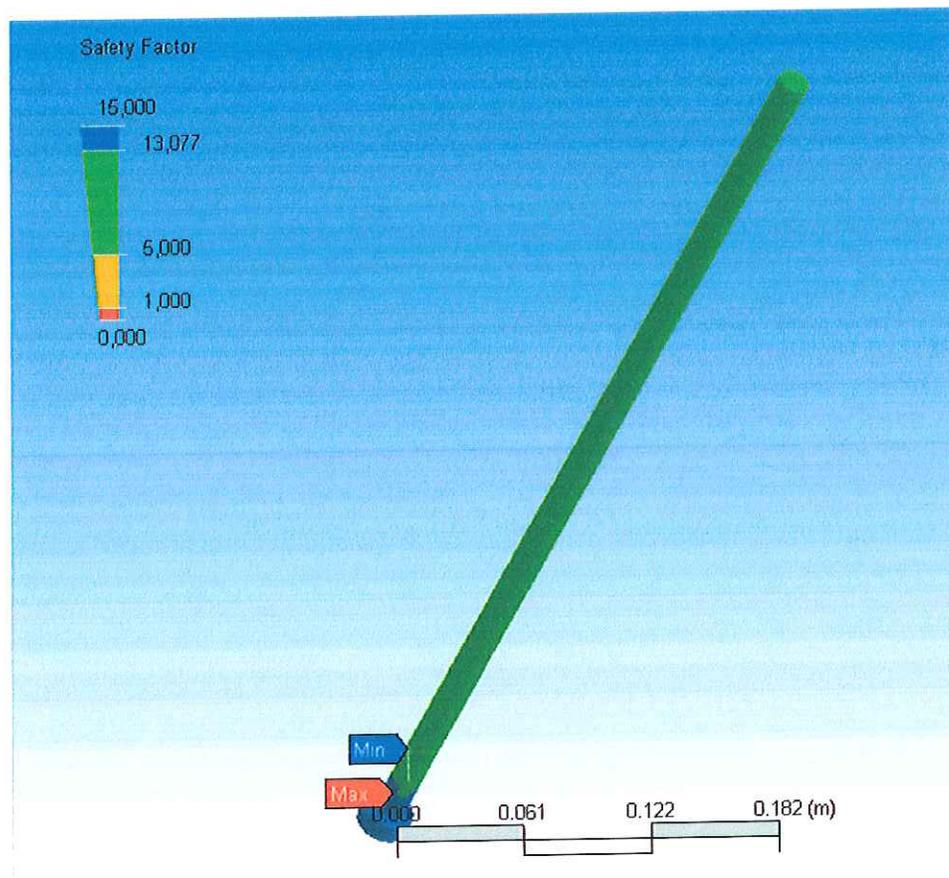


Fuente: Autor

El cubo de reposición es el elemento que acopla el actuador y lo hace rotar libremente con el eje de la base, por lo tanto los esfuerzos generados en el eje del actuador son transmitidos al elemento al cual esta conectado, estos esfuerzos crean cargas de aplastamiento en el cubo; se realizó un análisis teórico y se

comprobó la autenticidad de la simulación con la resistencia del material, sometido a cargas de aplastamiento ocasionadas por la posición crítica del péndulo a 37°. En la figura se observa como la sección transversal del cubo se deforma por la aplicación de la carga en el perímetro lateral inferior, por lo tanto los mayores esfuerzos se presentan cerca del orificio, causados por la reducción del área, además la deformación es muy pequeña comparada con la deformación admisible del material, es decir, es un elemento totalmente confiable.

Figura 62. Simulación del vástago del actuador

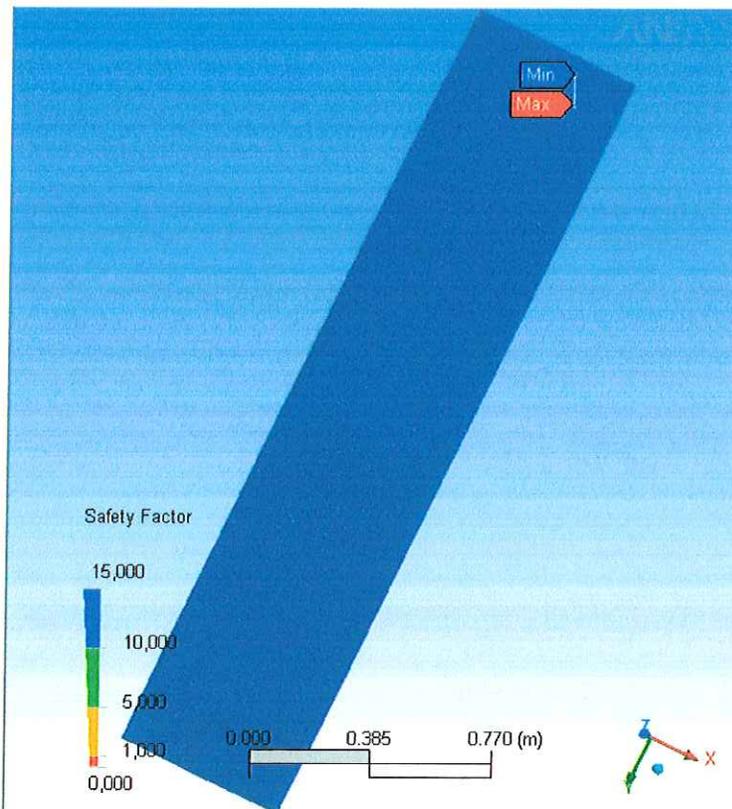


Fuente: Autor

En la figura se ve el vástago del cilindro hidráulico, que está sometido a carga axial en la posición extrema del péndulo a 37°, la fuerza que debe ejercer el actuador para vencer el reposo en ese ángulo es alrededor de 5450Nw de tensión,

con este dato se realizó la simulación, hallando un factor de seguridad $F_s > 13$, por lo tanto se concluye que el vástago del actuador no fallara por carga axial. Para impedir que el vástago del actuador este sometido a cargas de flexión se colocaron apoyos de libre rotación en la barra del péndulo, que evitan el abollamiento de los sellos que retienen el fluido hidráulico.

Figura 63. Simulación de la placa de concreto



Fuente: Autor

El péndulo invertido se empotra en una placa de concreto fundida en el mortero del edificio, sus dimensiones son de 2.5mX0.5mX0.12m, además consta de una rejilla en varilla corrugada de $\Phi=1/2''$, ubicada en el centro de la placa, por consiguiente aumenta la rigidez del hormigón, y evita las deformaciones excesivas de la misma debido al peso de la estructura. El movimiento del péndulo genera

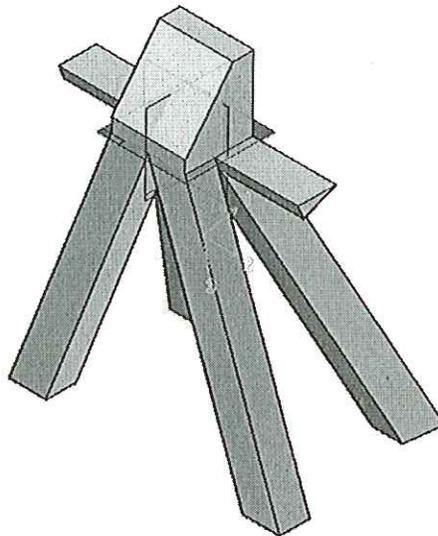
momentos en los pernos guindados a la base, ocasionando fuerzas de tensión y compresión que se tienen en cuenta en el diseño final.

Entre la superficie superior de la placa de concreto y la superficie inferior de la base del péndulo se monto un caucho neopreno de espesor de 14mm, que absorbe las vibraciones del sistema y a su vez previene el debilitamiento de la placa del edificio. Como se observa en la figura se determina el factor de seguridad ($F_s > 15$) y se concluye que el hormigón soporta los esfuerzos generados por las cargas normales de compresión y tensión en la superficie de la placa.

2.3.7 Descripción del equipo

- **Piezas del péndulo invertido**

Figura 64. Soporte de seguridad (2 unidades en el equipo)

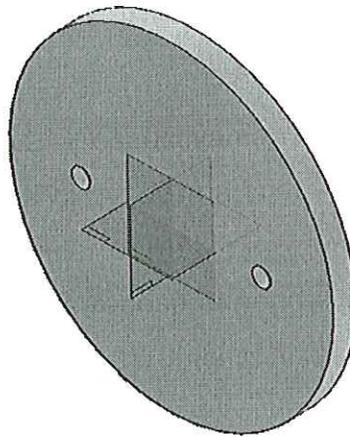


Fuente: Autor

Los soportes se diseñaron con el fin de crear un ambiente confiable y seguro en la elaboración de las pruebas de los laboratorios de hidráulica. Estos soportes están diseñados para soportar una carga de impacto de 80 toneladas además su estructura consta de perfiles cuadrados macizos de 1 $\frac{3}{4}$ " y una cabezal cuadrado

que tiene un chaflán (53° - 36.9° respectivamente), en el momento de la construcción no se consiguió esta clase de material en el comercio, por lo tanto fue necesario utilizar un perfil circular de $1\frac{3}{4}$ " para las bases del soporte y una cabezal de perfil circular de 4" donde reposa el péndulo. Los soportes se guindan a la base del prototipo físico por medio de unas platinas soldadas que a su vez se acoplan con pernos y tuercas a la base.

Figura 65. Disco del péndulo (2 unidades en el péndulo)

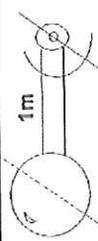
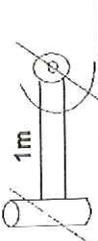
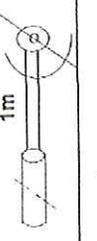
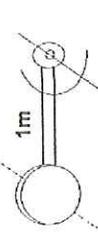
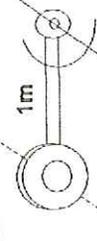
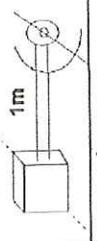
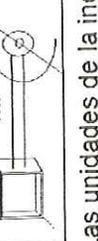


Fuente: Autor

Para facilitar el montaje se propuso un conjunto que consta de una barra central y dos discos laterales a través de los cuales se realizan sendas perforaciones, con tal de permitir que los discos se acoplen a la barra mediante pernos, aportando la masa y la inercia necesaria para conservar la estética del mismo.

Otra condición de diseño es el requerimiento y una geometría que genere alta carga inercial con una masa reducida. Para lograr dicho efecto se hizo una comparación de diferentes clases de geometría, teniendo como referencia el mismo valor de masa dimensiones similares y material de fabricación, (por ejemplo fundición gris, peso específico = $0.276\text{Lb}/\text{pl}^3$) en la tabla N1 se observan las geometrías y los valores inerciales. El modelo óptimo resulta ser un disco plano, en cuanto a las propiedades de inercia y facilidad de montaje.

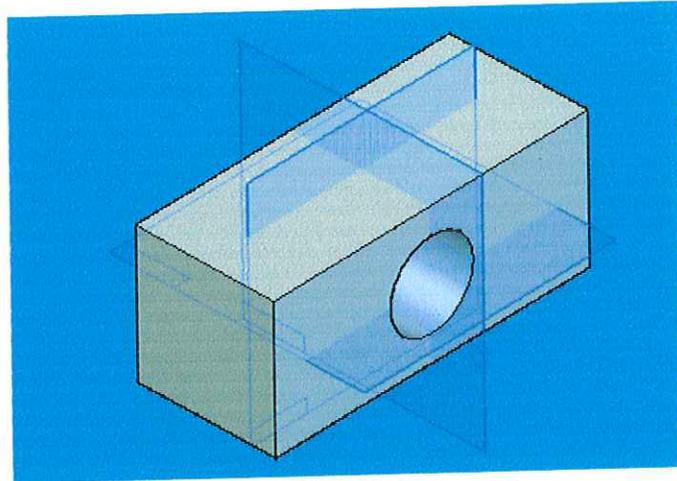
Tabla 2. Comparación de geometrías e inercias.

GEOMETRIA Y MONTAJE	INERCIA CENTROIDAL	DIMENSIONES PROPUUESTAS	INERCIA CENTROIDAL $Kg * m * sg^2$	INERCIA AL EJE *	PESO KGF
	$\frac{2}{5} * m * r^2$	R=0.120m	0.39	67.87	661.3
	$(\frac{1}{4} * m * r^2) + (\frac{1}{12} * m * h^2)$	R=0.060m h=0.430m	1.1	68.58	661.3
	$\frac{1}{12} * m * (3r^2 + h^2)$	R=0.060m h=0.430m	1.1	68.58	661.3
	$\frac{1}{4} * m * r^2$	R=0.215m e=0.030m	0.77	68.25	661.3
	$\frac{1}{2} * m * r^2$	R=0.215m e=0.030m	1.55	69.03	661.3
	$\frac{1}{2} * m * (R^2 - r^2)$	R=0.215m e=0.040m r=0.120m	1.073	68.553	661.3
	$\frac{1}{6} * m * a^2$	a=0.215m	0.51	67.99	661.3
	$\frac{1}{6} * m * (a^2 - b^2)$	a=0.300m b=0.230m	0.41	67.89	661.3

* Las unidades de la inercia del eje son $Kg * m * sg^2$

Fuente: Autor

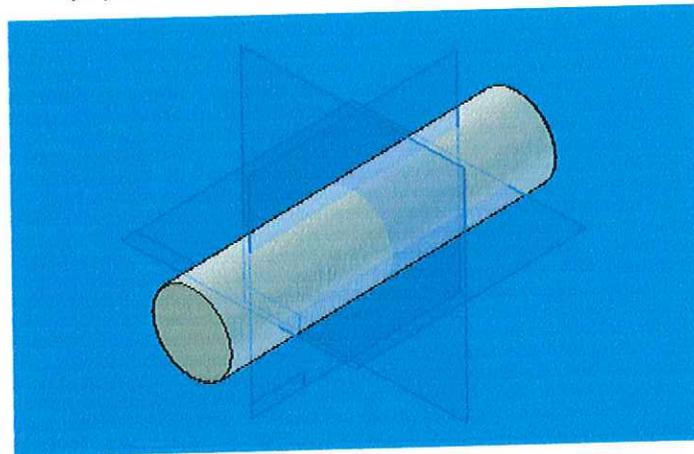
Figura 66. Apoyo trasero del cilindro hidráulico



Fuente: Autor

Esta pieza esta construida con un perfil cuadrado cuyas dimensiones son 65 mm x 64 mm, la función de este apoyo es permitir una libre rotación del cilindro hidráulico, esto es posible por que el cubo esta acoplado a un eje transversal que a su vez descansa en unas chumaceras que están ligadas a la base.

Figura 67. Ejes del equipo

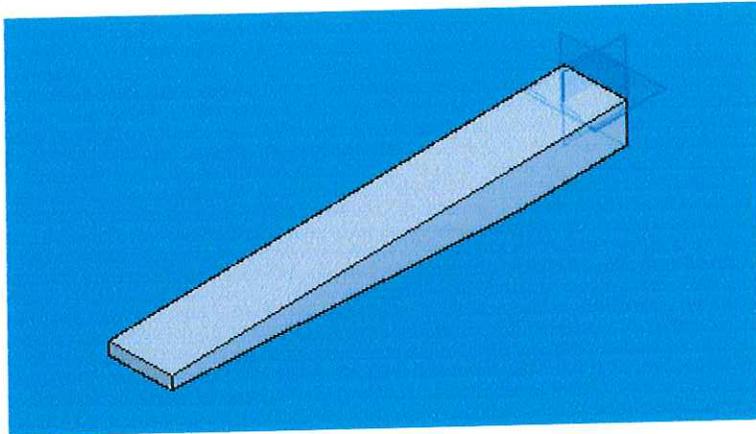


Fuente: Autor

El péndulo tiene un eje de diámetro de $1\frac{3}{4}$ " y una longitud de 310 mm que soporta el peso de los dos discos y de la barra, posee a demás otros dos ejes ubicados,

uno de ellos en el anclaje y el otro en el apoyo trasero del cilindro hidráulico, estos permiten el movimiento rotacional libre. El material utilizado para los ejes es acero 1020, además está calculado para resistir cargas que ocasionan esfuerzos cortantes y momentos flectores.

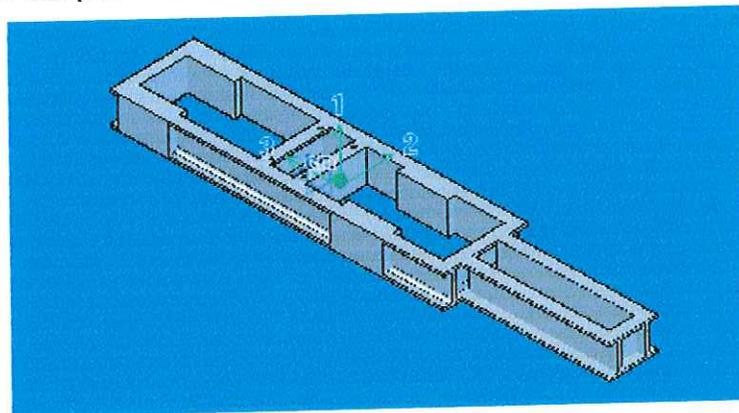
Figura 68. Soporte inferior del cilindro hidráulico



Fuente: Autor

El soporte inferior disminuye el riesgo de pandeo por la desalineación del eje del actuador en la base con el eje de la barra del péndulo. El soporte se construyó con un perfil en "C" de dimensiones 3½"x2" con un espesor de 3/8" y una longitud de 50cm para apoyar el actuador hidráulico y el cubo.

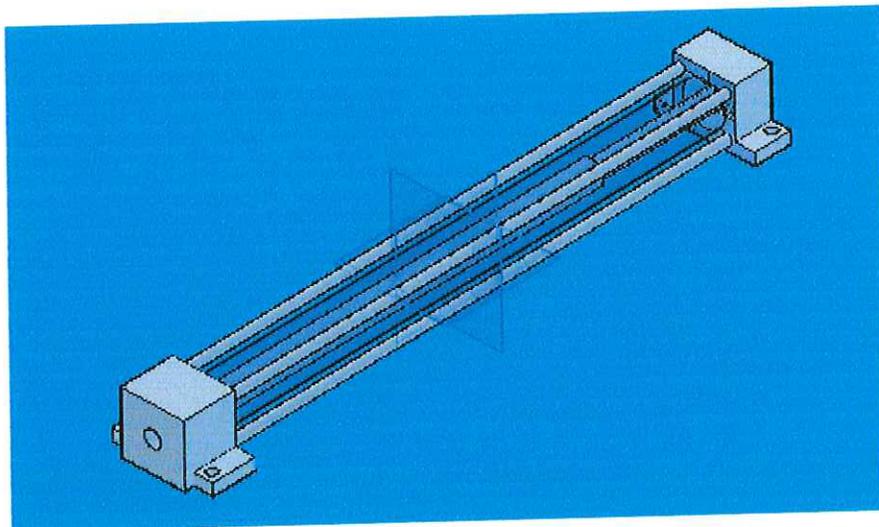
Figura 69. Base del péndulo



Fuente: Autor

El péndulo se encuentra apoyado en una estructura de perfiles en "C", compuesta por cuatro pincas longitudinales y cinco transversales de dimensiones 54mmx152mm y de espesor 8.7mm, esta estructura es la base del prototipo físico que se diseñó basado en el criterio de la resistencia al impacto que induce momentos que debilitan la estructura, debido a esto se reforzó en los tramos donde se encuentran alojados los soportes de seguridad con unas cajuelas de 45mmx134mmx200mm que evitan la flexión del perfil.

