

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL (DE
PÉNDULO INVERTIDO LINEAL) COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS,
INGENIERIA DE CONTROL Y ROBÓTICA

EDUWIN FERNEY ESPARZA CASTELLANOS

LUIS FERNANDO RUIZ PINEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL (DE
PÉNDULO INVERTIDO LINEAL) COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS,
INGENIERIA DE CONTROL Y ROBÓTICA

EDUWIN FERNEY ESPARZA CASTELLANOS

LUIS FERNANDO RUIZ PINEDA

Trabajo de grado para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Director

CARLOS BORRAS PINILLA

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de emprender este camino y por cada milagro realizado en el desarrollo de este proyecto.

A la señora María Lilia Torres Fajardo quien fue mi apoyo en los momentos difíciles, quien me enseñó que la nobleza y la fe en Dios marcan un camino directo hacia el cumplimiento de los sueños más anhelados, quien me atendió muy amablemente cada vez que la visitaba, a quien extraño cada día más.

A la señora Martha Pinzón por sus oraciones, por su confianza y buenos deseos, por su constante amabilidad, y a quien cada día admiro más por su gran fortaleza.

A mis padres Ana Lourdes Pineda y Luis Alberto Ruiz, por no escatimar esfuerzos para que sus hijos se superasen y tuvieran un futuro prometedor, por no dejarse caer en los tiempos más apremiantes y sacar adelante a sus seis hijos, por todo su amor y comprensión brindados desde la niñez.

A mis hermanos, Ludwim, Liliana, Stik, Karen, Juan Carlos y Daniel por su apoyo y buenos consejos, por compartir conmigo los momentos más extraordinarios, por tantas rizas compartidas. A Pedro María Fajardo por enseñarme que la humildad es la mejor herramienta contra las adversidades.

A mis princesitas, María paula Ruiz y Luisa Mariana Sierra, por ser mis amuletos en estos últimos días.

A mis amigos, Cesarin, Carlillos, Cali y Carolinha por compartir conmigo los mejores momentos en la universidad.

Luis Fernando Ruiz

DEDICATORIA

Al todo poderoso por darme las herramientas, salud y vida para conseguir lo que quiero con sacrificio. Él está sobre todas las cosas a pesar de las adversidades de la vida.

A mi madre y a mi padre, Dora Castellanos y Joaquin Esparza por ser quienes me han dado todo lo que Dios ha puesto en sus manos para buscar mi desarrollo personal convicciones y propósitos para contribuir a formar país. Gracias padres por la paciencia, apoyo, amor, cariño, comprensión y sobre todo por nunca dejar de creer en mi y gracias por colocar siempre a Dios por delante.

A todos los miembros de mi familia quienes me apoyaron en momentos difíciles no sólo académicos, sino personales.

Y por supuesto a Vos! por motivarme tanto últimamente K.J.O.O., muchas gracias sinceramente por tus palabras y actitudes cariñosas que inspiran a cualquiera. Minha fofinha

Ferney Esparza Castellanos

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Carlos Borrás Pinilla, docente de la escuela de ingeniería mecánica y director del grupo de investigación DICBOT, por su colaboración, asesoría y apoyo para el desarrollo del presente proyecto.

A los compañeros de la escuela E3T por sus recomendaciones.

A los compañeros del grupo DICBOT por la orientación.

A nuestras amistades de la universidad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO.....	21
1.1 Fuente motriz	22
1.2 Sensores	25
1.3 Software y hardware de control.....	28
1.3.1 Software de aplicación	28
1.3.2 Tarjeta NI USB 6216	29
1.3.3 Puente H	29
1.3.4 Optoacopladores	31
1.3.5 Fuentes de voltaje	33
2. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLATAFORMA	34
2.1 Función de transferencia.....	37
3. DISEÑO MECÁNICO	42
3.1 Motor	43
3.1.1 Fuerza motriz	43
3.1.2 Fuerza requerida	44
3.2 Eje.....	48
3.3 Barra	52
4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES.....	54
4.1 Estabilización	54
4.1.1 Control PID.....	54
4.1.2 Control en espacio de estados.....	69
5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	77

5.1	Caracterización de las curvas	77
5.1.1	Respuesta transitoria	77
5.1.2	Resultados de la respuesta transitoria	79
5.1.3	Error en estado estable	80
5.1.4	Resultados del error en estado estable	81
5.2	Prueba con perturbación	83
5.2.1	Resultados de la prueba con perturbación	83
5.3	Pruebas con las ganancias	85
5.3.1	Pruebas con ganancias para el control PID	85
5.3.2	Resultados de las pruebas con ganancias para el control PID	86
5.3.3	Pruebas con ganancias para el control espacio de estados.....	88
5.4	Análisis de resultados	91
5.4.1	Análisis de la respuesta transitoria	91
5.4.2	Análisis del error en estado estable	91
5.4.3	Análisis en las pruebas con perturbaciones	91
5.4.4	Análisis del cambio de las ganancias	92
	CONCLUSIONES	93
	RECOMENDACIONES	96
	BIBLIOGRAFIA	97
	ANEXOS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Péndulo invertido	20
Figura 2. Transportador personal Segway	22
Figura 3. Componentes de un motor	23
Figura 4. Torque en un motor	24
Figura 5. Motor DC RS-775	25
Figura 6. Encoder incremental rotativo Autonics.....	25
Figura 7. Representación de las señales incrementales.....	26
Figura 8. Conexiones encoder rotativo E30S45003N24	27
Figura 9. Encoder strip.....	28
Figura 10. Tarjeta NI USB 6216.....	29
Figura 11. Configuración de un inversor puente H.....	30
Figura 12. Esquema de un optoacoplador	32
Figura 13. Optoacoplador 4N25.....	33
Figura 14. Fuente reguladora.....	33
Figura 15. DCL del sistema	34
Figura 16. Referencia del sistema	36
Figura 17. Unión, barra y disco	38
Figura 18. Sección transversal de la barra	39
Figura 19. Plataforma péndulo invertido	42
Figura 20. DCL motor	43
Figura 21. Posición 1 de la barra	45
Figura 22. Posición 2 de la barra	46
Figura 23. Esquema del péndulo	47
Figura 24. Diagramas Eje	49
Figura 25. Diagrama de Torque.....	50
Figura 26. Diagrama de la barra	52
Figura 27. Leyes de control PID.....	56
Figura 28. Esquema PID del péndulo	56