Figura 70. Cilindro hidráulico

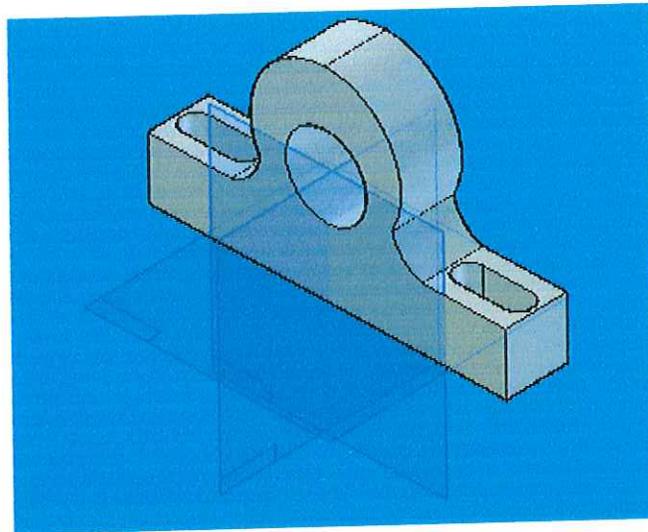


Fuente: Autor

Para transmitir el movimiento rotacional del péndulo se necesita de una fuerza externa, esta fuerza externa es transmitida por el cilindro hidráulico que está compuesto por una camisa apoyada a un soporte inferior y a un cubo en la parte posterior, además posee un vástago que se desliza axialmente dentro del cuerpo del cilindro hidráulico.

En el cilindro hidráulico circula un fluido a cierta presión que actúa en un área transversal, dependiendo de la presión y el caudal de la bomba, se genera una fuerza que se refleja en la velocidad de salida del vástago del actuador.

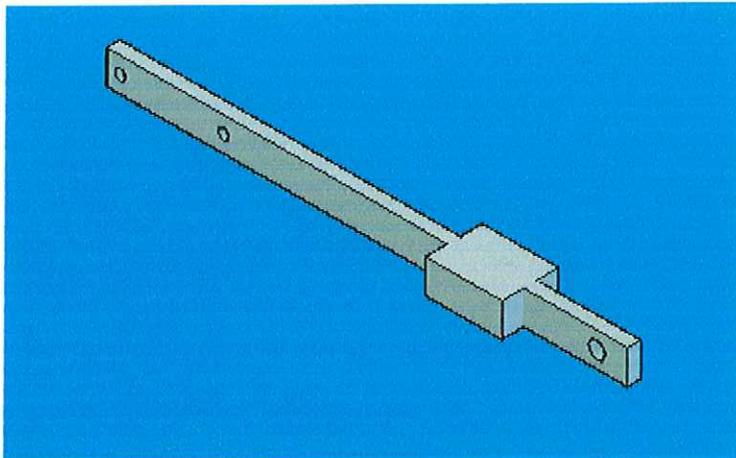
Figura 71. Chumaceras



Fuente: Autor

Las chumaceras se seleccionaron en base a el valor máximo de carga dinámica y estática, por lo tanto la carga estática esta compuesta por el peso de los discos y el peso de la barra que producen cargas radiales en los rodamientos de la chumaceras, y la carga dinámica esta compuesta por el peso de los elementos y la fuerza de inercia generada por el movimiento. Una de las características importantes de los rodamientos es que son escualizables, por consiguiente permiten corregir posibles desalineaciones en los ejes. En el prototipo físico se utilizaron 6 chumaceras, las dos primeras permiten la rotación del péndulo, otras dos permiten la rotación del actuador y las dos últimas son utilizadas para distribuir la fuerza central del vástago del cilindro a la barra del péndulo permitiendo un movimiento libre que evita los momentos de flexión.

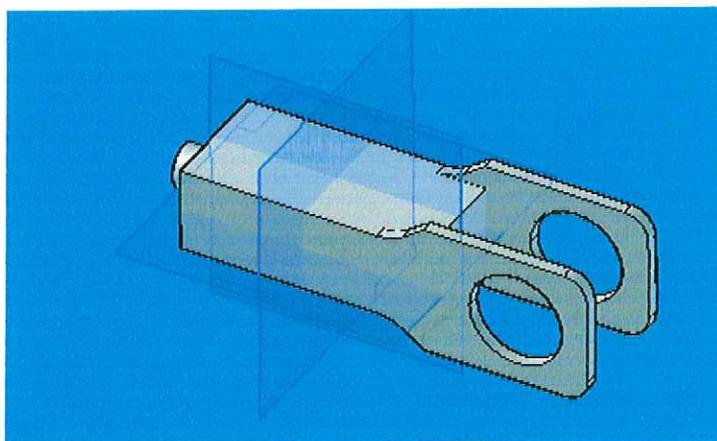
Figura 72. Barra del péndulo



Fuente: Autor

La barra del péndulo de área transversal de 6cm*4cm permite sostener la masa de los discos de radio 50cm por medio de unos pernos que atraviesan sendas perforaciones, además en la barra se soldaron dos perfiles " U ", donde se alojan dos chumaceras que transmiten el movimiento axial del vástago del cilindro a un movimiento rotacional del péndulo, por ultimo la barra consta de una perforación de 1³/₄" que la atraviesa un eje que se encuentra soldado en la parte inferior y que nos permite un movimiento circular libre del péndulo , .

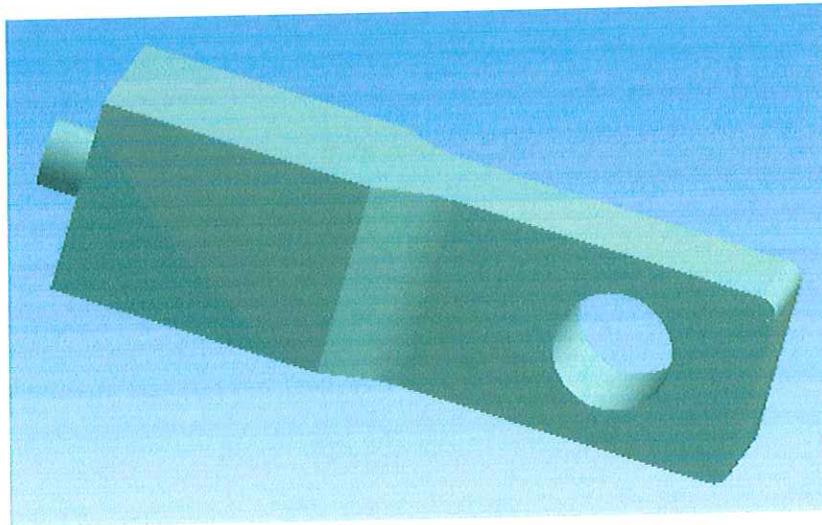
Figura 73. Anclaje del cilindro hidráulico al péndulo



Fuente: Autor

El cuerpo del anclaje es un perfil cuadrado de dimensiones de 50x35 mm, donde se encuentran adheridas dos laminas verticales con sendas perforaciones con el fin de poder girar sobre un eje, además tiene maquinado un cilindro de rosca hembra de 14mm en su parte posterior que sirve como acople con el vástago del cilindro.

Figura 74. Modelo CAD del anclaje implementado



Fuente: Autor

En el diseño real este anclaje tuvo modificaciones debido al alto costo de su maquinado, por lo tanto las dos laminas longitudinales fueron reemplazadas por un maquinado sólido de mayor resistencia y un menor costo.

Foto 1. Montaje del circuito hidráulico



Fuente: Autor

En el montaje del circuito hidráulico se verifica si la bomba del sistema genera la presión necesaria en el actuador, para producir un movimiento rotacional en el péndulo.

En primer lugar es significativo estimar aproximadamente la presión nominal en vista de la fuerza requerida del sistema. La determinación aritmética aproximada de la presión de servicio del actuador hidráulico es:

Despreciando las pérdidas en el cilindro se obtiene la siguiente relación:

$$F_n = p * A \quad (1)$$

Según la ecuación del caudal se tiene:

$$Q = v * A \quad (2)$$

y se obtiene reemplazando (1) con (2)

$$p = \frac{F_n * Q}{v} \quad (3)$$

Esta simple consideración permite concluir el nivel de presión de servicio para el movimiento rotacional del péndulo. Estos datos se introdujeron en la hoja de cálculo, que me arrojaron los siguientes resultados:

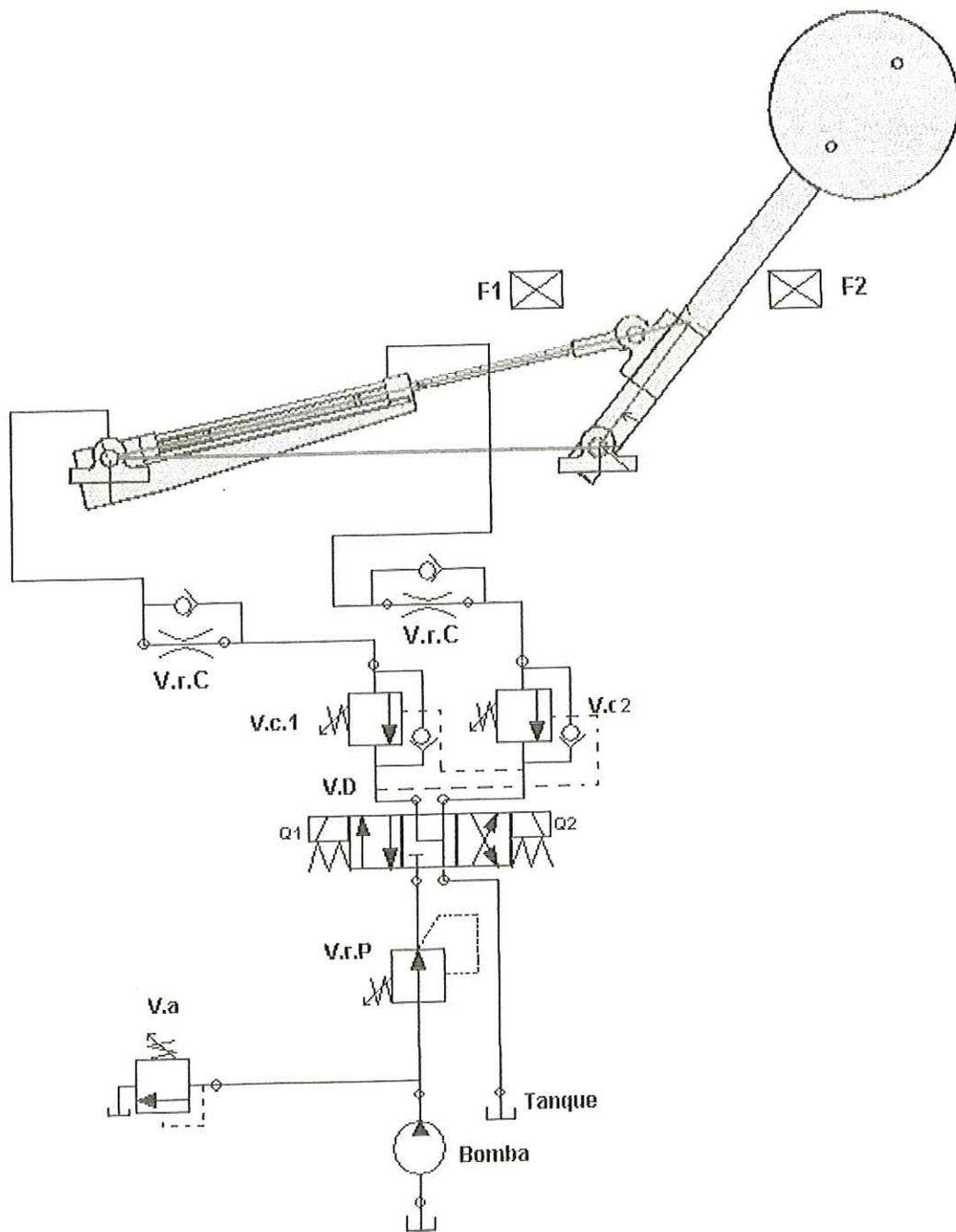
$$p = 44.86 \text{ Bar}$$

Esta presión es la necesaria para el sistema, teniendo en cuenta que la velocidad del actuador $v = 1 \text{ cm/sg}$, y la fuerza del actuador $F = 5658 \text{ N}$.

Circuito hidráulico: Este circuito hidráulico está diseñado para el sostenimiento de carga del péndulo por medio de unas válvulas contrabalance, a partir de esta manera comparamos los valores de carga teóricos y prácticos.

Un factor importante en la resistencia de los elementos del modelo mecánico, fue la velocidad del actuador; que se ve afectada por la oscilación del péndulo en cualquier posición mayor o menor al ángulo recto, ya que se generan cargas negativas en el actuador que incrementan la celeridad del vástago, y a su vez crean vacíos que originan el fenómeno de la cavitación en los elementos del circuito, para contrarrestar este problema se utilizaron las válvulas reguladoras de caudal que retienen fluido hidráulico, por lo tanto ocasionan una disminución tanto en la velocidad axial del actuador como en la presión del mismo.

Figura 75. Circuito hidráulico



Fuente: Autor

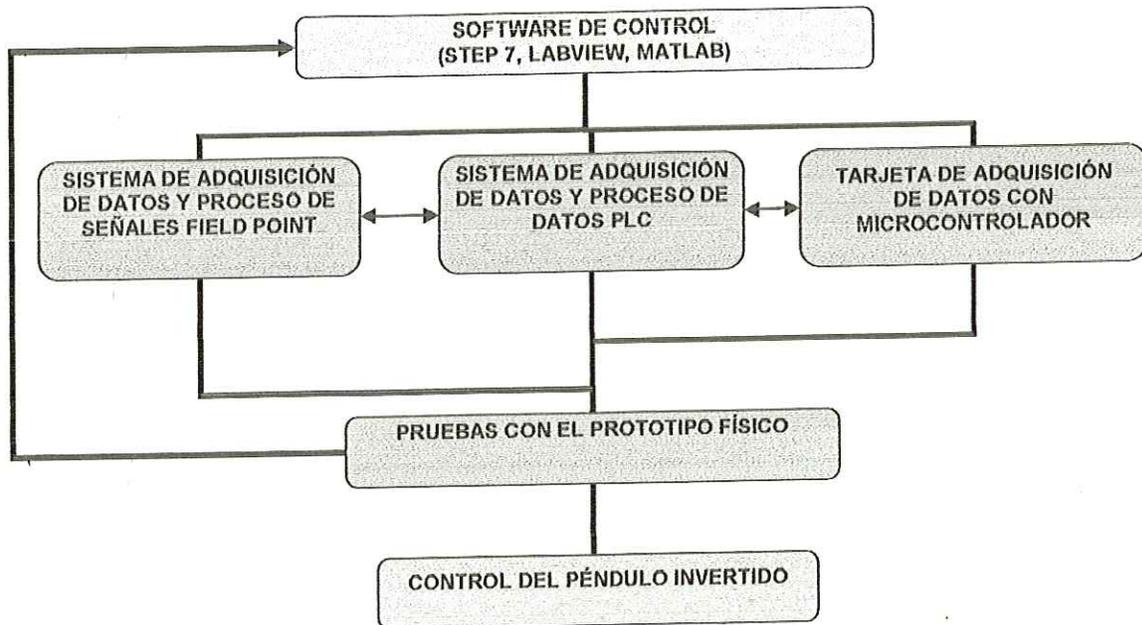
Como en todos los circuitos tenemos una **bomba** la cual nos proporciona el aceite a un caudal de $2 \frac{ga}{min}$, conectada en paralelo con una válvula de alivio (**V.a**) la cual nos proporciona la máxima presión que puede trabajar nuestro sistema definido por el taraje de la misma. En serie con la bomba esta conectada la válvula reguladora de presión (**V.r.P**) la cual cumple la función de regular la presión del sistema, en su símbolo la encontramos normalmente abierta y se cierra o se abre según lo deseemos produciendo así, tener varios niveles de presión sin necesidad de tener varias válvulas de alivio, a continuación esta conectada la válvula direccional (**V.D**) con centro flotante y accionada por solenoides los cuáles son controlados por medio de un circuito eléctrico, esta válvula será la que nos brinde el movimiento de entrada y salida del actuador, y el pilotaje externo de las válvulas contrabalance. Dependiendo de la presión de taraje de la válvula reguladora de presión el péndulo empezara a rotar.

El movimiento del péndulo se dará cuando el actuador se extienda o se retraiga por medio de los solenoides B1 y B2 en su orden correspondiente, el aceite de la bomba se conduce a la válvula reguladora de presión(**V.r.P**), con la presión regulada pasa por la direccional y llega a la válvula de contrabalance(**V.c.1**), como esta actúa en dirección contraria a este flujo de aceite tomará la vía que oponga menor resistencia que es la válvula cheque conectada en paralelo a la válvula de contrabalance, posteriormente el flujo es enviado a la válvula reguladora de caudal(**V.r.Q**) que nos controla la velocidad de salida del actuador, por tanto el aceite fluirá por la válvula reguladora de caudal que no permitirá que la carga baje aceleradamente, si no de una forma suave y segura para después pasar por la válvula de contrabalance(**V.c.2**) que se encuentra pilotada por el flujo que proviene a la salida de la direccional, si deseamos frenar la salida del actuador la contrabalance (**V.c.2**) sostendrá el peso del péndulo hasta que se energice alguno de los solenoides de la direccional, ocasionando que cualquiera de las válvulas contrabalance sea pilotada externamente y después de ello un movimiento

rotacional del péndulo, el mismo procedimiento ocurre en sentido contrario del flujo del aceite, es decir, en el retroceso del actuador.