Figura 29. Oscilación sostenida con un periodo P_{cr}	58
Figura 30. Herramienta simulation loop	60
Figura 31. Herramienta DAQ Assistant.....	60
Figura 32. Bloques numéricos Labview	61
Figura 33. Herramienta Switch Labview	61
Figura 34. Indicador Labview	62
Figura 35. Herramienta Transfer Function Labview	62
Figura 36. Bloques Derivador e integrador Labview	63
Figura 37. Herramienta Gain Labview	63
Figura 38. Bloques de comparación Labview	64
Figura 39. Bloque Saturation Function Labview.....	64
Figura 40. Bloque Simulate Signal Express Labview.....	65
Figura 41. Subsistema	65
Figura 42. Primer lazo de control	66
Figura 43. Segundo lazo de control	67
Figura 44. Control del motor en el PID.....	68
Figura 45. Panel Frontal del PID.....	69
Figura 46. Esquema control en espacio de estados	70
Figura 47. Matrices espacio de estados	71
Figura 48. Espacio de estados péndulo invertido	72
Figura 49. Subsistema de estados.....	73
Figura 50. Definición de estados y ganancias	74
Figura 51. Limitación de la señal de control.....	74
Figura 52. Control del motor en el espacio de estados.....	75
Figura 53. Panel frontal del espacio de estados	76
Figura 54. Respuesta transitoria	77
Figura 55. Prueba para la respuesta transitoria	78
Figura 56. Respuesta transitoria del control PID.....	79
Figura 57. Respuesta transitoria del control en espacio de estados.....	79
Figura 58. Error en estado estable.....	81

Figura 59. Error en estado estable para el control PID	81
Figura 60. Error en estado estable para el control en espacio de estados	82
Figura 61. Prueba con perturbación en el control PID	84
Figura 62. Prueba con perturbación en el control en espacio de estados	84
Figura 63. Prueba 1 con ganancias para el control PID.....	87
Figura 64. Prueba 2 con ganancias para el control PID.....	87
Figura 65. Prueba 3 con ganancias para el control PID.....	88
Figura 66. Prueba 1 con ganancias para el control en espacio de estados.....	89
Figura 67. Prueba 2 con ganancias para el control en espacio de estados.....	89
Figura 68. Prueba 3 con ganancias para el control en espacio de estados.....	90
Figura 69. Prueba 4 con ganancias para el control en espacio de estados.....	90
Figura 70. Esquema del sistema lazo abierto	101
Figura 71. Esquema del sistema lazo cerrado	102
Figura 72. Subsistemas de un sistema de control en lazo cerrado.....	103
Figura 73. Estabilidad	106
Figura 74. Respuesta escalón unitario de una planta	111
Figura 75. Curva de respuesta con forma de S	111
Figura 76. Sistema en lazo cerrado con controlador proporcional.....	113
Figura 77. Oscilación sostenida con un periodo P_{cr}	113
Figura 78. Acople entre el eje y encoder	143
Figura 79. Rodamiento 606-2RS	143
Figura 80. Buen estado del tomacorriente	146
Figura 81. Buen estado del cableado	146
Figura 82. Espaciamiento del banco.....	147
Figura 83. Esquema de conexiones eléctricas	148
Figura 84. Ajuste de pernos.....	149
Figura 85. Ventana inicial de Labview	150
Figura 86. Configuración del panel frontal	151
Figura 87. Botón Run Continuously	151
Figura 88. Inversor de señal en el diagrama de bloques	152

Figura 89. Normalización del ángulo..... 153

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Convenciones modelo matemático	34
Cuadro 2. Convenciones del péndulo	39
Cuadro 3. Datos de la unión, barra y disco	40
Cuadro 4. Resultados de los momentos de inercia.....	41
Cuadro 5. Características del sistema	41
Cuadro 6. Cálculo del eje.....	51
Cuadro 7. Cálculo de la barra	52
Cuadro 8. Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y en el periodo crítico P_{cr} (segundo método)	59
Cuadro 9. Respuesta transitoria de los controles PID y espacio de estados para la posición del carro.....	80
Cuadro 10. Error en estado estable para el control PID	82
Cuadro 11. Error en estado estable para el control en espacio de estados.....	82
Cuadro 12. Resultados de la perturbación.....	85
Cuadro 13. Variación de las ganancias para el control PID	86
Cuadro 14. Variación de las ganancias para el control en espacio de estados	88
Cuadro 15. Cálculo de constantes PID primer método	112
Cuadro 16. Cálculo de constantes segundo método	113
Cuadro 17. Precauciones de seguridad.....	145
Cuadro 18. Especificaciones de voltaje y corriente para dispositivos electrónicos.....	147
Cuadro 19. Valores para iniciar la sintonización en el control PID posición carro y ángulo del péndulo.....	154
Cuadro 20. Valores para iniciar la sintonización en el control espacio de estados.....	154
Cuadro 21. Valores para iniciar la sintonización en el swing up	154

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. SISTEMA DE CONTROL.....	101
ANEXO B. ESTABILIDAD DE UN SISTEMA.....	105
ANEXO C. SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID	110
ANEXO D. DATASHEET DEL MOTOR	115
ANEXO E. DATASHEET DEL ENCODER ROTATIVO	116
ANEXO F. DATASHEET OPTOACOPLADOR 4N25.....	118
ANEXO G. DATASHEET OPTOACOPLADOR 6N137	125
ANEXO H. DATASHEET PUENTE H LMD-18200T	130
ANEXO I. PLANOS.....	135
ANEXO J. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL PID.....	141
ANEXO K. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL EN ESPACIO DE ESTADOS	142
ANEXO L. ELEMENTOS MECÁNICOS ADICIONALES.....	143
ANEXO M. CATÁLOGO RODAMIENTO 606-2RS	144
ANEXO N. MANUAL DEL USUARIO.....	145
ANEXO O. CATÁLOGO PRISIONEROS.....	155

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL (DE PÉNDULO INVERTIDO LINEAL) COMO HERRAMIENTA DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO PARA EL LABORATORIO DE SISTEMAS DINÁMICOS, INGENIERIA DE CONTROL Y ROBÓTICA *

AUTORES:

EDUWIN FERNEY ESPARZA CASTELLANOS
LUIS FERNANDO RUIZ PINEDA**

PALABRAS CLAVES: Péndulo invertido, labview, control PID, espacio de estados.

DESCRIPCIÓN:

Dado que los sistemas de control contribuyen con el desarrollo de la tecnología y actualmente la ingeniería de control es aplicada en numerosas áreas tales como robótica, automatización, diseño, entre otras, para solucionar problemas en la industria. Por esta razón es importante conocer los principios de operación para adquirir la capacidad de aplicarlos a sistemas dinámicos. Un caso particular de sistemas de control, es el péndulo invertido, el cual es la base para aplicar diferentes técnicas de control y estudiar la aplicación de estas a otros sistemas más complejos.

Este proyecto aporta a la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander una plataforma experimental de péndulo invertido con una interfaz de labview, como herramienta de carácter académico para analizar, comprender y concluir aspectos relacionados con el sistema de control clásico PID y sistema de control moderno en espacio de estados. Para las personas que estudien ingeniería de control en esta plataforma, está disponible la posibilidad de proponer la aplicación de otros algoritmos de control y buscar aplicaciones en donde este sistema sea útil para estudiar el comportamiento de las mismas.

Se concluyó que el sistema de control moderno basado en espacio de estados, proporciona un mejor comportamiento que el sistema de control PID en lo referente a estabilidad.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Carlos Borrás Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL PLATFORM (OF LINEAR INVERTED PENDULUM) AS RESEARCH TOOL AND DEVELOPMENT FOR THE LABORATORY OF DYNAMICAL SYSTEMS, CONTROL ENGINEERING AND ROBOTIC *

AUTHORS:

EDUWIN FERNEY ESPARZA CASTELLANOS
LUIS FERNANDO RUIZ PINEDA**

KEYWORDS: Inverted pendulum, labview, control PID, space states.

DESCRIPTION:

Since Control systems contribute with the development of the technology and currently the control engineering is applied in many areas such as robotic, automation, design, among others, to solve problems in the industry. For this reason is important to know its principle operation for acquire the capacity to apply to the dynamical systems. A special case of the control systems, is the inverted pendulum, which is the base to apply diferents control technicals and to study the applications of this to the other systems more complexes.

This project give to the mechanical engineering school of the Santander Industrial University, an experimental platform of inverted pendulum with an interfaz in labview, as tool of the character academic to analyze, understand and conclude related aspects with the clasic control system PID and modern control system in spaces states. For the people that study control engineering in this platform, is available the possibility to propose the application of the others control algorithms and look up applications where this system is useful to study the behavior of the same.

Concluded that the modern control system based in space states, provides better control behavior that the control system PID in the reference to the stability.

*Graduation Project

** Faculty of Physics-Mechanic Engineerings. School of Mechanic Engineering. Director Carlos Borrás Pinilla.

INTRODUCCIÓN

El péndulo invertido es un típico y clásico sistema mecánico muy usado para experimentar nuevas ideas en la rama del control. Una de las ventajas es su mecanismo relativamente sencillo, y por el otro, un sistema que contiene puntos inestables. El péndulo invertido suele ser usado como patrón para comparar diferentes algoritmos de control o hardware a ser implementados. Otra de las cualidades de este dispositivo es que su dinámica es similar a la de un transporte aéreo y a la de un robot bípedo con la capacidad de caminar. Una de las finalidades del estudio del péndulo invertido consiste en el uso de sus algoritmos de control en otras aplicaciones más complejas a las cuales se puede adaptar. Uno de los tópicos de este proyecto consiste en mostrar diferencias entre el control clásico y moderno; como es de esperarse, el control debe tener un mejor comportamiento cuando se implementa una técnica moderna de control en comparación con alguna técnica clásica.

Figura 1. Péndulo invertido



Fuente: Solidworks

1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO

Consiste en un péndulo o varilla que se mueve por uno de sus extremos mediante una articulación situada sobre un carro que se desplaza sobre una guía rectilínea horizontal bajo la acción de una fuerza, que es la acción de control con la que se pretende actuar sobre la posición de la varilla. Tiene un mecanismo que consta de una guía sobre la cual se puede deslizar un carro en donde se encuentra montado un péndulo que puede girar libremente. Al eje del péndulo se encuentra acoplado un sensor llamado encoder, este instrumento mide el ángulo de rotación del péndulo con respecto a la vertical y también se cuenta con un sensor de posición que indica donde se encuentra el carro. La transmisión en este caso se hace con una correa acoplada al carro y esta correa está conectada a un motor DC.

La idea u objetivo del control del péndulo invertido consiste en cambiar la dinámica del sistema para que en la posición vertical (arriba), se tenga un punto de equilibrio estable. Es decir, se debe encontrar la fuerza que ha de aplicarse al carro para que el péndulo no se caiga de esa posición vertical, incluso si se le perturba.

Se muestra el sistema de control con una técnica clásica de control, en este caso el PID y una técnica moderna de control llamada control en espacio de estados, con el uso de una tarjeta NI USB 6216 (National Instruments) como base para realizar los algoritmos de control.

Aunque el péndulo invertido se usa principalmente para demostrar conceptos básicos de control, también tiene otras aplicaciones, tales como:

- Las perturbaciones que existen en el vuelo de una aeronave, pueden desestabilizar su vuelo, esto se puede corregir con el péndulo invertido.
- El control de la postura y la caminata de los robots bípedos, puede ser modelado y controlado por el péndulo invertido, la estructura de un robot humanoide puede asemejarse a la de un péndulo invertido. La semejanza se

establece en que la masa del humanoide se concentra en el punto extremo del péndulo y que la masa de la barra rígida de longitud l es despreciable respecto de la masa, siendo la distancia desde el suelo al centro de masas del humanoide, el movimiento en la base del péndulo simula la caminata en el bípedo.

➤ El transportador personal Segway (figura 2), es básicamente un sistema de péndulo invertido montado en un vehículo de transporte, este es el primer dispositivo de transporte con auto balanceado. El ordenador y los motores situados en la base mantienen el Segway vertical todo el tiempo. El usuario se debe inclinar hacia la dirección que quiera tomar (delante, detrás, derecha o izquierda).

Figura 2. Transportador personal Segway

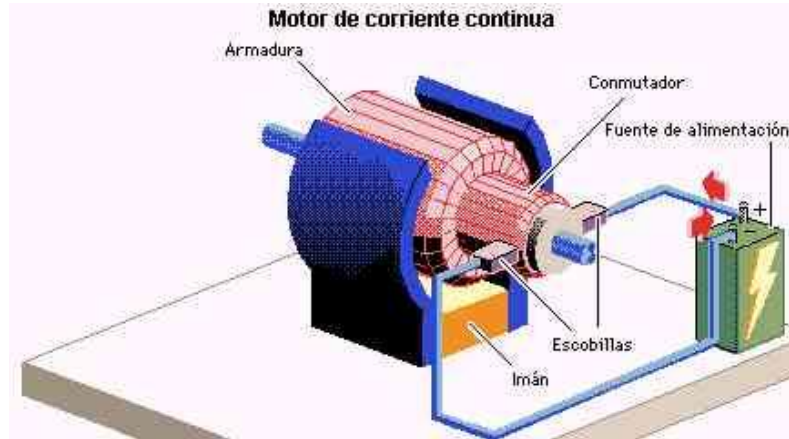


Fuente: www.segwaycolombia.co

1.1 Fuente motriz

El motor de dc (corriente directa) es prácticamente un transductor de par que transforma energía eléctrica en mecánica. El par ejercido en el eje del motor es directamente proporcional al flujo en el campo y a la corriente en la armadura.