2.3.8 Modulo de control

Figura 77. Organigrama del modulo de control



Fuente: Autor

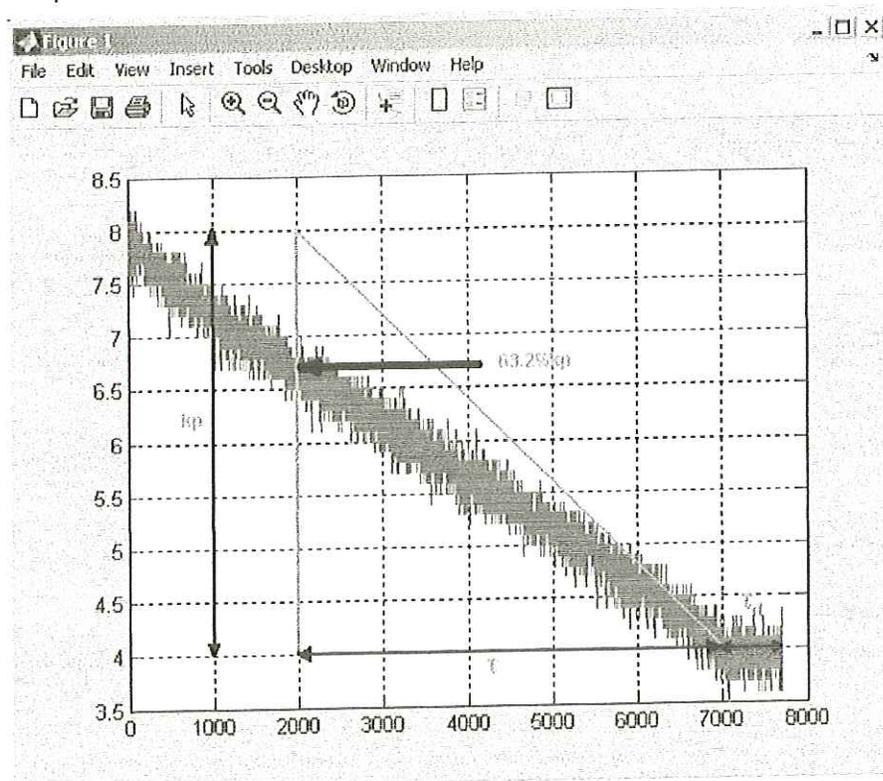
En el diagrama se observa las etapas de desarrollo del control que se implementó para llegar al final del prototipo físico, el encabezado del organigrama corresponde a la programación del software que permiten la visualización de datos y el manejo de la válvula direccional, la etapa anterior está ligada a tres fases de adquisición de datos: los módulos de Field Point, el PLC y los microcontroladores, estos elementos permiten la adquisición, envío y tratamiento de las señales que interviene en el prototipo físico del péndulo. Como se observa los módulos de field point trabajan en conjunto con el PLC, y el PLC en conjunto con la tarjeta de adquisición de datos, todas estas etapas tienen una meta, el control del ángulo del péndulo invertido, que es sometido a una serie de pruebas de movimiento

rotacional, permitiendo cuantificar el error de la variable sensada con la deseada, en el caso que se presente alguna anomalía en el control se genera una retroalimentación al encabezado del organigrama, permitiendo verificar las etapas para posteriormente corregir el inconveniente.

En el modulo de control se plantea tres formas de controlar el ángulo del péndulo invertido, estas dos formas se desarrollan para comparar varios sistemas SCADA: los sistemas son Labview, step7 (PLC Siemens S-300) y Matlab con comunicación serial, con base en lo anterior se concluye y se determinan las ventajas y desventajas del uno con respecto del otro. Las variables que intervienen en el control son el ángulo deseado y el ángulo sensado que se obtiene del potenciómetro lineal del actuador.

- **Función de transferencia de péndulo invertido**

Figura 78. Respuesta del sistema.



Fuente: Autor

Esta grafica corresponde a la respuesta del sistema del péndulo invertido en un rango de 37° a 127° con la horizontal, como se observa es una línea recta, debido al comportamiento del potenciómetro lineal, y a los elementos hidráulicos como son las reguladoras de caudal y la válvula direccional, que ocasionan que la respuesta sea de este tipo.

El visualizador grafico consta de un rango en el eje vertical, que es un voltaje variable que va desde 3.5 Volts para 37°, hasta 8.2 Volts para 127°, y en el eje horizontal encontramos una escala de numero de muestras.

Con esta respuesta del sistema se halla la ecuación de transferencia por el procedimiento de identificación, el método utilizado para este fin, fue el de SMITH, diseñado para sistemas sobreamortiguados de 1er orden con excitación paso. La ecuación de transferencia esta compuesta por un Kp que tiene como valor el setpoint o el ángulo de posicionamiento del péndulo, un "τ" que es el valor de la recta horizontal que se une con la vertical que corta la respuesta a 63.2%Kp, este valor es medido después del retardo del sistema "τd" que corresponde al valor de la línea horizontal donde se inicia la respuesta del sistema, este retraso es debido a la inercia del mecanismo y al retardo de la respuesta del módulo control, módulo de electrónica y del circuito hidráulico.

Los valores obtenidos se exponen a continuación:

$$\tau = 5000$$

$$\tau d = 800$$

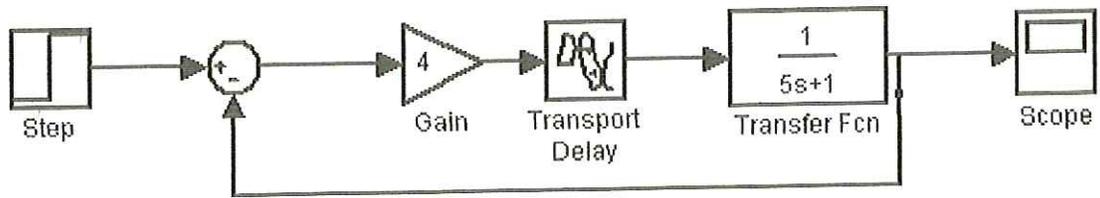
$$Kp = 4$$

Por consiguiente la ecuación de transferencia para este sistema es:

$$G(s) = 4 * \frac{e^{-800s}}{5000s + 1}$$

Con esta ecuación de transferencia se construye el diagrama de bloques

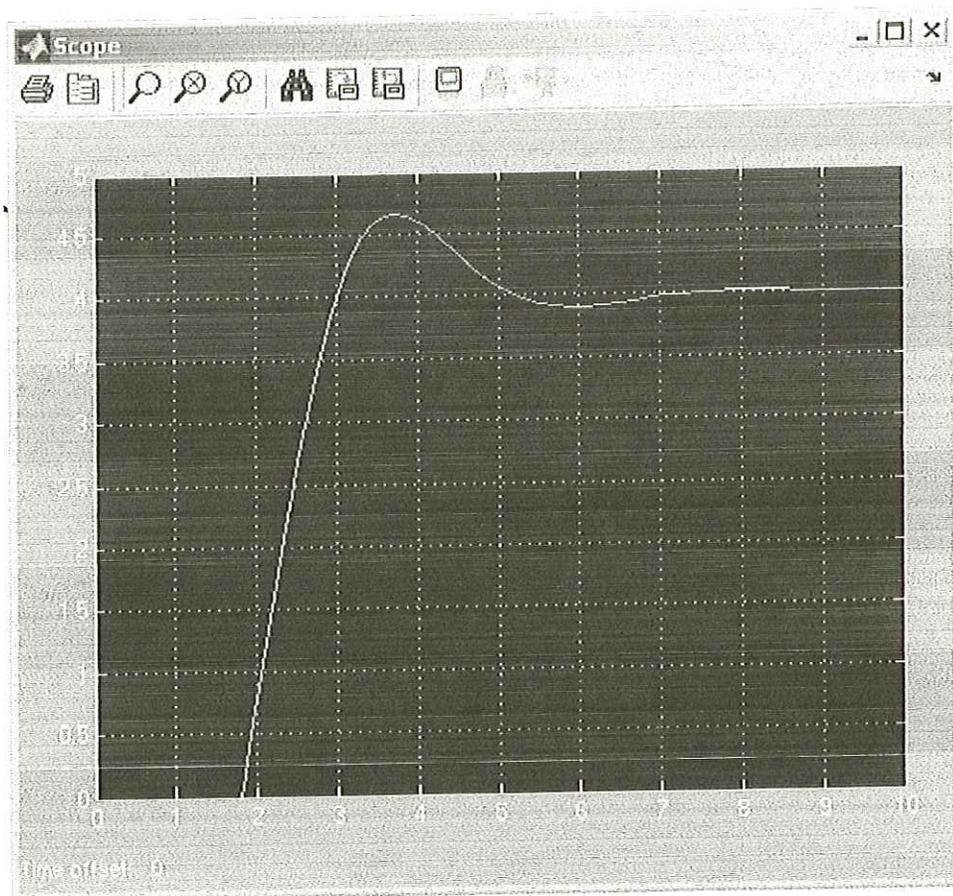
Figura 79. Diagrama de bloques.



Fuente: Autor

La respuesta del sistema en simulink , para un setpoint "4volts que son 40°" es:

Figura 80. Respuesta del sistema de control en simulink

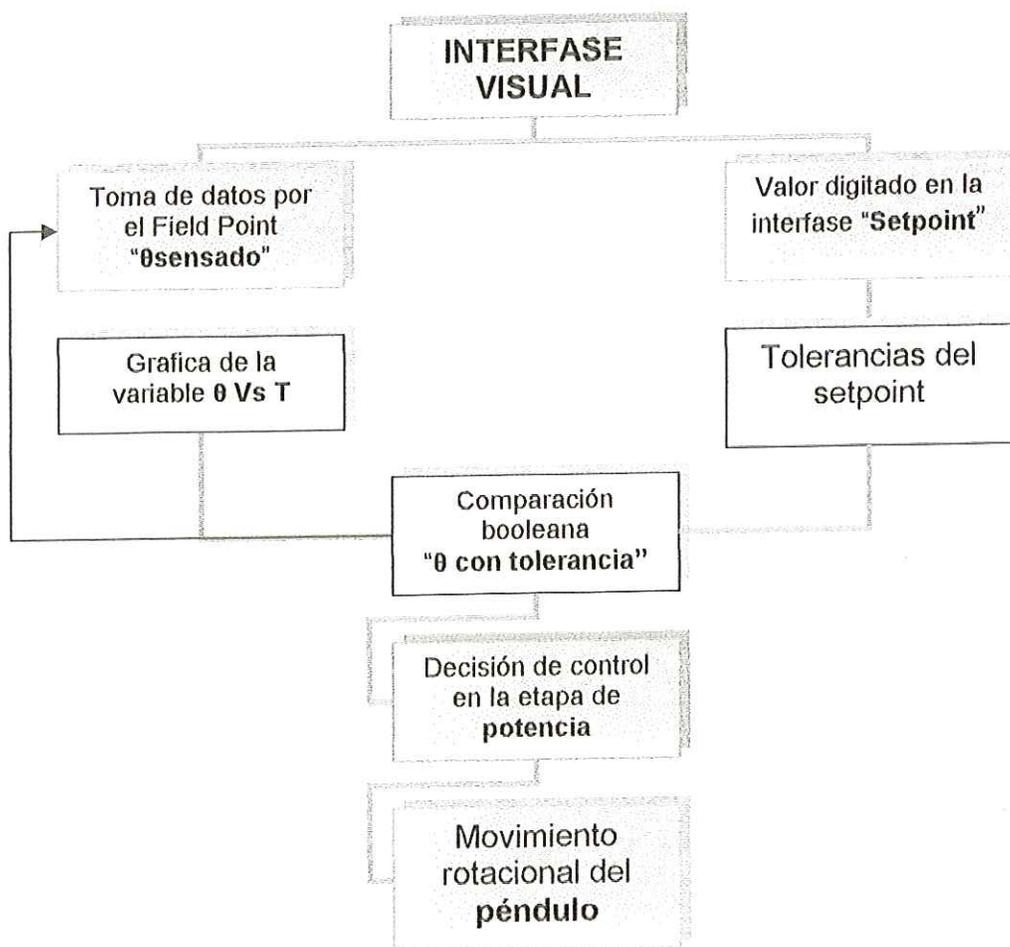


Fuente: Autor

Como se observa la respuesta del sistema tiene un sobré impulso que supera el setpoint, y se atenúa hasta que se estabiliza la señal, esto se debe a que nuestro sistema no consta de un controlador para estabilizar la señal, además consta de un retardo en la acción de control ocasionado por la inercia y la respuesta de los elementos electrónicos.

- **LABVIEW**

Figura 81. Organigrama del control con Labview



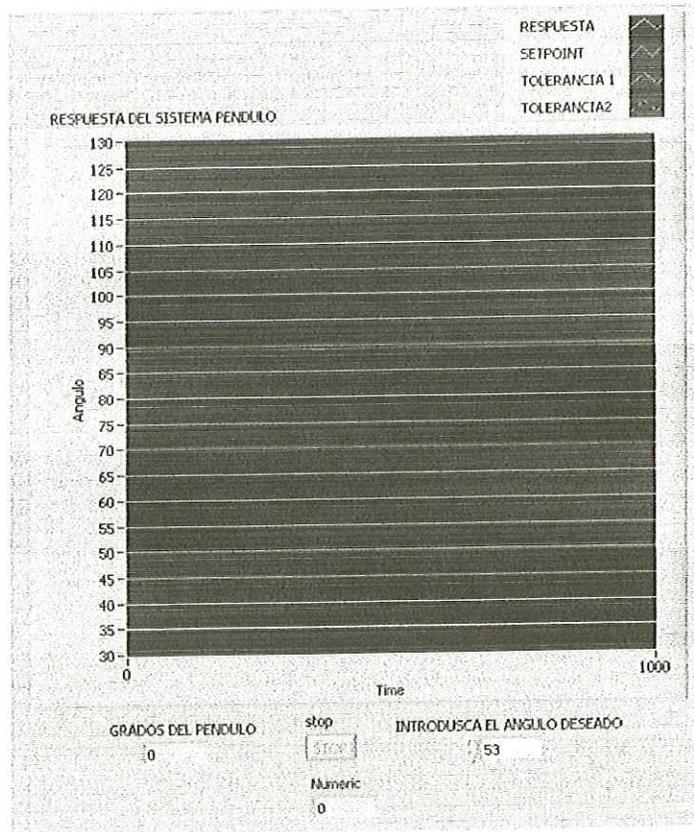
Fuente: Autor

Labview es un software utilizado para el diseño de interfases visuales y de estructuras de programación, que permite mostrar y procesar los datos recibidos por el sensor del péndulo, y a su vez tomar decisiones en base a ello.

En el control del péndulo se implementaron dos programas en labview, Un primer programa que realiza en su totalidad el control, compuesto por dos etapas: la primera es el PC que me permite procesar datos e interactuar con una interfase visual, y la segunda son los módulos de field point encargado del acondicionamiento de la señal y la toma de decisiones.

El programa consiste en recibir el dato de la posición sensada por el potenciómetro lineal con los módulos de field point, esta entrada análoga posteriormente se digitaliza y se envía al programa en un valor decimal que es convertido en un valor real por la función SQL, este valor real es la entrada del bloque "ecuación" que a su salida se obtiene como resultado el ángulo que tenemos en ese instante, el cual es graficado y comparado con las tolerancias del setpoint, es decir, el error del ángulo, después de ello se determina el sentido de giro del péndulo por medio de unos comparadores booleanos que adicionan y substraen el valor deseado con el error, estos activan las salidas digitales del modulo del field point que a su vez trabaja en conjunto con la etapa de potencia para posicionar el péndulo.

Figura 82. Interface visual en labview

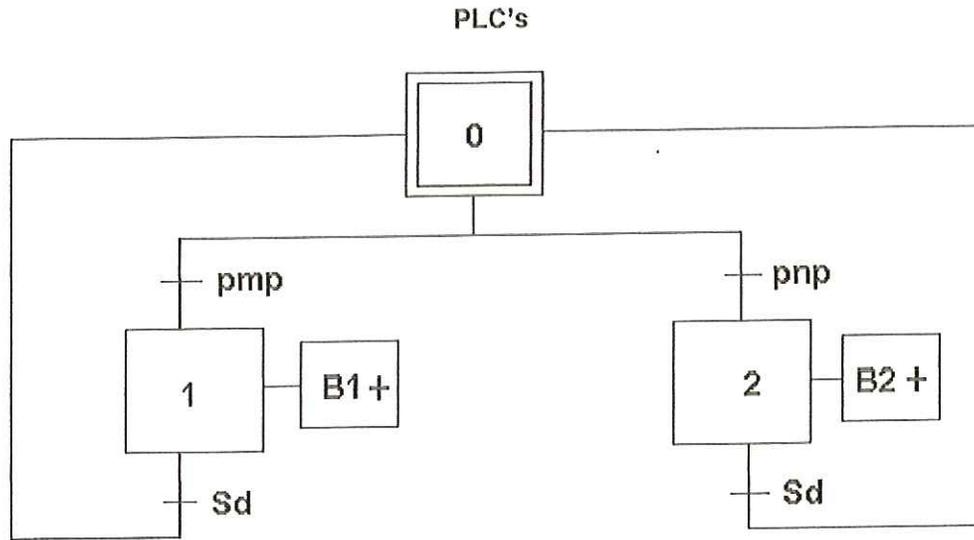


Fuente: Autor

En el segundo programa se divide el proceso de control de esta manera; labview se encarga de graficar la respuesta del sistema y de enviar la señal del setpoint con los módulos de field point, el proceso de datos y toma de decisiones es delegado al PLC. El software de Labview recibe la señal del modulo de entradas análogas del field point, dicha señal es linealizada y posteriormente graficada en tiempo real. En este control la señal es enviada a la entrada del bloque de "ecuación", que me permite acondicionar el valor de corriente en el modulo de salidas análogas del field point, que posteriormente constituye una entrada del PLC, por lo tanto este ultimo toma el dato enviado y lo linealiza para ser comparado con el valor del ángulo sensado, el resultado de la comparación es una señal discreta que es enviada a la etapa de potencia encargada de energizar la

bobina de la válvula direccional, por lo tanto cuando el error sea mínimo esta señal desaparecerá, ya que el péndulo esta en la posición deseada.