Figura 3. Componentes de un motor



Fuente: www.fisicanet.com.ar

Un conductor que lleva la corriente está colocado en un campo magnético con flujo Φ , a una distancia r del centro de rotación. El par o torque desarrollado, el flujo Φ y la corriente i se relacionan así:

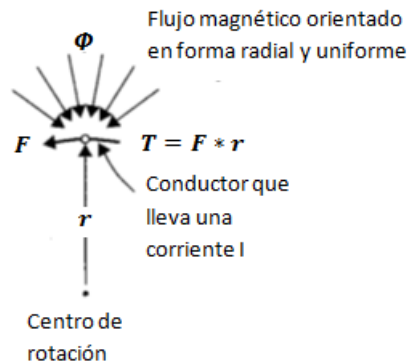
$$T_m = k_m \Phi i_a$$

Donde, T_m es el torque del motor [N-m o lb-ft], Φ es el flujo magnético [webers], i_a es la corriente de armadura [amperes] y k_m es la constante de proporcionalidad.

Además del torque desarrollado, como se ve en la figura 4, cuando se mueve el conductor en el campo magnético, se genera un voltaje (fuerza contraelectromotriz) entre sus terminales. Este voltaje es proporcional a la velocidad del eje; tiende a oponerse al flujo de corriente. La relación existente entre la fuerza contraelectromotriz y la velocidad del eje es la siguiente:

$$e_m = k_m \Phi \omega_m$$

Figura 4. Torque en un motor



Fuente: Autores

Donde e_m es la fuerza contraelectromotriz [Volts], Φ es el flujo magnético [webers], k_m es la constante de proporcionalidad y ω_m es la velocidad del eje [rad/s].

Para sistemas de control, los motores de corriente continua son una de las fuentes motrices más usadas en la industria, y por ello se prefieren a diferencia de los motores de corriente alterna (c.a.) ya que un motor de c.a., es más difícil de controlar y especialmente para control de posición dado que sus características no son lineales, y por ello resulta más difícil su análisis. Se aplican en industrias donde se fabrica equipo cómputo como cintas, impresoras, unidades de disco y procesadores de textos, industria automotriz y máquinas herramienta. En este proyecto se usa un motor DC referencia RS-775 con una potencia nominal de 24,2 [W] de un plotter HJ design-jet 350C.

Figura 5. Motor DC RS-775



Fuente: Autores

1.2 Sensores

1.2.1 Encoder incremental

El encoder es un transductor que transforma el movimiento en una cadena de pulsos, señales de pulso o código digital. Los encoders pueden ser de desplazamiento lineal o rotatorio. Los codificadores que producen una señal digital de salida se conocen como *codificadores absolutos*, es decir, producen como salida un código digital distinto que indica cada incremento menos significativo de resolución y los *codificadores incrementales* generan un pulso por cada incremento de resolución pero no hace distinciones entre dichos incrementos.

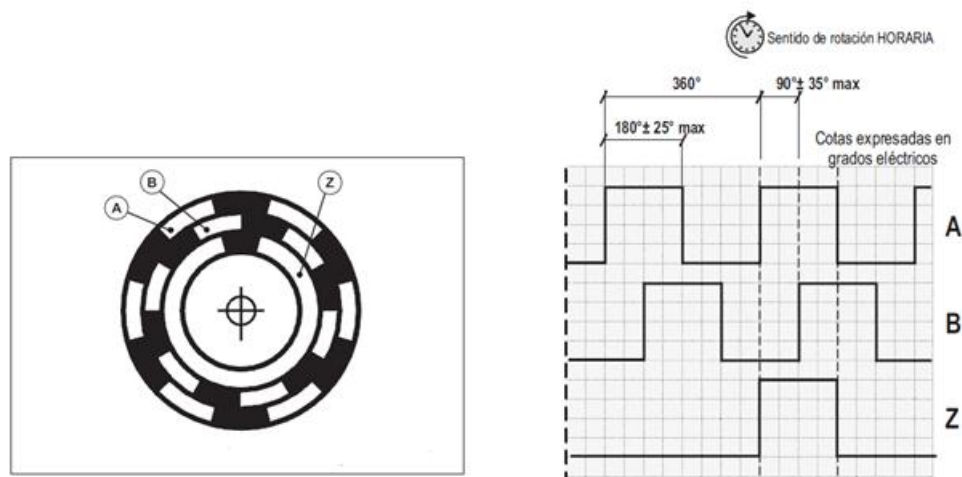
Figura 6. Encoder incremental rotativo Autonics



Fuente: Catálogo Autonics

El encoder incremental proporciona dos ondas cuadradas y desfasadas entre ellas 90° eléctricos, que son el canal A y canal B. con la lectura de un canal se dispone de la información de la velocidad de rotación, mientras que si se capta adicionalmente la señal del segundo canal, se puede diferenciar el sentido de rotación basados en las dos señales de los canales. Adicionalmente se tiene otro canal (canal Z), el cual proporciona la posición absoluta de cero del eje del encóder. Esa señal se presenta como impulso cuadrado con fase y amplitud centrada en el canal A.

Figura 7. Representación de las señales incrementales



Fuente: Catálogo Eltra

Un encoder incremental, tiene cuatro partes básicas: Una fuente de luz, un disco giratorio, una máscara estacionaria y un detector. El disco tiene partes opacas y transparentes distribuidos en forma alterna de tal forma que un par de estos sectores representa un periodo incremental. La máscara se usa para dejar pasar o bloquear la luz entre la fuente y el detector o fotodetector.

La precisión de un encoder se mide con una unidad llamada grado eléctrico que determina la división de un encoder, es decir, 360° eléctricos equivalen a la

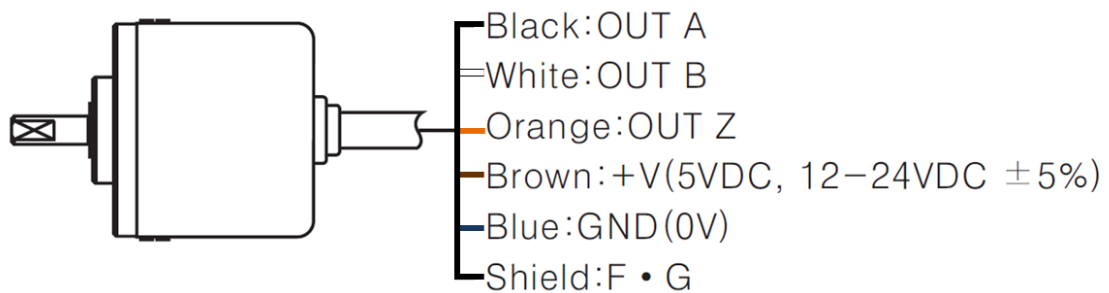
rotación mecánica del eje necesaria para que se realice un ciclo o pulso completo de la señal de salida. La relación es de la siguiente manera:

$$360^{\circ} \text{eléctricos} = \frac{360^{\circ} \text{ mecánicos}}{N^{\circ} \text{ impulsos/ giro}}$$

Específicamente para este proyecto se decidió por usar un encoder incremental

De referencia E30S45003N24 el cual tienes 500 ppr (pulsos por revolución), lo cual es una buena resolución para este proyecto, ya que la rotación del péndulo cuando esté cerca de la posición de equilibrio es menor de media vuelta.

Figura 8. Conexiones encoder rotativo E30S45003N24



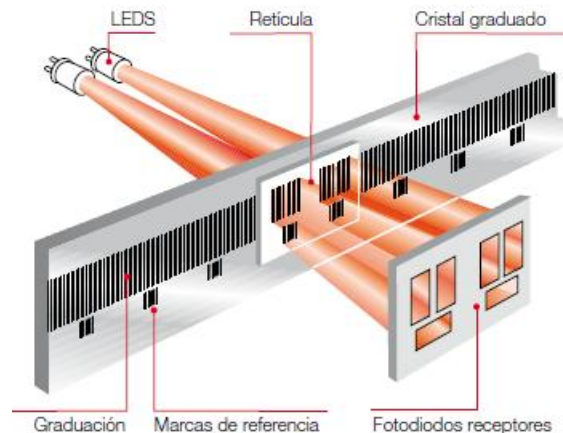
Fuente: Catálogo Autonics

1.2.2 Encoder strip

El encoder strip o de banda consiste de un simple emisor y receptor de luz con una banda. Se transmite un rayo continuo de luz frente al receptor, del otro lado de la banda. Esta banda que contiene líneas marcadas de forma muy precisa, entonces mientras la luz se está transmitiendo, al llegar a cada línea se bloquea, pero cuando esta se encuentra justo en los espacios entre las líneas, traspasa la banda y la luz llega al receptor, este hecho hace que se presente una condición de bloqueo y no bloqueo que genera pulsos eléctricos con los cuales se puede conocer la posición lineal, en este caso de la corredera o carro del péndulo invertido.

Normalmente la resolución de estos encoders se referencia en pulsos por pulgada o pulsos por milímetros.

Figura 9. Encoder strip



Fuente: www.fagorautomation.com

Específicamente se usa un encoder strip de un plotter HP design-jet 350C el cual tiene una resolución de 6 pulsos por milímetro.

1.3 Software y hardware de control

1.3.1 Software de aplicación

El software de registro de datos usado para esta tarjeta es LabVIEW 2009 licenciado por la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el cual sirve para adquirir, analizar y presentar datos. Además de LabVIEW Signal Express, los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M son compatibles con las siguientes versiones (o posteriores) de software de aplicación como LabVIEW 7.1, LabWindows™/CVI 7.x o Measurement Studio 7.x. Los dispositivos de adquisición de datos de la Serie M también son compatibles con Visual Studio .NET, C/C++ y Visual Basic 6.

En el desarrollo de cada controlador se muestran los bloques y complementos usados para las respectivas aplicaciones.

1.3.2 Tarjeta NI USB 6216

Este dispositivo de National Instruments es un módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción de la serie M energizado por bus USB. Tiene 16 entradas analógicas, una velocidad de muestreo de 400 KS/s, dos salidas analógicas, 32 líneas de E/S digital, cuatro rangos de entrada programable (± 0.2 V a ± 10 V) por canal, disparo digital y dos contadores/temporizadores. El módulo ofrece aislamiento CAT I de 60 V para seguridad y precisión mejoradas. La tarjeta NI USB-6216 está diseñada para aplicaciones móviles o con restricciones de espacio.

Figura 10. Tarjeta NI USB 6216



Fuente: www.ni.com

1.3.3 Puente H

Para remitirnos a los puentes H, es necesario hablar un poco de la electrónica de potencia que consiste en la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica; basada en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia.

Las aplicaciones de la electrónica de potencia incluyen controles de calor, iluminación, de motores, sistemas de propulsión, fuente de alimentación, etc.

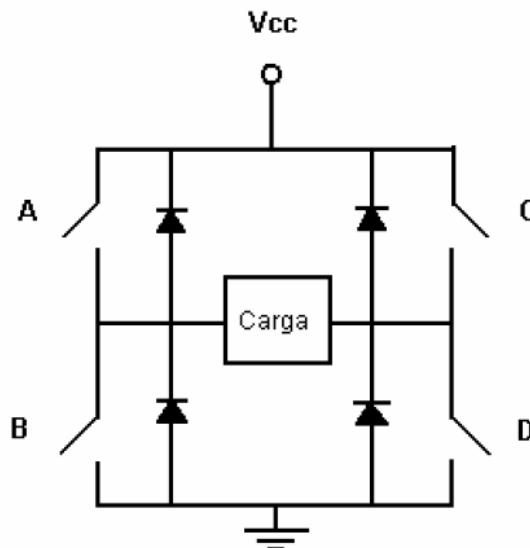
La función de un puente H es cambiar un voltaje de entrada a un voltaje de salida, con la magnitud y frecuencia deseada. El voltaje que sale y la frecuencia pueden ser fijos o variables.

Lo ideal en un inversor de este tipo, es trabajar con una onda de voltaje de salida senoidal. No obstante, en los inversores reales, esta onda de voltaje no es senoidal; para aplicaciones de mediana y baja potencia, se puede trabajar con voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada. En este caso la señal que llega a puente H proviene de la tarjeta NI USB 6216.

➤ **Funcionamiento de un puente H**

Un inversor con configuración de puente H es prácticamente un arreglo de cuatro interruptores (figura 11), que son controlados mediante una señal de control de dirección para la conmutación.

Figura 11. Configuración de un inversor puente H



Fuente: Catarina.udlap.mx

El funcionamiento se da de la siguiente manera: Si se cierran los interruptores A y D, manteniendo B y C abiertos, la corriente circulará en un sentido a través de la carga (en este caso el motor DC RS-775-12-5000). Análogamente, si se mantiene cerrados los interruptores B y C y al tiempo abiertos los interruptores A y D, la corriente circulará en sentido contrario. Es importante tener en cuenta el hecho de que al mantener cerrados los interruptores A y B o C y D, se presentará corto circuito.

En esta plataforma se encuentra en uso un puente H de referencia LM-18200T, en el anexo H contiene el respectivo Datasheet del mismo.