Figura 83. Diagrama graceft del PLC



Fuente: Autor

Tabla 3. Variables de acción y Sensores de posición

Acción	Bobina	Orden	Información	Sensor
Energizar bobina B1	B1	B1+	Posición del péndulo mayor que la deseada	Pmp
Energizar bobina B2	B2	B2+	Posición del péndulo menor que la deseada	Pnp
			Posición deseada	Sd

Fuente: Autor

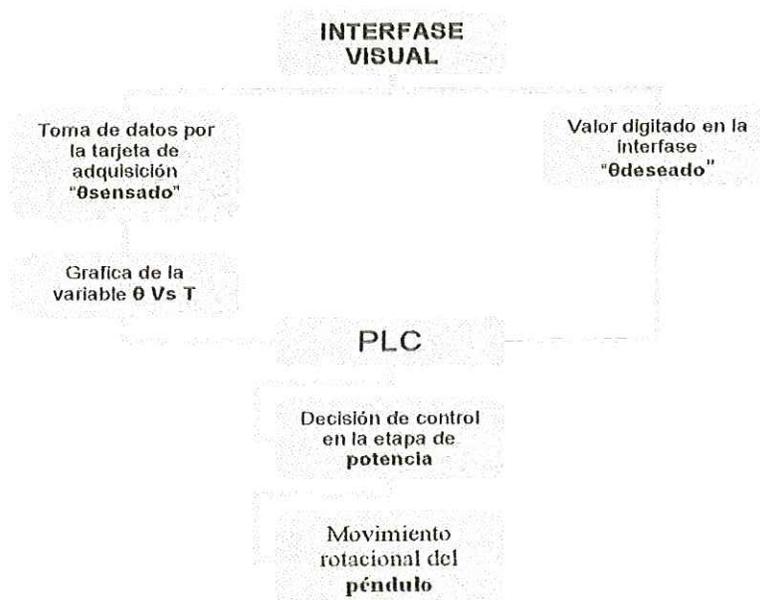
Este diagrama funcional nos representa por medio de gráficos el funcionamiento de la parte operativa del péndulo invertido; el cuadro superior indica el comienzo del programa que se diverge en “o” esperando la respuesta de la transición (**pmp**, **pnp**), es decir, la comparación entre el setpoint y el θ sensado, debido a esto

solamente se activa unas de las etapas (1 o 2) y por consiguiente se alimenta una de las bobinas(B1,B2), esto se lleva a cabo hasta que el péndulo se encuentre en la posición deseada(Sd).

En el PLC se diseñó un programa encargado de tomar las decisiones de control de la válvula direccional, este se implementó con la fase de matlab y con el segundo software de labview, que nos provee de un instrumento de supervisión del setpoint deseado y de la variable sensada, por lo tanto el PLC toma la señal enviada por el sistema de visualización, la cual es procesada y comparada con el valor sensado, en base a lo anterior se transmite la señal a la etapa de potencia que energiza el solenoide correspondiente de la válvula direccional, que a su vez genera un movimiento rotacional en el péndulo. El PLC tiene una ventaja en comparación con el control propuesto en labview, ya que consta de un procesador propio, procesa y muestrea datos en un corto tiempo, en cambio labview está limitado al procesador del PC, este último en cargo de distintas tareas al mismo tiempo.

- **MATLAB**

Figura 84. Organigrama del modulo de matlab.

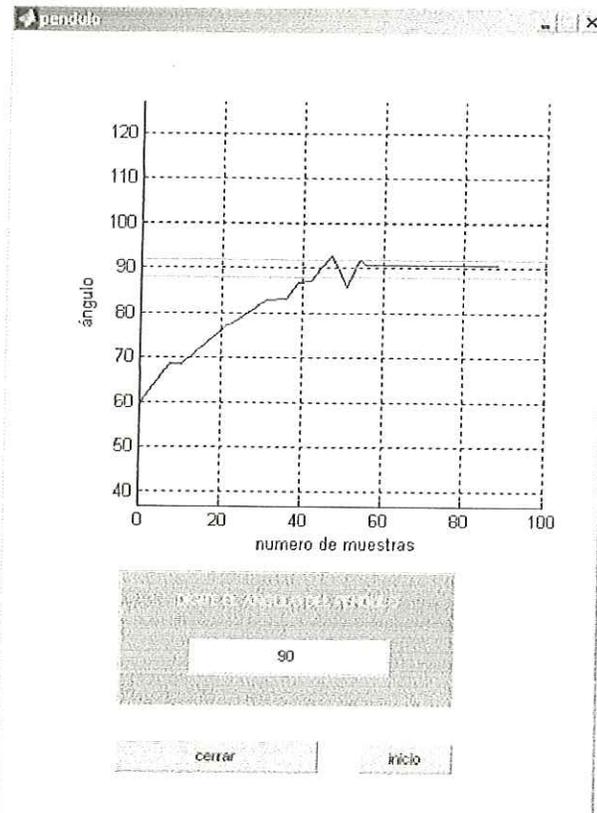


Fuente: Autor

Se diseñó un software en el programa de MATLAB, que consta de una interfase visual donde se grafica el ángulo sensado, el ángulo deseado y las tolerancias del error. El programa consiste en tomar y linealizar los datos del puerto RS232, esto es posible con una función llamada `reci=fgets(s)`, el valor linealizado corresponde al ángulo sensado, este es el dato graficado en tiempo real.

En la interfase visual del matlab se digita el setpoint, que es el valor al cual deseamos que el péndulo se posicione, esta señal es enviada hacia el puerto RS232, por medio de la función `fprintf(s,'%03d',dato);`, por consiguiente es recibida por la tarjeta de adquisición de datos, que se encarga de acondicionar la señal y reenviarla al PLC, y por ultimo se realizan las debidas comparaciones y con base en ellas se toma las decisiones.

Figura 85. Respuesta del sistema con matlab.



Fuente: Autor

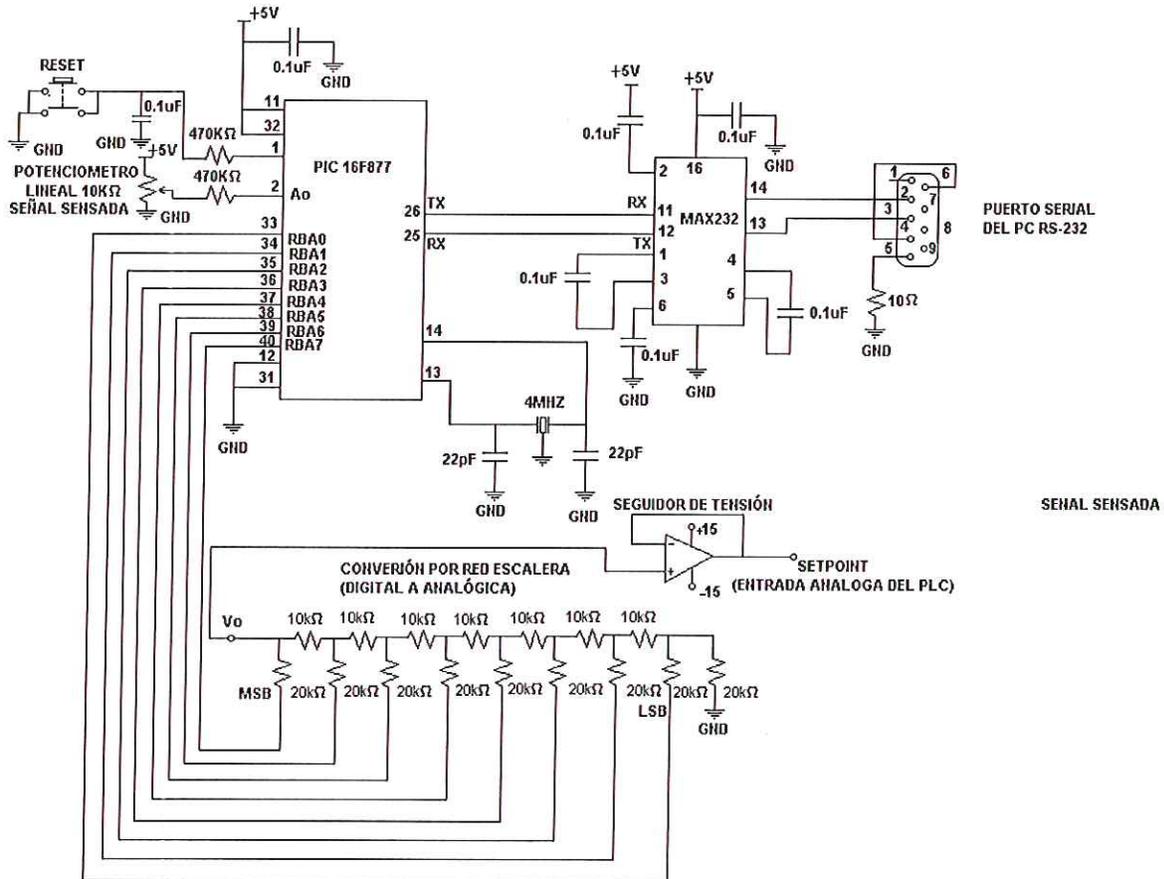
El montaje hidráulico requiere de un circuito eléctrico semiautomático que se implementa para el manejo del péndulo, como se observa en la figura el circuito consta de dos líneas una alimentación de 24V y una línea neutra. La primera línea esta compuesta por un pulsador **s1**, encargado de iniciar la secuencia de la bobina 1, en serie encontramos dos conectores normalmente cerrados, el primer conector **s2** permite proteger la bobina de la válvula direccional y el otro conector **F2**, es un final de carrera activado por el péndulo, que origina la perdida de energía en el solenoide de la válvula direccional, por consiguiente ocasiona que el fluido hidráulico deje de circular y se produzca un paro en el movimiento del péndulo, por ultimo tenemos la salida de control (**Q1**) que acciona la válvula direccional, en el momento de energizarse, esta salida acciona un contacto normalmente abierto que permite el enclavamiento de la señal.

En la segunda línea se encuentra un pulsador (**s2**) en serie con un contacto normalmente cerrado (**s1**) y un final de carrera (**F1**) que controla la posición del péndulo a 53°, un análisis idéntico al anterior describe a este bloque, finalizando tenemos la salida (**Q2**) que acciona la bobina de la válvula direccional y a su vez acciona el contacto de memoria (**Q2**) para el enclavamiento.

- **Tarjeta de adquisición de datos.** En el desarrollo de la etapa de electrónica se implemento una tarjeta de adquisición de datos, que consta de un sistema de comunicación serial RS-232, que permite enviar los datos al PC para posteriormente ser graficados, la señal recibida por el PC es la tensión digitalizada por el PIC, este voltaje es suministrado por el potenciómetro lineal de **10kΩ**, que permite tener una salida de voltaje que es proporcional al ángulo del péndulo, este sensor de posición es alimentado a una tensión de 5v, por lo tanto se encuentra una variación de voltaje en su pin de señal, a medida que el péndulo rota: esta señal es enviada al PIC 16F877 que es el encargado de transformar un voltaje análogo en un valor digital, ya que consta de un conversor ADC de 10bits, este valor digitalizado es enviado al puerto serial RS-232, debido a que este puerto

maneja tensiones de 12 y -12 Volts, el PIC necesita de un elemento que eleve los niveles de tensión, el MAX 232 permite acondicionar los voltajes enviados por el PIC y a su vez permite enviar y recibir datos al puerto RS-232 e interpretarlos por el PC.

Figura 87. Tarjeta de adquisición de datos.



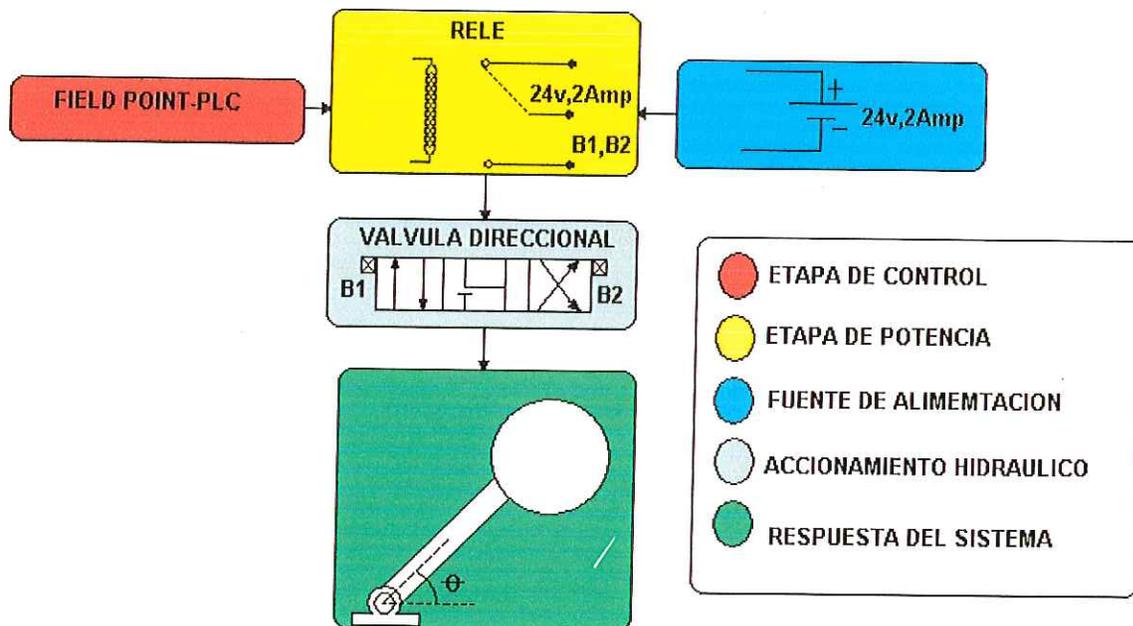
Fuente: Autor

Recibidos los datos son procesados por matlab que se encarga de graficarlos en tiempo real en un entorno visual. El software de matlab me permite digitar el ángulo deseado, este valor es enviado del PC al PIC16F877, este ultimo es el encargado de digitalizar el dato y reenviarlo por sus puertos (RBO0.....RBO7) a una red escalera de 8 bits, por lo tanto se obtiene un valor análogo que

corresponde a la posición final del péndulo, esta tensión es remitida a una entrada análoga del PLC, el cual se le delega la comparación de los datos y toma de decisiones de accionar la válvula direccional, para retraer, extender o mantener en reposo el vástago del actuador.

- **Circuito de potencia.** El control del péndulo requiere de una etapa de potencia encargada de la alimentación de las bobinas de la válvula direccional que requieren de tensiones 24V y amperajes de 1.26Amp, las bobinas constan de una resistencia de 19Ω , y son los elementos que causan los altos consumos de corrientes. Esta etapa de potencia fue necesaria por los bajos suministros a la salida de las tarjetas de adquisición de datos, y por consiguiente se efectúa un circuito de interfase de potencia que nos asegura el consumo de amperaje de las bobinas de la válvula direccional y nos protege los módulos de field point y el PLC.

Figura 88. Organigrama del modulo de potencia.



Fuente: Autor

En el montaje inicial se diseñó el circuito de potencia para el control del péndulo, pero durante el transcurso del montaje se optó por utilizar módulos de potencia BOSCH, estos se eligieron por que son módulos de fácil manejo y que se encuentran a la mano del estudiante, estos módulos manejan una bobina de contacto con una alimentación de 24V, 1MΩ de carga y consumos de corriente de 24microA, estos consumos los suministran fácilmente los dispositivos de control que manejan salidas de tensión de 24V, 2Amp Máx. Output para el PLC y para los field point una fuente externa de 24V máx. 1Amp.

- **Finales de carrera.** El péndulo invertido consta de dos finales de carrera, que se encargan de la seguridad del vástago del cilindro hidráulico, los cuales evitan que la presión de la bomba cree una fuerza axial y ocasione un pandeo del vástago en el momento en que el péndulo repose en el soporte de seguridad en la posición de 37°, los finales de carrera son swicht, que se conmuta de un estado a otro, de (NO) normalmente abierto a (NC) normalmente cerrado, esto es posible por su espigo, ya que consta de una rueda que permite el movimiento rotacional libre para evitar cualquier atascamiento o rozamiento brusco con la barra del péndulo.

Los finales de carrera en un principio conformaban dos entradas digitales del PLC y de los field point, en el montaje se optó por utilizarlos en serie con los sockets de las bobinas de las válvulas direccionales, este montaje nos proveen de una respuesta instantánea del paro de seguridad del péndulo invertido.

- **Potenciometro lineal.** El potenciómetro es el sensor de posicionamiento del péndulo invertido, entre sus características mas notorias es la de su cambio de resistencia que es lineal al movimiento rotacional del péndulo, y además es un elemento electromecánico compuesto por un eje y una laminilla que se desplaza sobre una canaleta de metal, ocasionando una variación en la resistencia de salida, por consiguiente hasta en los casos mas extremos como la perdida de

alimentación de los elementos electrónicos no requiere de memorias externas para el almacenamiento de la posición del péndulo, siendo esta la mejor ventaja de estos Sensores.

El potenciómetro consta de tres pines, dos de alimentación que tendrá diferentes valores de tensión para cada uno de los sistemas de adquisición de datos propuestos, y otro pin de señal encargado de sensar la posición del péndulo por medio de la variación de la resistencia interna del mismo, esta transición se grafica en tiempo real, facilitado el análisis de la respuesta del sistema. Las características físicas del elemento están incorporadas al final del trabajo, es decir, en los anexos.

- **Prototipo físico.** Concluido todos los pasos para la elaboración del proyecto, se procede a reunir e instalar el modulo mecánico, el modulo de control y el modulo electrónico para poder plasmar el prototipo final del péndulo invertido. Finalizado el montaje se elaboran las pruebas para determinar si es necesario complementar o corregir las deficiencias del péndulo.

Los objetivos mas específicos de las pruebas son comparar los datos teóricos obtenidos de las ecuaciones, y los datos recogidos en las lecturas de los manómetros de presión en el área del vástago, esta presión es la necesaria para romper la inercia del péndulo en su posición mas critica a 37° con respecto de la horizontal, además se debe hallar el grado de error del ángulo sensado del péndulo con el ángulo deseado.

3. CONSTRUCCIÓN DE PIEZAS

3.1 CONSTRUCCIÓN DEL DISEÑO MECÁNICO

Foto 2. Modelo físico



Fuente: Autor

Con el prototipo virtual listo se procede a plasmar el péndulo invertido teniendo en cuenta los siguientes pasos para su elaboración: Se escogieron **Los Materiales** según la necesidad del esfuerzo al cual están sometidos, se construyó la mayoría de las piezas del péndulo en acero 1020 para disminuir costos, sin afectar la resistencia del prototipo, algunas piezas se encuentran sometidas a esfuerzos considerables que obligan la utilización de un acero 1045, como son el ancla del péndulo, el cubo que liga el actuador con el eje de la base y los soportes de seguridad que absorben y resisten la carga de impacto. La base del péndulo es de acero estructural y esta recubierta de un galvanizado que evita la corrosión, por lo

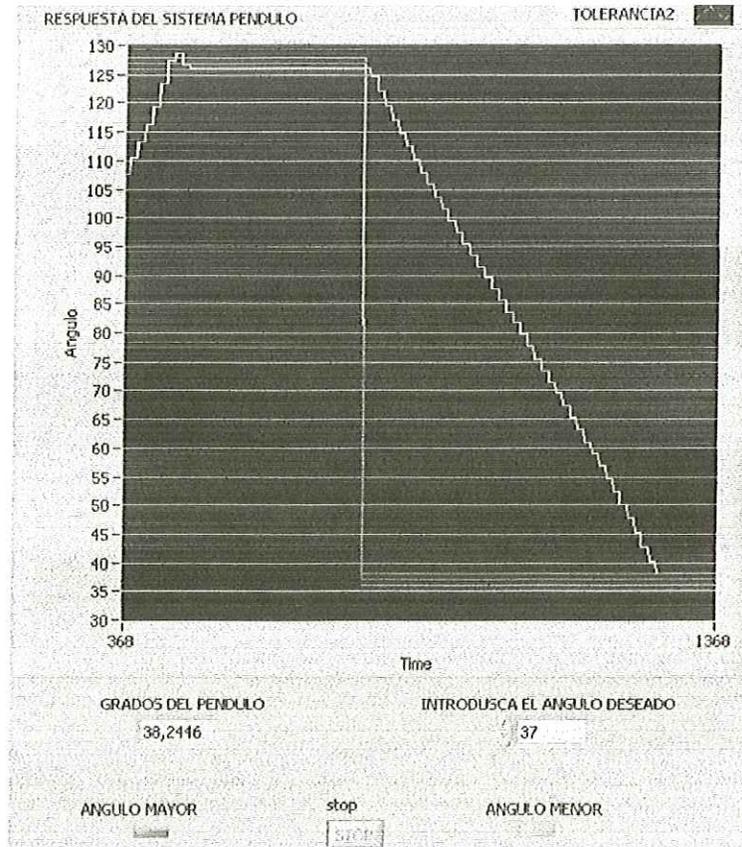
tanto este acabado superficial no es muy estético prefiriendo revestir el perfil con pintura para maquinaria en contacto abrasivo.