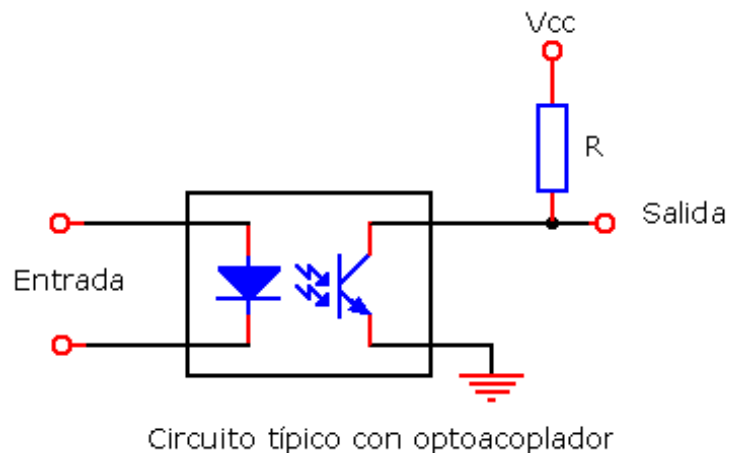
1.3.4 Optoacopladores

La evolución de los semiconductores en el mundo electrónico encontró en los optoacopladores al reemplazo ideal para dejar de lado al relé (**o relay**) y al **transformador**, en especial en aplicaciones digitales, donde la velocidad de transferencia y la conservación de la forma de onda debía ser tan fiel como fuera posible en la salida, reflejando en forma idéntica al formato que presentaba en la entrada. En el caso del relé, la transferencia de una señal analógica es imposible, del mismo modo que sucede con los transformadores a determinadas frecuencias y con formas de onda “**especiales**”. El optoacoplador fue la solución empleada en múltiples aplicaciones que requerían importantes cambios de niveles de tensión entre los circuitos enlazados, donde se requería aislación de determinado tipo de ruidos en la transmisión de datos; o en espacios industriales, donde se pudiera (**o pudiese**) controlar mediante un impulso lógico, de baja tensión, una carga con elevados consumos en corriente alterna. Básicamente, si pudiéramos resumirlo en una frase, podría ser **“la solución de baja potencia a la activación aislada galvánicamente de cargas, mediante un sistema de control”**

Un optoacoplador, también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor excitado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un

componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. De este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, un fotoemisor y un fotorreceptor cuya conexión entre ambos es óptica. Estos elementos se encuentran dentro de un encapsulado que por lo general es del tipo DIP. Se suelen utilizar para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles.

Figura 12. Esquema de un optoacoplador



Fuente: proyctoselectronics.blogspot.com

Dado que el motor cambia de polaridad constantemente, se generan picos de corriente que pueden afectar la medición del encoder strip y rotativo debido a la sensibilidad de los mismos; por esta razón se soluciona este inconveniente con el uso de optoacopladores para aislar las tierras del motor con las tierras de los sensores y la tarjeta NI USB 6216. En este caso se están usando 3 optoacopladores, uno de alta velocidad referencia 6N137 conectado entre el puerto 12 de la tarjeta donde se genera la señal PWM y la entrada al puente H; los otros dos optoacopladores son de baja velocidad referencia 4N25 conectados en los puertos 44 y 45 correspondientes a las señales de freno y dirección del motor respectivamente; pues el uso de los mismos se justifica dado a la condición que se presenta cada vez que el motor cambia de dirección de giro donde se hay picos de corriente que hacen desfasar las lecturas en los encoders.

Figura 13. Optoacoplador 4N25



Fuente: www.carrodelectronica.com

1.3.5 Fuentes de voltaje

La plataforma de control cuenta con dos fuentes, una para alimentar los dos sensores, en este caso el encoder strip se alimenta con 5 V y el encoder rotativo con 12 V y la otra es para alimentar el motor 15 V y el puente H con 15 V.

Figura 14. Fuente reguladora

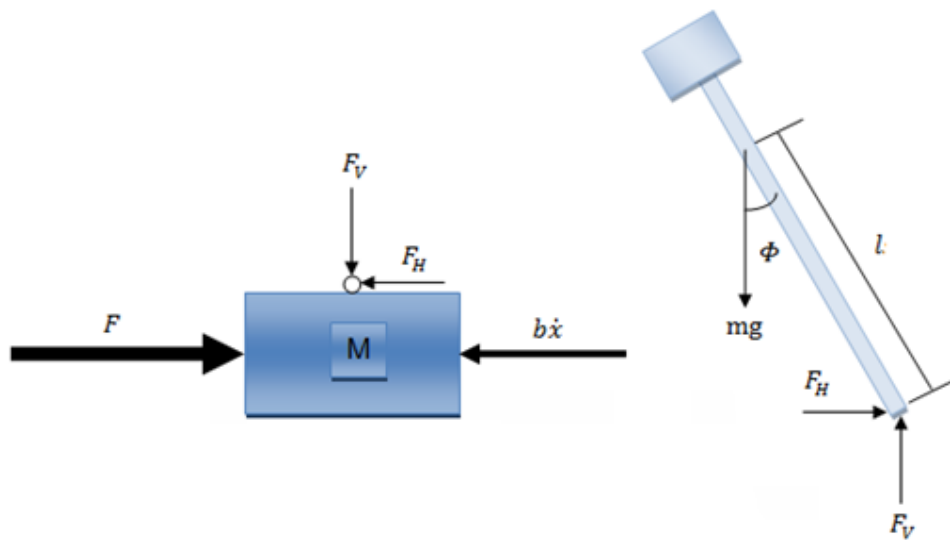


Fuente: www.magomelectronica.com

2. MODELO MATEMÁTICO DE LA PLATAFORMA

Las variables usadas para definir el sistema son la posición del carro y el ángulo del péndulo con respecto a la vertical. Lo que se busca es encontrar la ecuación o el conjunto de ecuaciones diferenciales que describan el comportamiento de estas variables para una fuerza F , aplicada en el carro a través de la banda y así lograr el equilibrio del péndulo.

Figura 15. DCL del sistema



Fuente: Autores

Cuadro 1. Convenciones modelo matemático

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN
b	Coefficiente de fricción
M	Masa del carro
m	Masa del péndulo
I	Inercia total del sistema
l	Longitud al centro de masa del péndulo

	Ángulo que forma el péndulo con el eje vertical
g	Aceleración de la gravedad
F	Fuerza aplicada en el carro
F_H	Reacción horizontal en el péndulo
F_V	Reacción vertical en el péndulo
X	Posición horizontal del sistema
θ	Ángulo muy pequeño en la dirección vertical

Fuente: Autores

En el carro

$$\sum F_x = ma_x$$

$$\sum F_x = M\ddot{x}$$

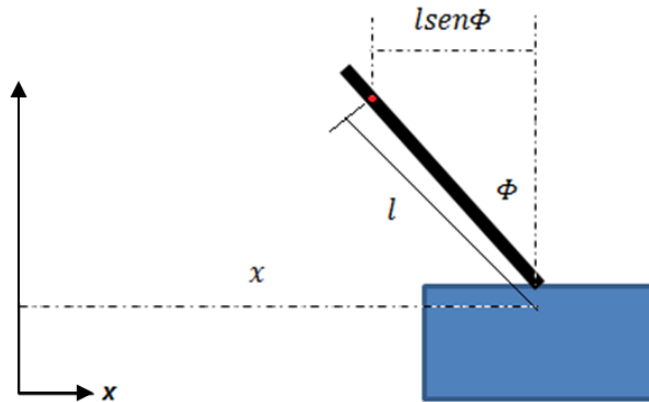
$$F = M\ddot{x} + b\dot{x} + F_H$$

En el péndulo

Sumatoria de fuerzas en X

Para la posición en X del péndulo, se tiene en cuenta la posición del carro menos la posición del péndulo.

Figura 16. Referencia del sistema



Fuente: Autores

De la figura 15

$$\sum F_x = ma_x$$

$$F_H = m \frac{d^2}{dt^2} (x - l \text{sen}\Phi)$$

$$F_H = m\ddot{x} + ml\ddot{\Phi}\cos\Phi - ml\dot{\Phi}^2\text{sen}\Phi$$

Sumatoria de fuerzas en Y

$$\sum F_y = ma_y$$

$$F_V - mg = m \frac{d^2}{dt^2} (l\cos\Phi)$$

$$F_V - mg = m \frac{d}{dt} (-l\dot{\Phi}\text{sen}\Phi)$$

$$F_V = ml(-\ddot{\Phi}\text{sen}\Phi - \dot{\Phi}^2\cos\Phi) + mg$$

$$F = (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\Phi}\cos\Phi - ml\dot{\Phi}^2\text{sen}\Phi$$

Sumando momento en el centroide del péndulo

$$\sum M_x = I\ddot{\Phi}$$

$$-F_V l \text{sen}\Phi - F_H l \cos\Phi = I\ddot{\Phi}$$

Para reducir procedimiento algebraicos, se pueden sumar fuerzas en la dirección perpendicular al péndulo, y se obtiene:

$$F_V \text{Sen}\Phi + F_V \text{Cos}\Phi - mg \text{Sen}\Phi = ml\ddot{\Phi} + m\ddot{x} \text{Cos}\Phi$$

$$(I + ml^2)\ddot{\Phi} + mgl \text{sen}\Phi = -ml\ddot{x} \text{Cos}\Phi$$

Se procede a linealizar las ecuaciones de movimiento obtenidas (4) y (7), esta linealización se hace alrededor de $\Phi = \pi$; para lo cual se toma $\Phi = \pi + \Theta$. Donde Θ es un ángulo pequeño en la dirección vertical. Como ocurre en muchos sistemas físicos, se obtienen modelos de estado no lineales, que bajo ciertas condiciones se pueden aproximar a un estado lineal. Lo útil de usar el modelo lineal facilita el análisis del sistema y el diseño de controladores. La linealización se realiza alrededor de un punto o trayectoria de operación, tal como se escogió anteriormente.

Entonces, para Φ pequeños, se tiene:

$$\text{sen}\Phi = \text{sen}(\pi + \Theta) = -\Theta ; \quad \text{cos}\Phi = \text{cos}(\pi + \Theta) = -1 ; \quad \dot{\Phi}^2 = 0$$

Teniendo en cuenta lo anterior, las ecuaciones de movimiento quedan de la siguiente forma:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\Phi} \text{cos}\Phi - ml\dot{\Phi}^2 \text{sen}\Phi = F$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\Theta} = F$$

$$(I + ml^2)\ddot{\Phi} + mgl \text{sen}\Phi = -ml\ddot{x} \text{Cos}\Phi$$

$$(I + ml^2)\ddot{\Theta} - mgl\Theta = ml\ddot{x}$$

2.1 Función de transferencia

Luego de linealizar el sistema, se procede a aplicar la transformada de Laplace, denotando $F = U$ quedando de la siguiente manera:

$$(I + ml^2)\Theta(s)s^2 - mgl\Theta(s) = mlX(s)s^2$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\theta(s)s^2 = U(s)$$

Se debe tener en cuenta el hecho de que para hallar la función de transferencia, se asumen condiciones iniciales igual a Cero.

Ya que el interés es el ángulo θ ; entonces se despeja $X(s)$ de la primera ecuación y se reemplaza en la segunda, para obtener la relación entre $\theta(s)$ y $U(s)$, así:

$$X(s) = \left[\frac{(I + ml^2)}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \theta(s)$$

$$(M + m) \left[\frac{(I + ml^2)}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \theta(s)s^2 + b \left[\frac{(I + ml^2)}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \theta(s)s - ml\theta(s)s^2 = U(s)$$

Entonces, la función de transferencia queda de la siguiente manera:

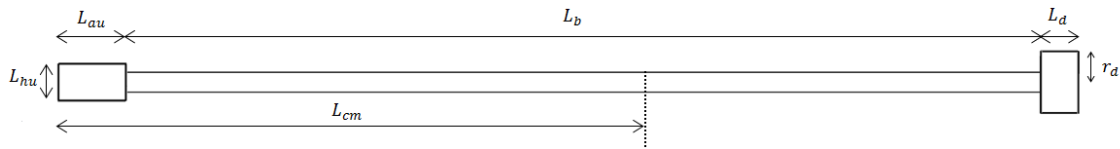
$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s^2}{s^4 + \frac{b(I + ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M + m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s}$$

Donde,

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2]$$

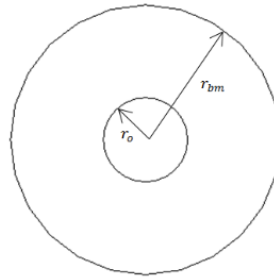
Con respecto a la inercia del péndulo, esto hace referencia a la inercia total del conjunto unión, barra y disco como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Unión, barra y disco



Fuente: Autores

Figura 18. Sección transversal de la barra



Fuente: Autores

Cuadro 2. Convenciones del péndulo

NOMENCLATURA	CONVENCIÓN
L_{hu}	<i>Altura de la unión del eje y barra</i>
L_{au}	<i>Ancho de la unión</i>
L_{cm}	<i>Longitud al centro de masa desde al extremo de la unión</i>
L_b	<i>Longitud de la barra</i>
L_d	<i>Longitud del disco</i>
r_d	<i>Radio del disco</i>
r_{bm}	<i>Radio de la barra maciza</i>
r_o	<i>Radio del orificio</i>

Fuente: Autores

Para el cálculo de la inercia del péndulo se tuvo en cuenta la inercia de la unión entre el eje y la barra, la inercia de la barra y la inercia del disco colocado en el extremo libre del péndulo.

$$I_{TOTAL} = I_{BARRA} + I_{DISCO} + I_{UNIÓN}$$

$$I_{BARRA} = I_{Barra_{maciza}} - I_{orificio}$$

$$I_{Barra_{maciza}} = \frac{1}{4} m_{bm} r_{bm}^2 + \frac{1}{12} m_{bm} l_b^2 + m_{bm} (l_{cm} - l_{au} - \frac{l_b}{2})^2$$

$$I_{\text{orificio}} = \frac{1}{4}m_o r_o^2 + \frac{1}{12}m_o l_b^2 + m_o(l_{cm} - l_{au} - \frac{l_b}{2})^2$$

$$I_{\text{DISCO}} = \frac{1}{4}m_d r_d^2 + m_d(l_{au} + l_b + \frac{l_d}{2} - l_{cm})^2$$

$$I_{\text{UNIÓN}} = \frac{1}{12}m_u(l_{au}^2 + l_{hu}^2) + m_u(l_{cm} - \frac{l_{au}}{2})^2$$