El Maquinado de las piezas se realizó conforme a lo previsto en el prototipo virtual, sólo algunas piezas se reemplazaron; una de ellas fue el anclaje que guinda el vástago del actuador con la barra del péndulo, por un elemento con una geometría diferente mejorando su resistencia, aumentando el peso en una proporción no muy elevada; debido a que su geometría elevaba los costos en la mano de obra del maquinado. Otra pieza que sufrió un cambio en la estructura final, son los perfiles cuadrados de los soportes de seguridad del prototipo virtual, ya que se construyó con material circular, es decir, con los suministros existentes en el comercio.

Se maquinó el cubo que está guindado al actuador a través de unos espárragos de 70cm de longitud, proporcionando el ajuste necesario entre los elementos, por lo tanto evita que se generen fugas de aceite hidráulico. **Los acoples** son los elementos que facilitan el desensamble de las piezas, los componentes utilizados fueron: pernos ($3/4''$, $1/2''$, $7/16''$) con sus respectivas tuercas, el anclaje del actuador con la barra del péndulo y los chazos $1/2''$ utilizados para ligar la base a la placa de concreto. **Las soldaduras** sólo se aplicaron a la base y la barra del péndulo, están soldadas con w-18, soldadura de alta rigidez. **La placa de hormigón** de dimensiones de 250cmx50cmx12cm, se fundió en conjunto con una rejilla metálica que incrementa la resistencia última a la compresión ($f_{ck}=2130\text{psi}$), este valor puede ser asumido considerando que la placa está totalmente comprimida. **El circuito hidráulico** montado tiene como finalidad, la retención de la carga en cualquier instante de tiempo, esta detención del movimiento angular del péndulo es posible por las válvulas contrabalance, encargadas de la suspensión del peso y la retención del aceite en el actuador del lado que se ejerce la fuerza.

3.2 CONSTRUCCIÓN INTERFASES VISUALES

Foto 3. La interfase grafica de labview

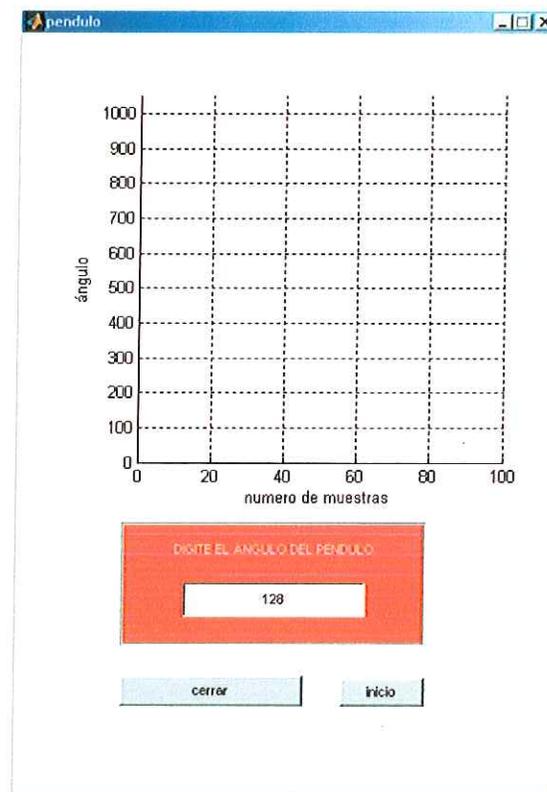


Fuente: Autor

La interfase visual de labview consta de una ventana que grafica: la señal del Sensor que corresponde a la escalera blanca, el setpoint que es la línea roja y dos franjas paralelas al setpoint que corresponden a la tolerancia del error, además la parte grafica (respuesta del sistema) esta acompañada de un visualizador digital encargado de mostrar el ángulo final o los valores que se van obteniendo del ángulo sensado en tiempo real, asimismo la ventana grafica esta compuesta por un rango de valores en el eje vertical de 30° a 127°, en el eje horizontal o tiempo de la muestra de 0-1000 y por ultimo de un trazado horizontal paralelo al setpoint.

En el visualizador consta de un edit button, es donde el usuario fija el setpoint, este valor no debe exceder ni aminorar el rango permitido para el ángulo del péndulo, debido a esto se programo el indicador para que trabaje en el rango indicado, ya que aporta seguridad para las bobinas de la válvula direccional y para el vástago del actuador. Para finalizar se observa dos iconos que representan el estado de las bobinas encendidas o apagadas, esta es la salida activa o desactiva del field point, es decir, el icono encenderá indicando que la bobina de la válvula direccional esta activa.

Figura 89. La interfase grafica de matlab



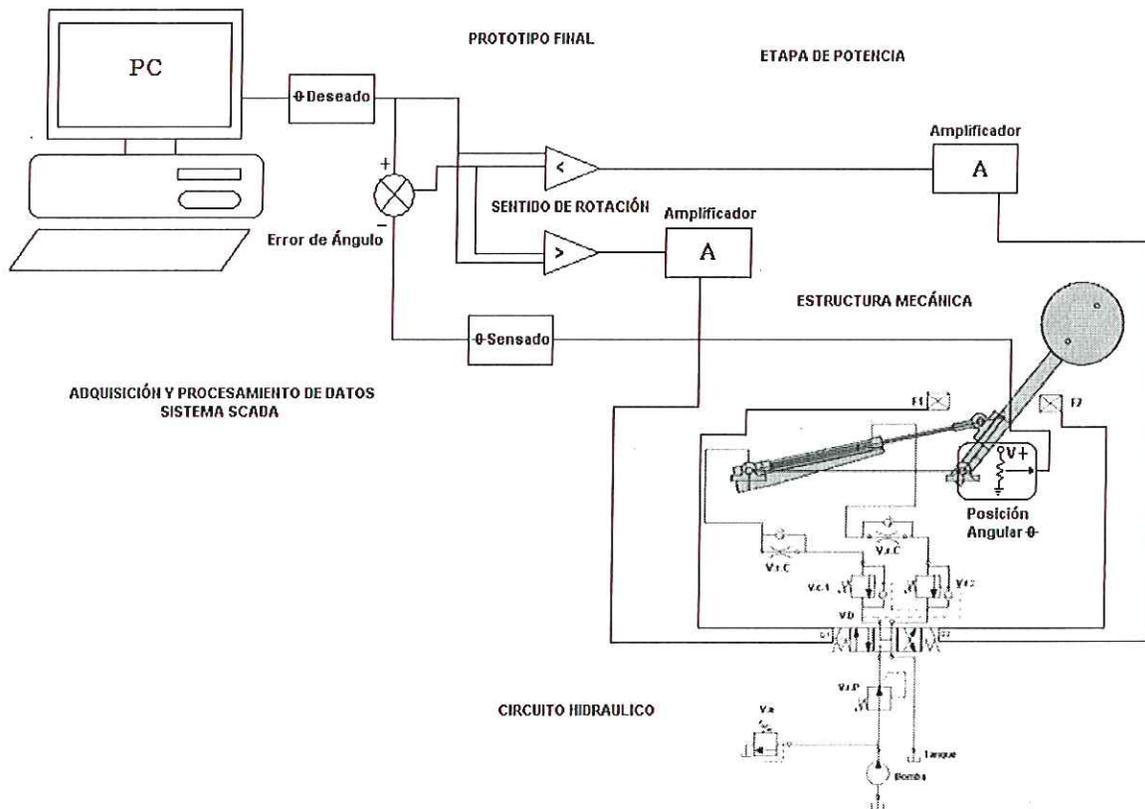
Fuente: Autor

El visualizador grafico de matlab contiene un rango de 30° a 127° en el eje vertical, el tiempo de muestreo en el eje horizontal, y un enmallado dentro de la grafica. A

la interfase visual se le agrego un edit button y push button, donde se digita la posición deseada y el inicio del programa respectivamente.

3.3 UNIFICACIÓN DE ETAPAS

Figura 90. Enlace de etapas de control, potencia con el modelo mecánico.



Fuente: Autor

Desarrollada cada etapa de la metodología del diseño mecatrónico se procede a la conexión de todos los sistemas, se ensambla cada elemento que compone al prototipo físico, se guinda sus acoples respectivos sobre la placa de hormigón de sujeción, y por último se instalan los finales de carrera, aportando la seguridad del sistema, después de ello se procede a realizar una prueba de movimiento y de interferencia entre piezas, con el circuito de contactores eléctricos implementado

para el mando manual hidráulico; a continuación se monta la fase de potencia con los modulo de Bosch, encargados de la alimentación del los solenoides de la válvula direccional, dichos módulos son activados por la fase de control, ya sea por los field Point y/o el PLC: en el montaje de control se utilizaron 3 módulos de Field Point (entrada análoga, salida análoga y el de salidas discretas) encargado de conmutar la posición del péndulo, esto es posible por que se encuentra implementado en dos modalidades: una como sistema de control unitario y la otra como instrumento de supervisión en cascada con el PLC, este ultimo toma las decisiones de control.

Foto 4. Módulos de control



Fuente: Autor

El PLC consta de dos entradas análogas que corresponde a la variable sensada y al setpoint respectivamente, estas variables son las comparadas para enviar una señal por alguna de las dos salidas discretas.

Foto 5. Prototipo físico.



Fuente: Autor

Como se observa en la foto se detalla el conjunto del sistema, que se encuentra monitoreado por un PC programado con un software (labview o matlab) visualiza y envía señales, esto es posible por un cable serial RS232, que conecta los módulos de field Point o la tarjeta de adquisición de datos.

3.4 UBICACIÓN DEL PÉNDULO INVERTIDO

Foto 6. Ubicación del péndulo invertido



Fuente: Autor

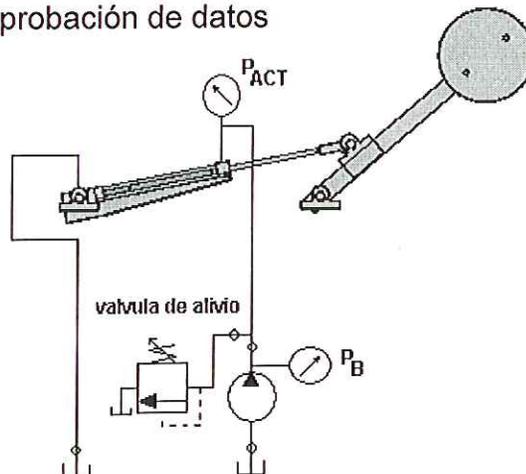
La ubicación del péndulo invertido específicamente en el laboratorio de oleoneumática, es la mostrada en el plano anexo al trabajo, descrita por un rectángulo delineado en el fondo del recinto, dicha posición se escogió por que las mangueras hidráulicas con acoples rápidos son cortas, por lo tanto ocasiona que el prototipo mecánico este cerca del banco de practicas nº2, que posee la mejor característica de la bomba hidráulica entre todos los bancos de trabajo, y para el cual fue diseñado el circuito hidráulico con la presión de la bomba y el caudal de la misma.

4. PRUEBAS

4.1 COMPROBACIÓN DE DATOS TEORICOS CON LOS PRACTICOS

Unos de los objetivos planteados es la comparación del valor teórico de la fuerza del actuador que resulta de las ecuaciones de momento que rigen el péndulo, con los valores prácticos o reales que se hallan en el montaje de un circuito hidráulico que permite observar la presión manométrica en el actuador requerida para romper el estado de reposo del péndulo.

Figura 91. Circuito de comprobación de datos



Fuente: Autor

El circuito hidráulico requerido para la lectura de la presión es el de la figura 94 , consta de una válvula de alivio que me permite tarar gradualmente la presión del sistema, hasta que sea necesario para vencer la inercia, en ese preciso momento se procede a leer la presión en el manómetro de la bomba y en el actuador.

Debido al análisis de carga en el actuador se comprobó que la presión necesaria para generar un movimiento en un extremo del péndulo a 37° , fue de 45 bar en el manómetro de la bomba del sistema y 42.3 bar en el manómetro puesto en el

actuador (lado vástago), en la lectura de la presión de bomba están agregadas las pérdidas que aproximadamente son 2.5 bar, estas pérdidas son ocasionadas por los acoples rápidos de los conectores, la válvula de alivio y las mangueras.

En conclusión se comprueba que el dato de la presión del actuador no difiere considerablemente al valor teórico.

4.2 ANÁLISIS DEL ERROR DEL ÁNGULO

Enlazadas las tres etapas (PC-tarjeta de adquisición de datos-PLC) se procedió a visualizar los datos sensados, es decir, la posición en que se encuentra el péndulo en el transcurso del tiempo, en esta grafica se observo que la señal contenía mucho ruido y además el péndulo no se posicionaba en el ángulo deseado, ya que ocurría una pérdida de tensión a la salida de la red escalera, ocasionada por la diferencia de inductancias de la tarjeta de adquisición de datos con la del PLC, por lo tanto se monto un seguidor de tensión en serie con el conversor DAC, que permitió estabilizar la señal de entrada al PLC.

En los datos graficados persistía un ruido, que se disminuyo con un filtro a la entrada del PIC, pero aun así se hallaron oscilaciones de 11 bits en la variable que recibe los datos sensados, por tal motivo se concluyo que el rango del conversor ADC de 10 bits de 1024 posibles valores digitalizados, que posee internamente es muy pequeño, y sumado a esto la baja resolución de $4.88e - 0.3Volts/Vd$ ocasionando que el conversor sea vulnerable a pequeños cambios de voltaje, por lo tanto las oscilaciones de 11 bits se ven reflejadas en el aumento de la tolerancia del ángulo de posicionamiento del péndulo, es decir, el posible grado de error corresponde a $\pm 2.8^\circ$, en los Field Point se tiene un grado de error de $\pm 0.8^\circ$ por que consta de un conversor análogo digital de 12 bits y además cuenta con un paso de $6.747e-03V$ por cada grado.

Tabla 4. Mínimo grado de error del péndulo

Elemento utilizado	Rango del péndulo °	Rango de valores digitalizados "vd"	Resolución %vd	Oscilación en valores digitalizados "vd"	Grado de error del péndulo °
PIC 16F877	90	341.33	0.2636	11	2.89
PLC S-300	90	5712	0.01575	16	0.252

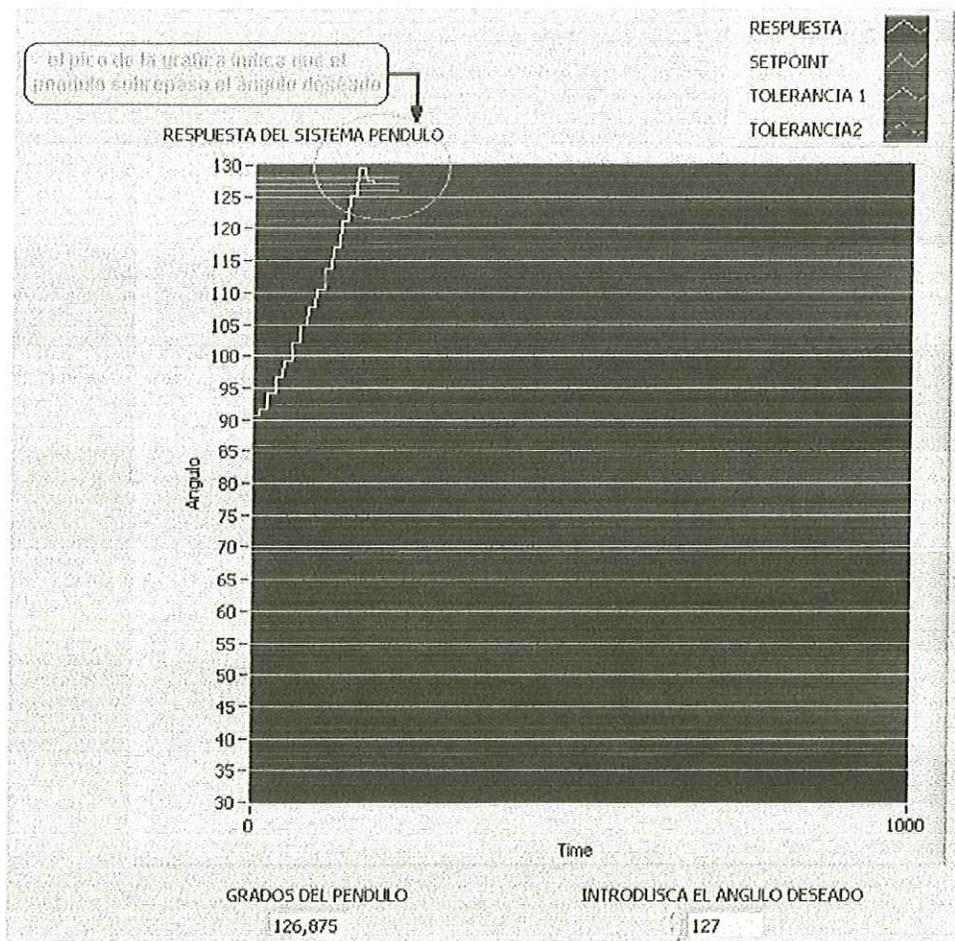
Fuente: Autor

4.3 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Para dar un juicio certero de las ventajas y desventajas de los dispositivos implementados se analiza la respuesta del péndulo que depende del muestreo y procesamiento de datos, además se toma en cuenta la tolerancia mínima del ángulo deseado.

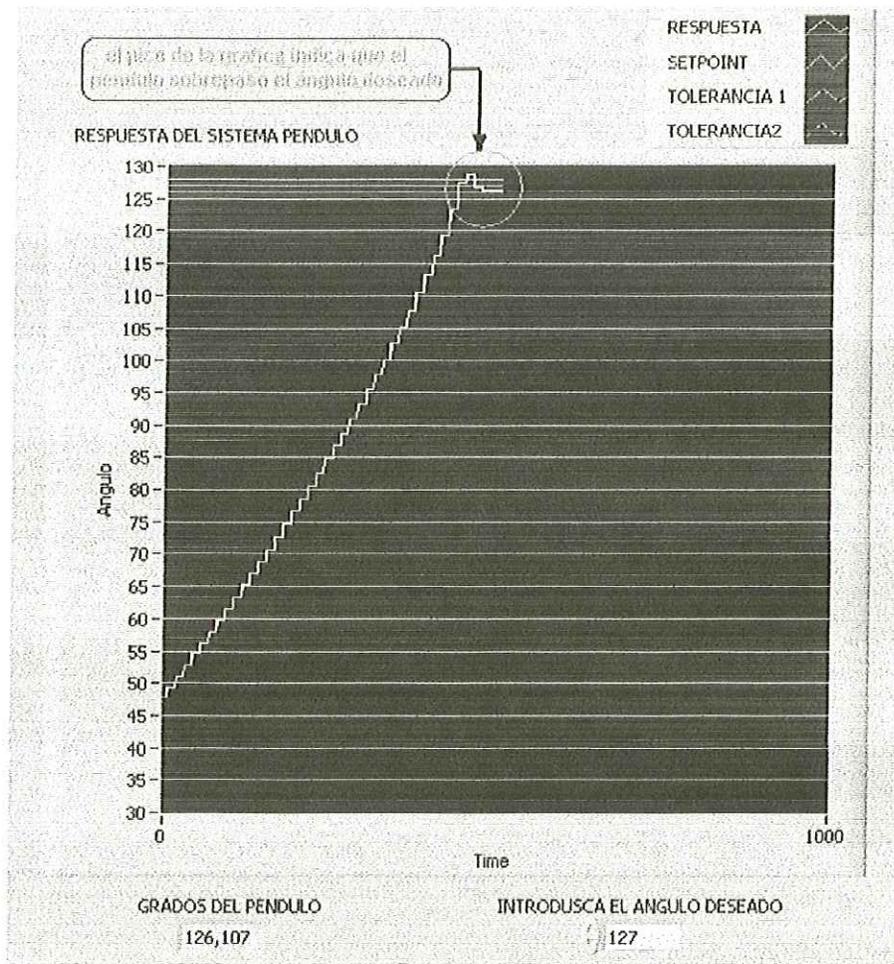
4.4.1 Señales de respuesta de LABVIEW con los FIELD POINT. En las siguientes figuras se observa la respuesta de los dos sistemas de control, que tienen la misma interfase visual en labview, pero distinto sistema de adquisición de datos; la primera etapa son los módulos field point que reciben la señal sensada y procesan datos para cumplir con toda la etapa de control, la segunda etapa esta compuesta por los módulos de field point que aportan la señal del setpoint y los PLC en el procesamiento de datos y toma de decisiones.

Figura 92. Primera respuesta de control con labview



Fuente: Autor

Figura 93. Segunda respuesta de control con labview



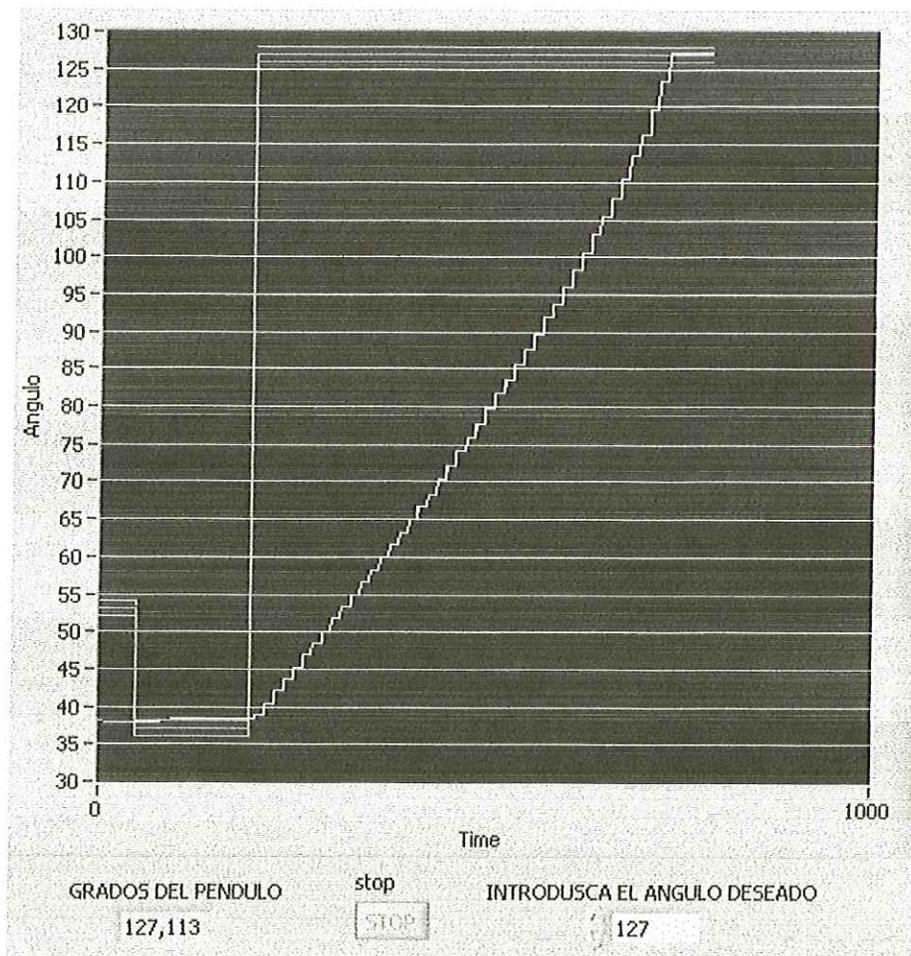
Fuente: Autor

Se concluye que la primera etapa tiene un retardo en el envío de la señal de control como se observa en el círculo rojo de la figura, por consiguiente ocasiona que el ángulo deseado del péndulo no se estabilice rápidamente, todo lo contrario sucede con el PLC, tiene un grado de error muy pequeño de $\pm 0.3^\circ$ con el ángulo deseado, que se comprueba en las graficas de respuesta del sistema, esta rápida respuesta es debido a la resolución del conversor análogo digital de 16 bits y

consta de un procesador independiente para la evaluación de los datos y toma de decisiones.

4.4.2 Señales de respuesta de FIELD POINT con el PLC

Figura 94. Respuesta de control del PLC con labviewn



Fuente: Autor

El muestreo del PLC es casi instantáneo comparado con lo que ocurre en la primera etapa, que el tiempo de respuesta es lento causando tolerancias mínimas de un 1° de error que no son aceptables en el control ON-OFF del péndulo.

CONCLUSIONES

El prototipo final funciona en los ángulos para los que fue diseñado sin ninguna interferencia.

Se comprobaron los valores obtenidos por las ecuaciones dinámicas con la lectura del manómetro de presión, que difieren en 0.02 bar.

Se concluyo que el PLC es el dispositivo mas adecuado para controles que requieren una respuesta instantánea, por que consta de un procesador de datos independiente y un conversor ADC de 16bits.

Se determino que labview es un software muy bueno en el diseño de las interfaces graficas, y además esto en conjunto con los field point conforman un adecuado sistema de supervisión.

Se estableció la tolerancia de error del ángulo deseado: $\pm 0.254^\circ$ para el PLC, $\pm 2.8^\circ$ para la tarjeta del microcontrolador y $\pm 0.8^\circ$ para labview, por lo tanto se concluye que el PLC es el elemento mas preciso para la posición angular del péndulo.

Siempre se debe tener en cuenta el desarrollo de una Metodología, que es de gran importancia a la hora de elaborar un proyecto, en el presente texto se llevo a cabo una metodología del diseño Mecátronico, por que se tuvo en cuenta factores como movimiento rotacional, resistencia de las piezas, control angular y reducción de costos del mismo, por lo tanto fue muy útil en el momento de plasmar el péndulo.

Se concluyo que los programas CAD-CAE utilizados para el diseño y la simulación de estructuras, son la base para construir un modelo mecánico, teniendo presente

que estos software permiten la elaboración de prototipos virtuales cuantas veces sea necesario, por lo cual es mas fácil elegir una estructura fiable y además cuantificar el costo del proyecto.

RECOMENDACIONES

En el péndulo invertido se puede aplicar un control de posicionamiento rápido mediante un swicheo en los solenoides de la válvula direccional o con una válvula proporcional, ya que ocasionan una rápida respuesta del sistema debido a la variación de la velocidad del vástago del actuador, estos planteamientos son sistemas de control proporcional que se pueden realizar a un futuro no muy lejano.

En la actualidad el laboratorio de automatización industrial de la UNAB, no cuenta con un software que permita visualizar procesos mecánicos, químicos, electrónicos, y a su vez transmitir datos con el PLC por medio del puerto de comunicación MPI, basado en esta necesidad se recomienda la adquisición del programa WINCC, para el desarrollo de practicas de control automático o proporcional.

BIBLIOGRAFIA

FERDINAND P. Beer; E. Russell Mecánica de materiales Mc Graw Hill 1993

FERDINAND P. Beer; E. Russell Mecánica vectorial para ingenieros Dinamica Mc Graw Hill 2000

FERDINAND P. Beer; E. Russell Mecánica vectorial para ingenieros Estatica Mc Graw Hill 1999

http://home.wxs.nl/~brink494/balklep_e.htm

http://www.walter-fendt.de/ph11s/pendulum_s.htm

KATSIUKO Ogata. Control Moderno. Pentice Hall, 1998.

MILLS D. S., *The physical pendulum: A computer-augmented laboratory exercise*. Am. J. Phys. 48 (4) April 1980, pp. 314-316

PAUL H. Lewis; Chang Yang. Sistemas de Control en Ingenieria. Editorial Prentice Hall. 1999.

ROBERT L. Mott, P.E. Diseño de Elementos de Maquinas 2ª Edición. Editorial Prentice Hall. 1992.

ANEXOS

Anexo A. Programa De Matlab

- Programa de guide

```
function varargout = pendulo(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @pendulo_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @pendulo_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [] , ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
function pendulo_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
%=====
axes(handles.axes1)
axis([0 100 0 1050]);
xlabel('numero de muestras');
ylabel('ángulo');
grid on;
%=====
function varargout = pendulo_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
%=====
close all
%=====
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
%=====
pe=str2num(get(handles.edit1,'String'));

enviar(pe);
setpoint=round(0.838565482171+4.01173901454*pe)

[recibido,s]=seri(4,setpoint);
```

- Función enviar

```
function enviar(dato)
```

```
numchart=3;  
s=serial('COM3','BaudRate',9600,'DataBits',8);  
set(s,'OutputBufferSize',numchart);  
fopen(s);  
fprintf(s,'%03d',dato);  
fclose(s);
```

- Función recibir

```
function [recibido,s]=seri(numbits,setpoint)
```

```
s=serial('COM3','BaudRate',9600,'DataBits',8);  
set(s,'InputBufferSize',numbits)
```

```
n=1;  
x=1;  
a=50;  
fre=ones(1,101)*setpoint;  
xfre=0:100;  
errorpo=ones(1,101)*(setpoint+15);  
errorne=ones(1,101)*(setpoint-15);  
plot(xfre,fre,'r',xfre,errorpo,'c--',xfre,errorne,'c--')  
hold on
```

```
while a<=-15 | a>=15
```

```
    if n<=100
```

```
        fopen(s);  
        reci=fgets(s);  
        y(n)=str2double(reci)  
        X(n)=x;  
        recibido=y;  
        plot(X,y);  
        axis([0 100 0 1050]);  
        grid on;  
        n=n+1;  
        x=x+1;  
        fclose(s)  
        pause(0.125)
```

```
    else
```

```
        fopen(s);  
        reci=fgets(s);  
        y(n)=str2double(reci);  
        X(n)=x;  
        recibido=y;  
        plot(X(n-99:n),y(n-99:n));  
        axis([n-99 n 0 1050]);  
        grid on;  
        n=n+1;
```

```
        x=x+1;
        fclose(s)
        pause(0.125)
    end
    a=setpoint-y(n-1)
end

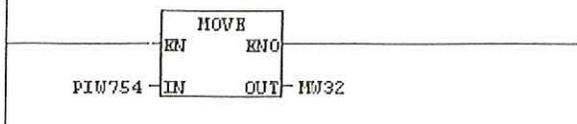
for i=1:4
    fopen(s);
    reci=fgets(s);
    y(n)=str2double(reci);
    X(n)=x;
    recibido=y;
    plot(X,y);
    axis([0 100 0 1050]);
    grid on;
    n=n+1;
    x=x+1;
    fclose(s)
    pause(0.125)
end

hold off
```

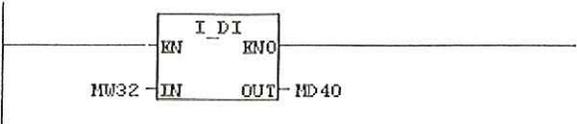

Anexo C. Programa del PLC

Bloque: 0B1 "sistema de control on-off del pendulo invertido"

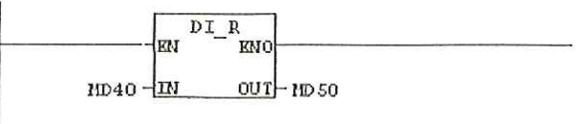
Segm.: 1



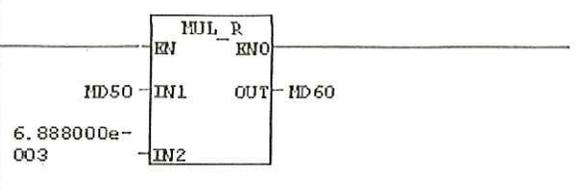
Segm.: 2



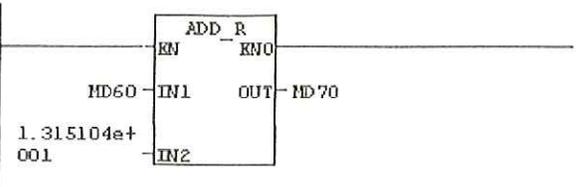
Segm.: 3



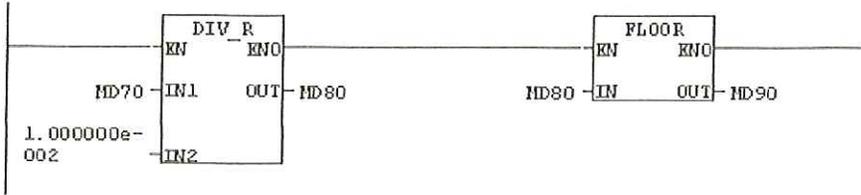
Segm.: 4



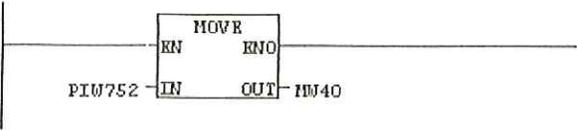
Segm.: 5 MD70 ángulo sensado



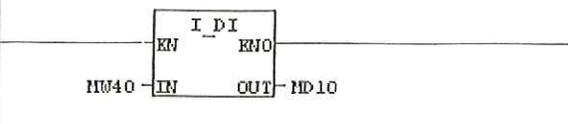
Segm.: 6



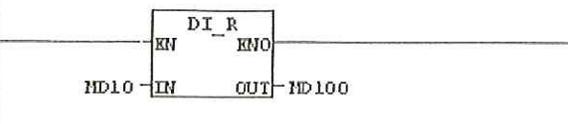
Segm.: 7



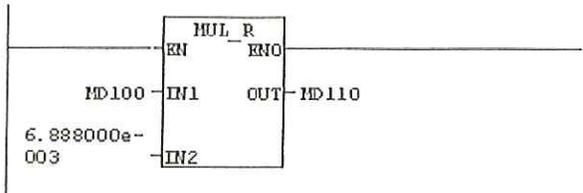
Segm.: 8



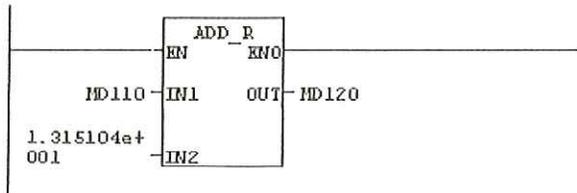
Segm.: 9



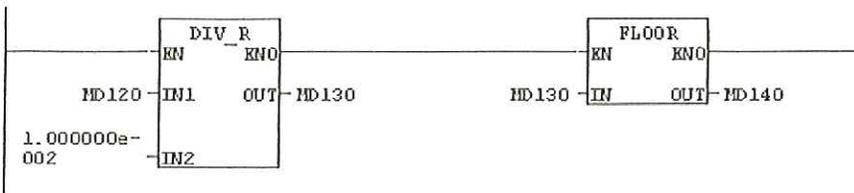
Segm.: 10



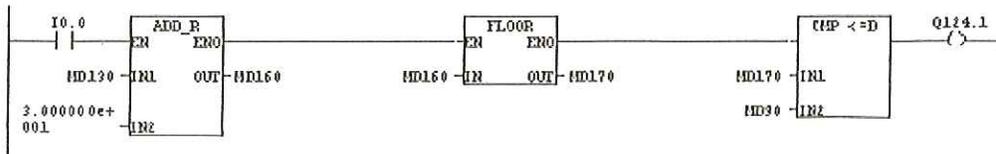
Segm.: 11 MD120 ángulo deseado o setpoint
 Ángulo



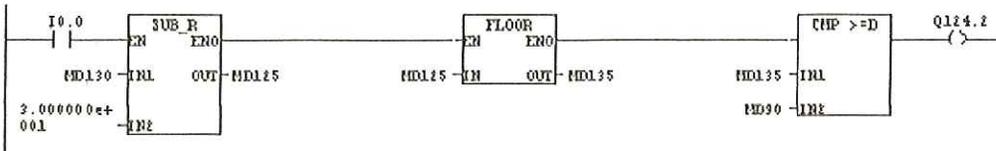
Segm.: 12



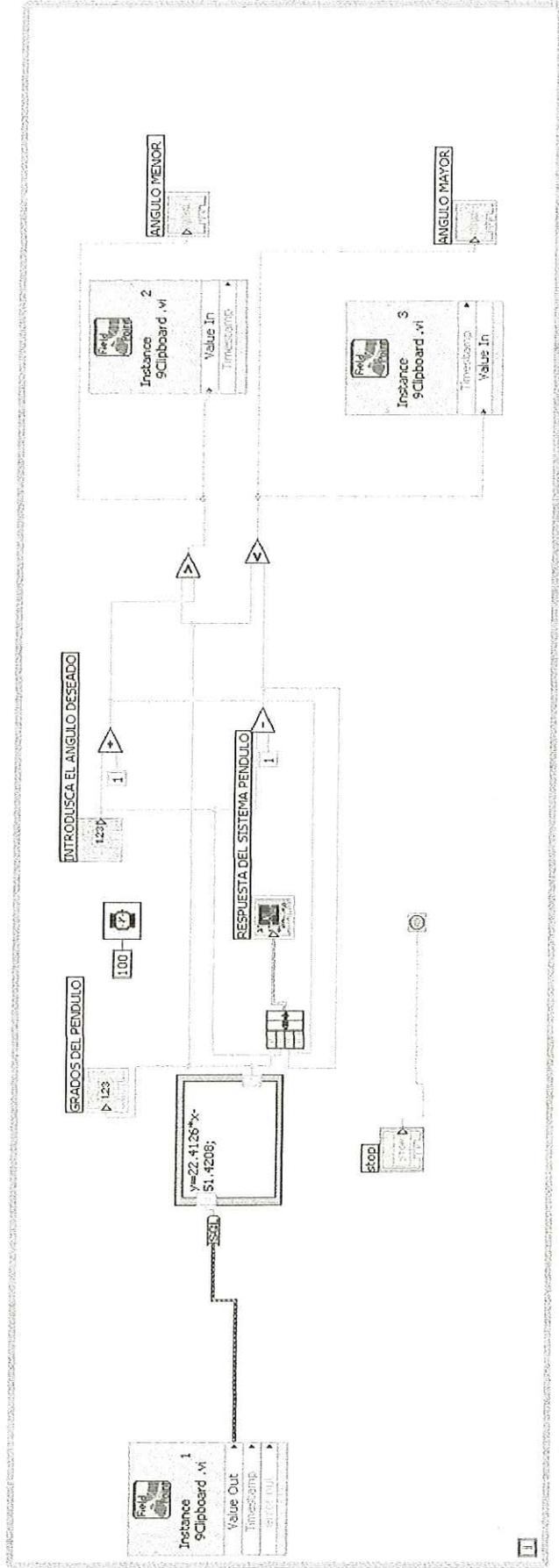
Segm.: 13 el error del ángulo es +/- .3 grados



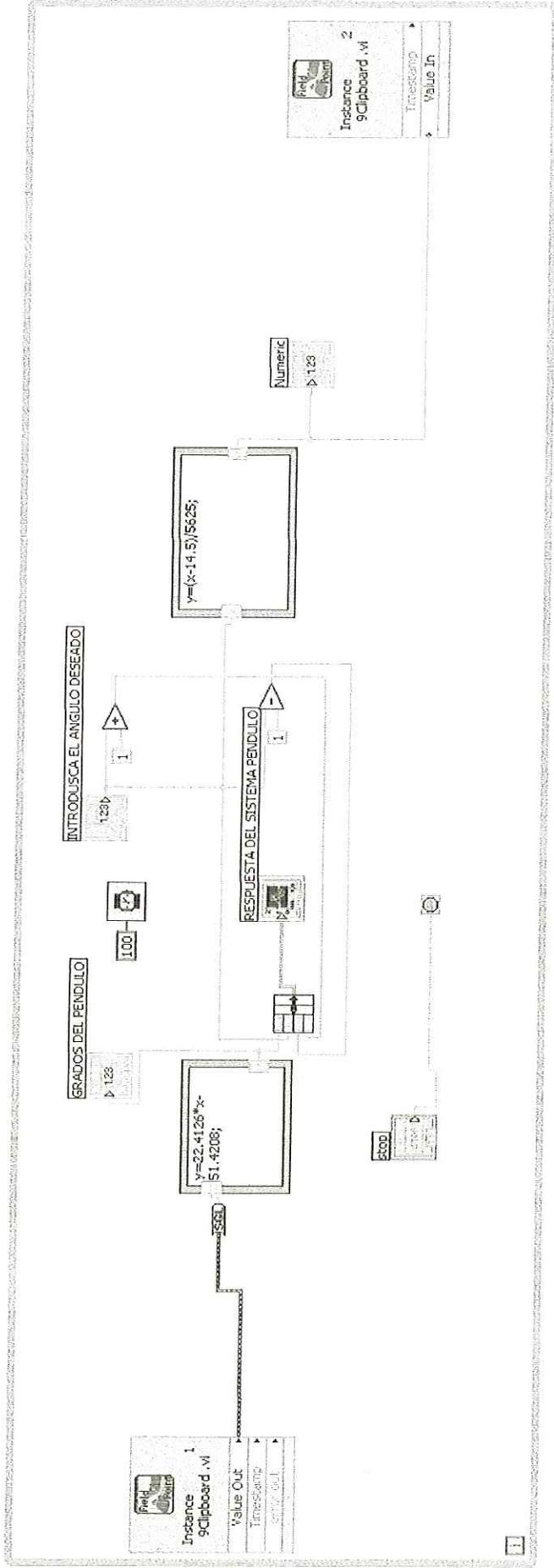
Segm.: 14 el error del ángulo es +/- .3 grados



Anexo D. Programa de control con labview



Anexo E. Programa de control del PLC con LABVIEW



Anexo F. Programa del microcontrolador

```
#include <16F877.h>
#include <stdio.h> //configura como entrada o salida automaticamente
#fuses XT,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP,PUT,BROWNOUT //configuracion de bits del micro
#use delay(clock=4000000) //velocidad del cristal
#use RS232(BAUD=9600, BITS=8, PARITY=N, XMIT=PIN_C6, RCV=PIN_C7) //comunicacion s

##device ADC=10 ;copiar esta instruccion en el 16F877.h del ccs compiler
//es para trabajar con el conversor de 10 bits

##include <LCDMIO.c> //incluye el programa para manejar el LCD

float resolucion,vref,muestra; //variables tipo flotantes
long niveles,cuan; //variables de 16 bits
char adq[4];
int i=0,valor;

#int_rda
void recibir()
{
    adq[i]=getc();
    i++;
}

void main() //comienza el programa
{
    enable_interrupts(int_rda);
    enable_interrupts(GLOBAL);

    setup_adc_ports( RA0_ANALOG ); //configuro RA0 como entrada analoga
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    vref=5;
    niveles=1024; //2 a la 10 es igual a 1024
    resolucion=vref/niveles;

    //lcd_init(); //inicializo el programa del LCD
    //lcd_gotoxy(1,1); //lcd_gotoxy(columna,fila);posiciona el cursor
    //lcd_putc("angulo="); //muestra el mensaje por el LCD

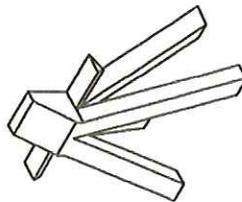
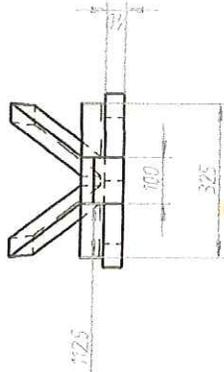
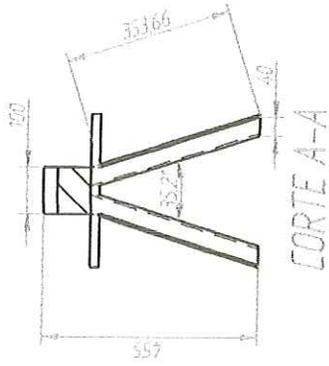
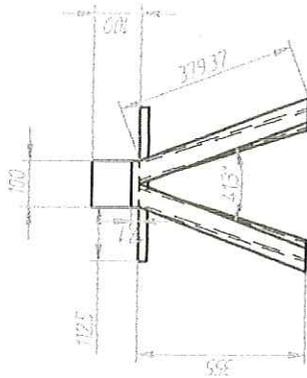
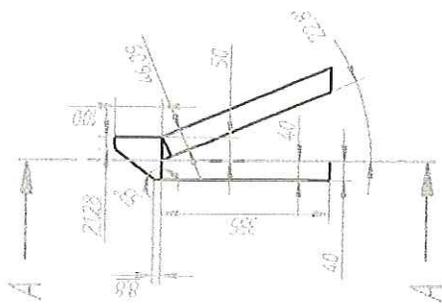
    while (TRUE)
    {
        if (i>3)
        {
            valor=(((adq[1]-48)*100)+((adq[2]-48)*10)+(adq[3]-48));
            //lcd_gotoxy(1,2);
            //lcd_putc(" ");
        }
    }
}
```

```

        //lcd_gotoxy(1,2);
        //printf(lcd_putc,"%u",valor) ;//muestra variable por el LCD
        output_b(valor);
        i=1;
    }
    set_adc_channel(0);           //selecciona el canal analogo RA0
    delay_us(10);                //demora de 10us
    muestra = read_adc();         //lee la muestra
    cuan = muestra;
    printf("%4lu",cuau);         //envio dato por el puerto serial
    delay_ms(250);               //demora de 250ms
}
}

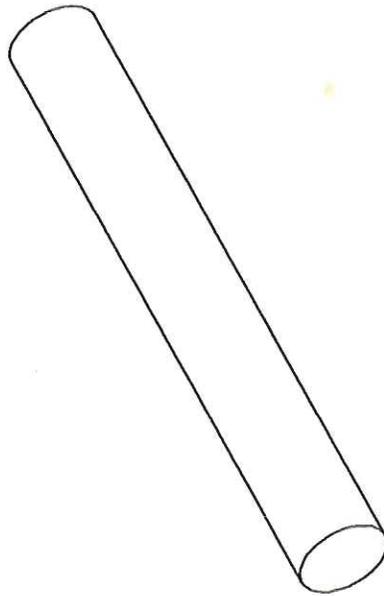
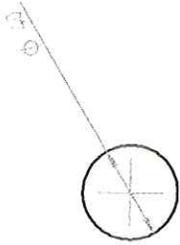
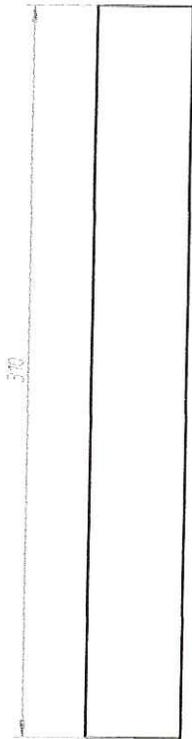
```

Anexo G. Planos de prototipo mecánico



NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: SOPORTE DE SEGURIDAD TIPO TORRE	COD:18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

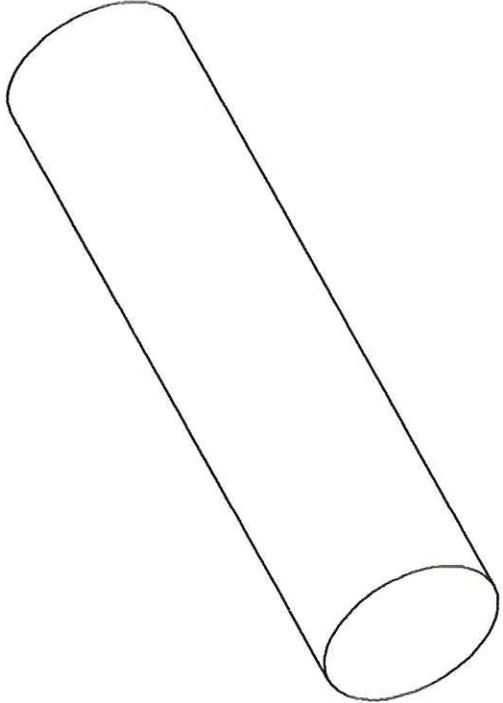
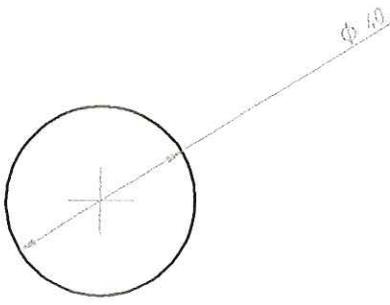
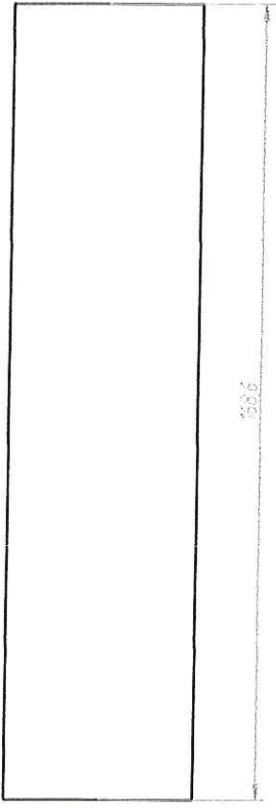
SOLO TIPO AYA TECNICO CIVIL



NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: EJE PROPULSOR	COD: 18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

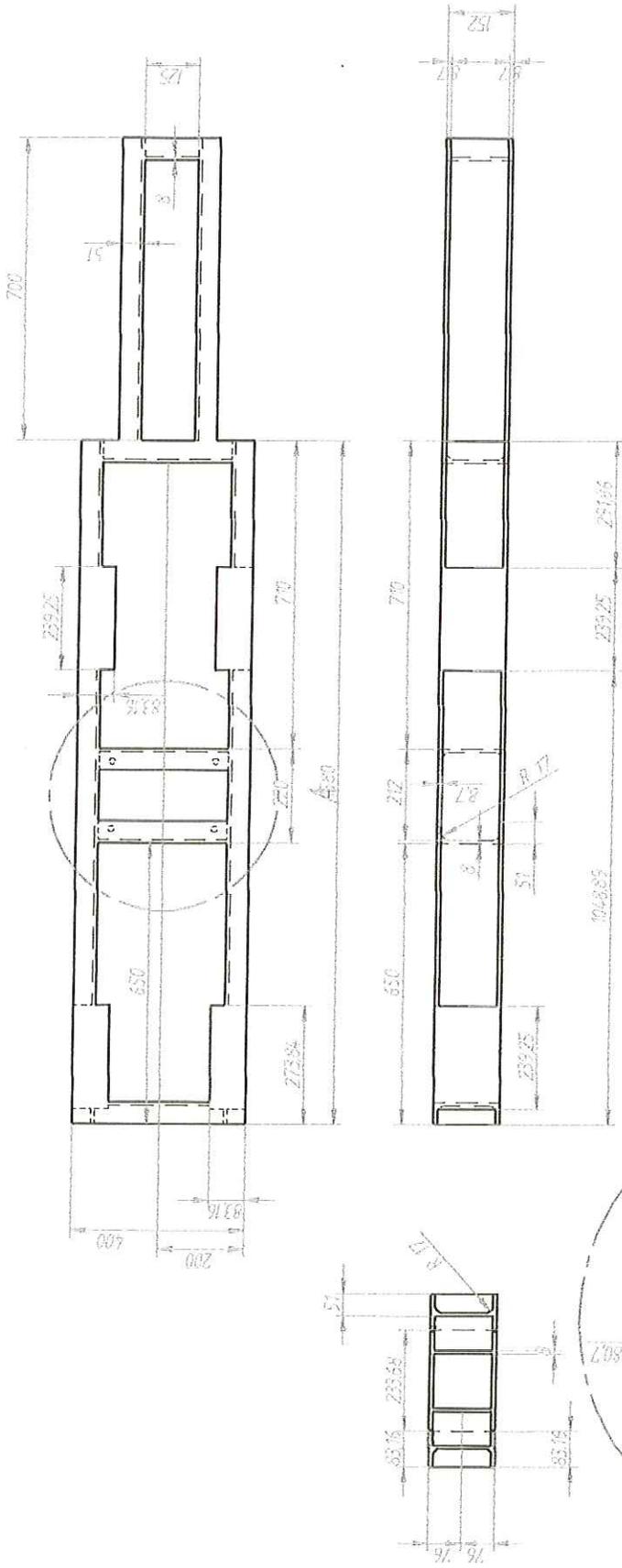
BOJIT 111123 4116 FEBRU 10 10:59 AM

Revisiones		
Rev	Descripción	Aprobado



Nombre		Fecha
Dibujado		REVISIONES
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Título		
SOLID EDGE EDS-PLM SOLUTIONS		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ± 0.5 y $\pm 1^\circ$		
Plano	Eje propulsor	Rev
AB		
Escala	Peso	Hoja 1 de 1
1:1		

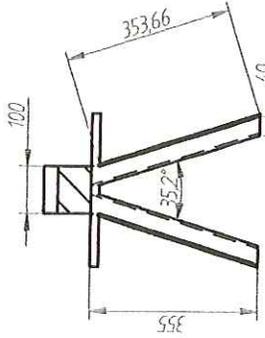
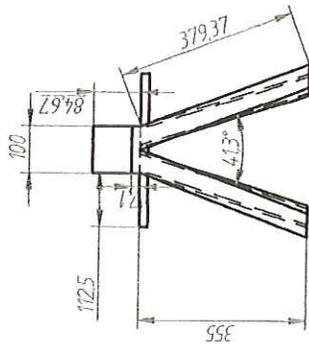
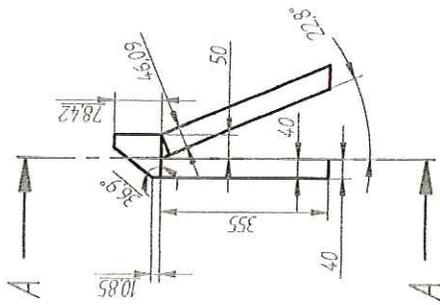
SOLID EDGE ACADEMIC COPY



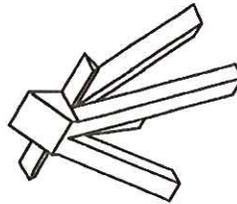
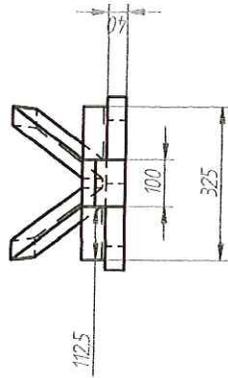
DETALLE A

NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: BASE DEL PENDULO INVERTIDO	COD:18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

COMPUTER DESIGNED BY APT ENGINEERING



CORTE A-A



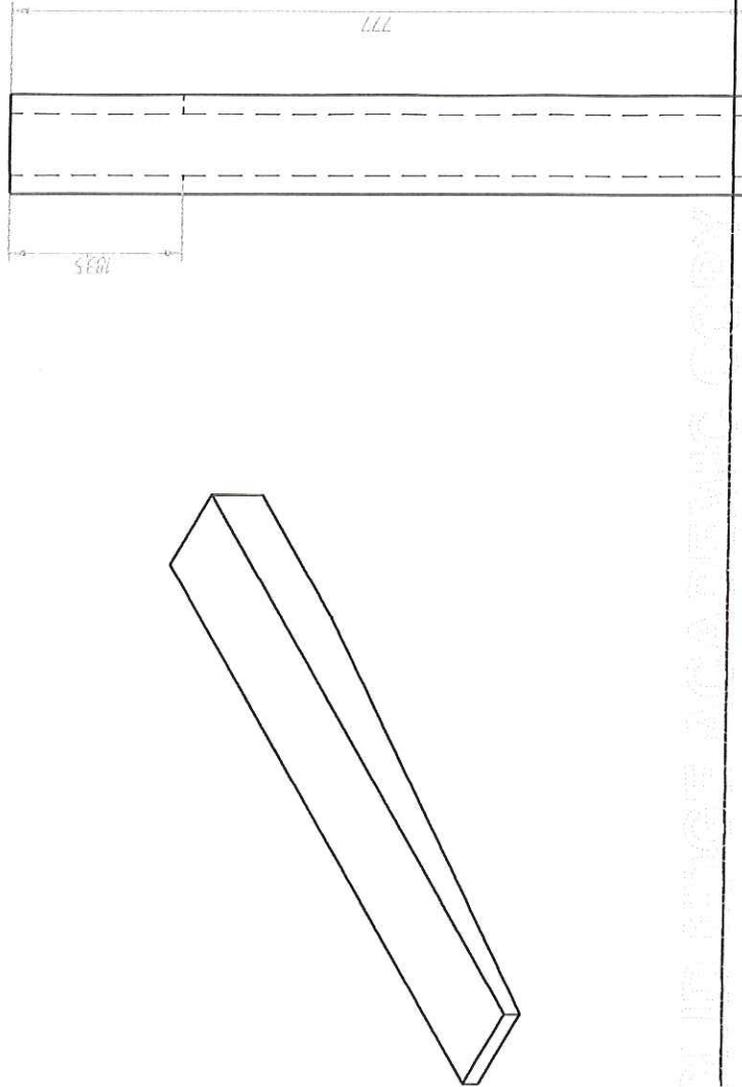
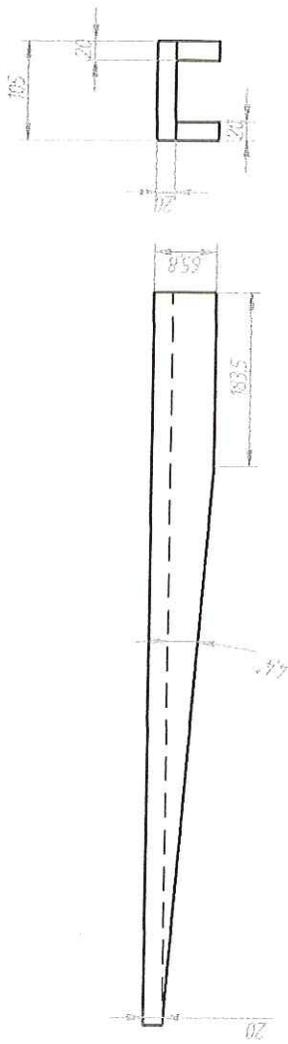
NOMBRE: REAGAN-ARBEY ARCHILA TORRES

FECHA: 16 DE MAYO 2006

TITULO: SOPORTE DE SEGURIDAD TIPO TORRE

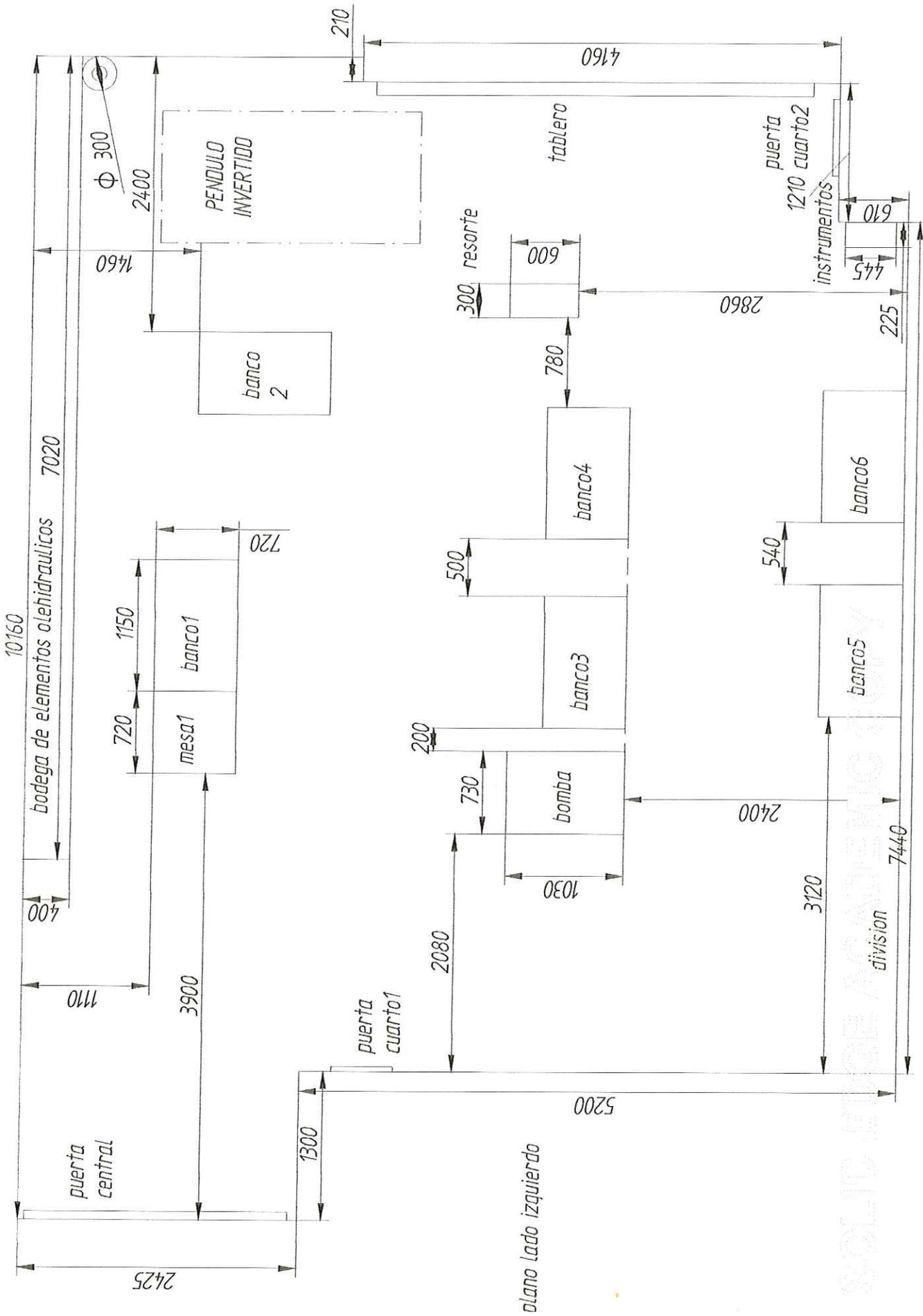
COD:18199002

PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO

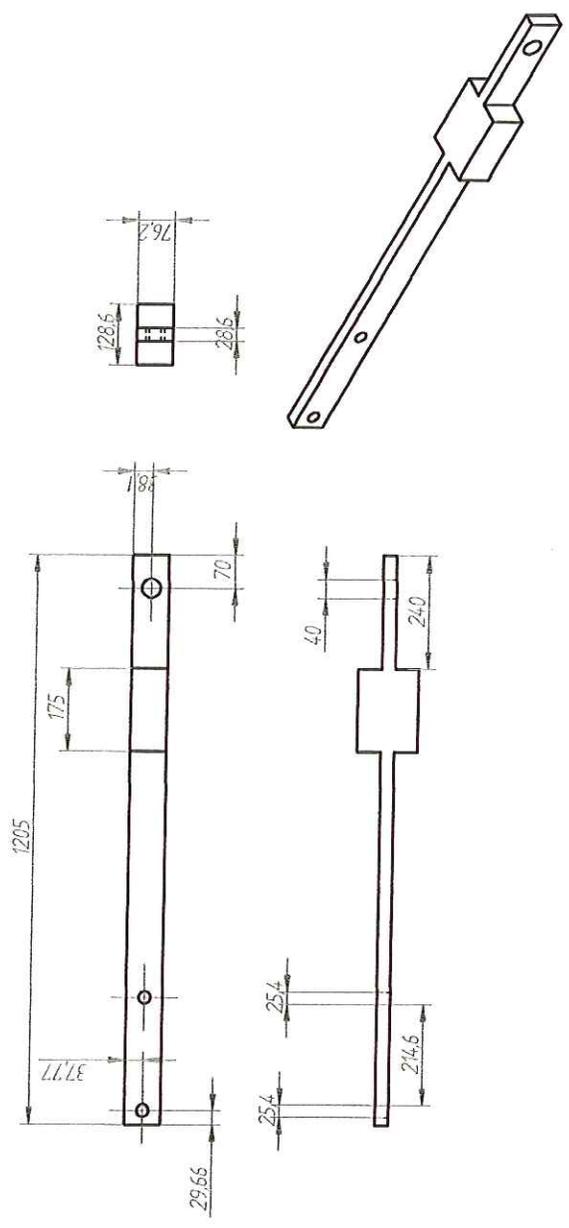


NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 15 DE MAYO 2006
TITULO: REFUERZO DEL CILINDRO	COD:18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

SOLUCIONES PARA FORTALECER

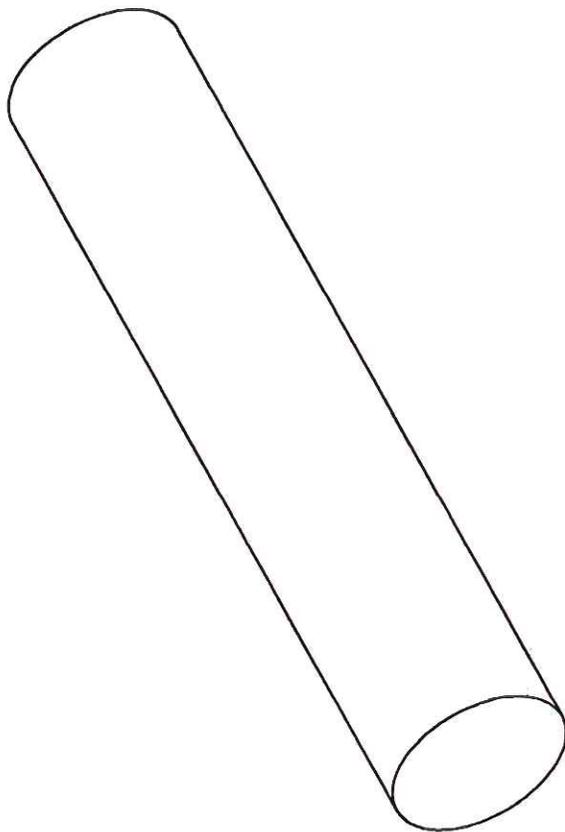
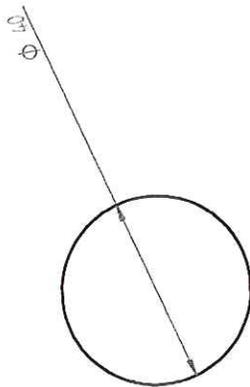
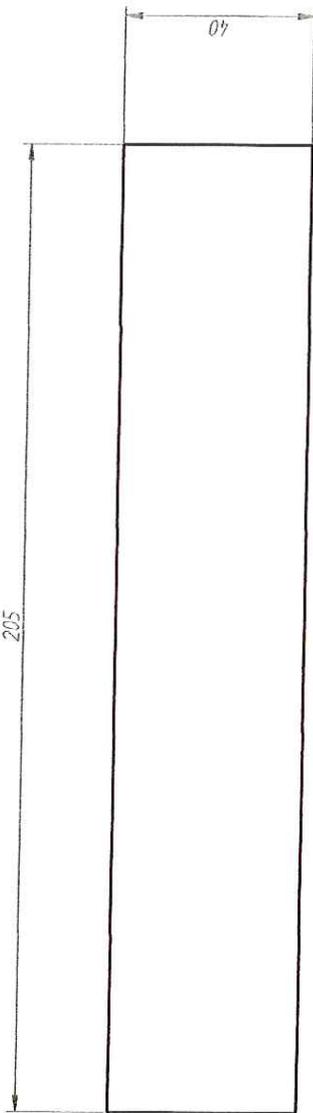


SOLID EDGE ACADEMIC 2017



NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: BARRA DEL PENDULO INVERTIDO	EOD:18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

205



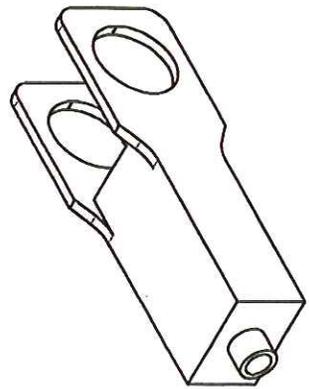
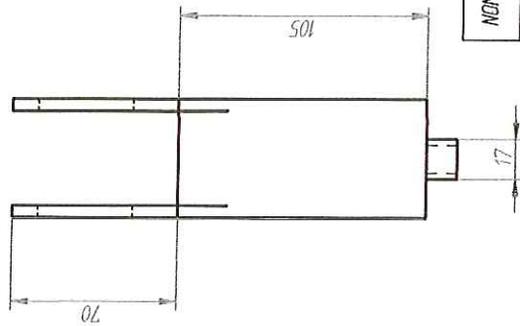
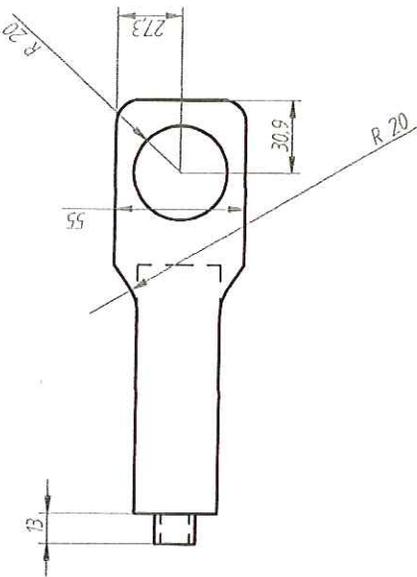
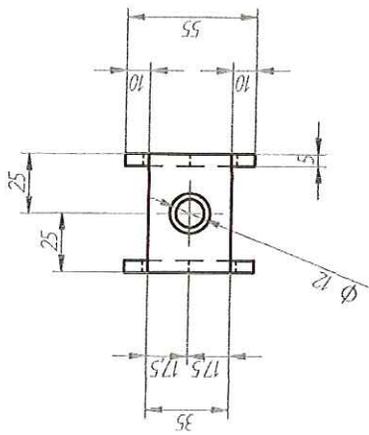
NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES

FECHA: 16 DE MAYO 2006

TITULO: EJE REFUERZO

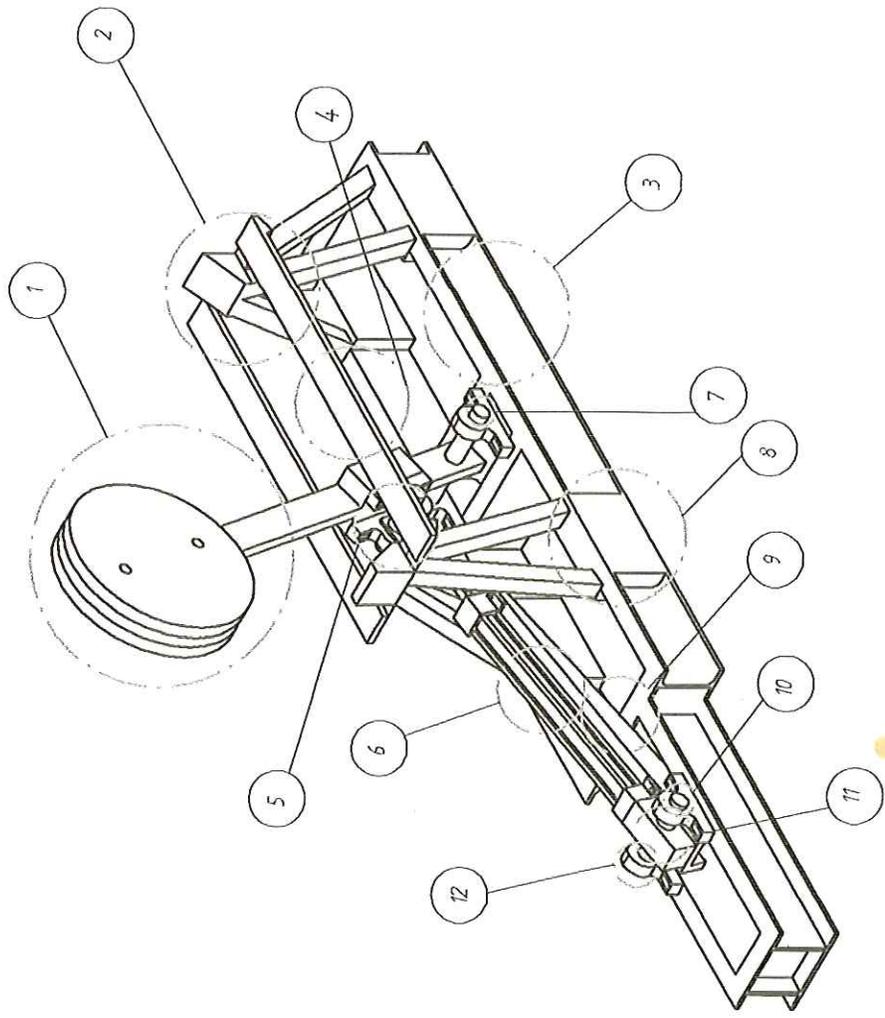
COD:18199002

PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO



NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: ANCLAJE	COD: 18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

Nº	DESCRIPCIÓN DE LA PIEZA
1	LA BARRA Y LOS DISCOS DEL PENDULO INVERTIDO
2	SOPORTES DE SEGURIDAD TIPO TORRE
3	BASE DEL PENDULO
4	BARRAS DE SEGURIDAD
5	ANCLAJE DEL VASTAGO DEL ACTUADOR
6	ACTUADOR HIDRAULICO
7	EJE DEL PENDULO
8	CAJUELAS DE REFORCE
9	SOPORTE DE REFUERZO
10	EJE DEL ACTUADOR
11	CUBO DEL ACTUADOR
12	CHUMACERAS



NOMBRE: REAGAN ARBEY ARCHILA TORRES	FECHA: 16 DE MAYO 2006
TITULO: BARRA DEL PENDULO INVERTIDO	COD:18199002
PROYECTO: IMPLEMENTACION DE UN PENDULO INVERTIDO	

SCIENTIFIC SOFTWARE COMPANY