Cuadro 3. Datos de la unión, barra y disco

NOMENCLATURA	VALOR
L_{hu}	19[mm]
L_{au}	25[mm]
L_{cm}	312[mm]
L_b	476[mm]
L_d	20[mm]
r_d	16[mm]
r_{bm}	8[mm]
r_o	6[mm]
m_{bm}	66[g]
m_o	38[g]
m_b	28[g]
m_d	42[g]
m_u	20[g]

Fuente: Autores

Cuadro 4. Resultados de los momentos de inercia

NOMENCLATURA	VALOR [$g * mm^2$]
I_{BARRA}	596.619
$I_{Barramaciza}$	1.406.000
$I_{orificio}$	809.071
I_{DISCO}	1.666.000
$I_{UNIÓN}$	1.796.000
I_{TOTAL}	4.058.619

Fuente: Autores

Cuadro 5. Características del sistema

NOMENCLATURA	VALOR
b	$0,1 \left[\frac{N * s}{m} \right]$
M	217[g]
m	90[g]
I_{TOTAL}	0,004059 Kg * m^2
l	0,312[m]

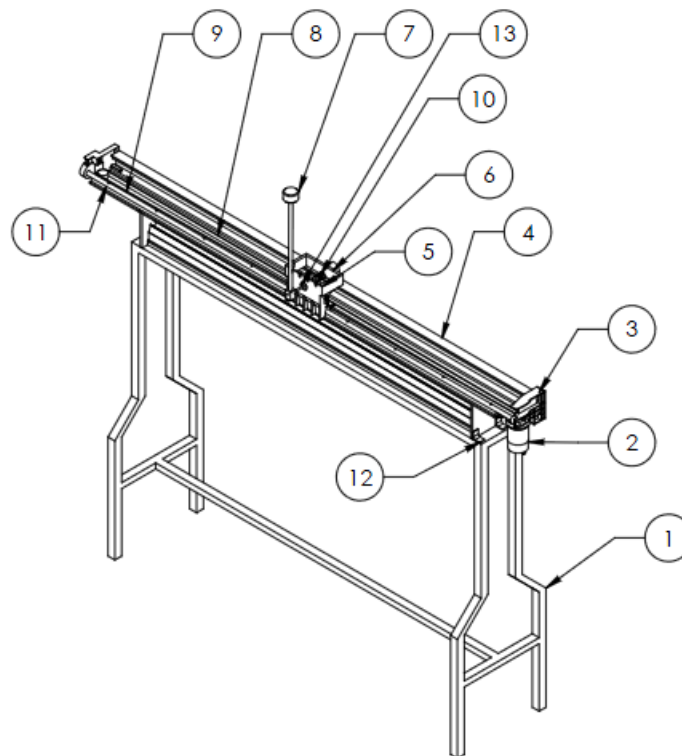
Fuente: Autores

Reemplazando los valores anteriores, se obtiene la función de transferencia.

$$\frac{P(s)}{U(s)} = \frac{8,9s^2}{s^4 + 0,41s^3 - 26,87s^2 - 8,75s}$$

3. DISEÑO MECÁNICO

Figura 19. Plataforma péndulo invertido



Fuente: Autores

1. Mesa
2. Motor
3. Tapas
4. Base
5. Carro
6. Encoder rotativo
7. Péndulo
8. Correa
9. Encoder Strip
10. Acople

11. Guia deslizante

12. Ajustadores

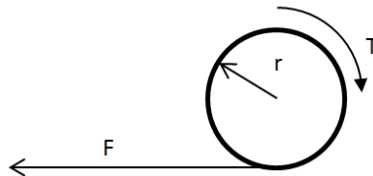
13. Eje de la barra

3.1 Motor

En esta sección la idea es validar el motor que se está usando, comparando la fuerza que este puede ejercer con la fuerza requerida para mover el carro de su posición inicial hasta la posición en la cual se inicia el control de la estabilidad (se consideró de 0° a 170° , aún cuando el control de estabilidad inicia en 135° , pero esto se hace para tener en cuenta el caso en el cual el usuario requiera variar los ángulos del rango del sistema de estabilización) usando análisis de energía. De esta validación debe resultar que la fuerza realizada por el motor debe ser mayor a la fuerza requerida para mover el péndulo de la posición inicial hasta la posición indicada anteriormente.

3.1.1 Fuerza motriz

Figura 20. DCL motor



Fuente: Autores

T = Torque nominal de motor

r = radio del eje polea

F = Fuerza transmitida al carro

$$T = F * r$$

En el anexo D. se especifican los datos del motor modelo RS-775-12-5000, en el cual se especifica que para este motor, el torque en estado estable es de 2700 [g*cm] y el radio de la polea al extremo del eje del motor es de 4 [mm].

$$F = \frac{T}{r}$$

$$F = 6,75 [Kgf]$$

$$F = 66,19 [N]$$

La fuerza que el motor puede realizar es de 66 [Newton], lo siguiente a realizar es calcular la fuerza la requerida.

3.1.2 Fuerza requerida

Hay una transformación de energía potencial en energía cinética rotacional. La energía potencial de la barra es la energía potencial de una partícula de masa m situada en el centro de masa de la barra o en este caso del centro de masa del conjunto barra, disco y unión. La energía total es igual a la energía potencial más energía la energía cinética. Entonces el principio de conservación de la energía se denota de la siguiente manera para cualquier posición angular:

$$E_T = E_c + E_p$$

$$E_T = \frac{1}{2} I_c \omega^2 + mgL_{cm} \cos \Phi$$

Donde E_T es la energía total, E_c es la energía cinética, E_p es la energía potencial, I_c es el momento de inercia de la barra en el centro de masa, ω es la velocidad angular de la barra, m es la masa de la barra, el disco y la unión que acopla el eje a la barra, L_{cm} es la longitud de la barra y Φ es el ángulo entre la barra y el eje vertical.

Se necesita estimar el trabajo que se debe realizar para llevar la barra desde la posición inicial de 0 grados hasta la posición de 170 grados, Teniendo en cuenta que la fuerza se aplica al carro.

Considerando la posición inicial de 0 grados y si se usa esta posición como nivel de referencia, no habría energía potencial y al estar en reposo no habría energía cinética, entonces la energía total en este punto es cero. Para la posición final de 170 grados ya que se va a calcular la fuerza que haga que el péndulo llegue por lo menos a esta posición, entonces se considera que llega a velocidad cero, es decir, la energía cinética en la transición desde la posición inicial hasta la posición final considerada, se transforma en energía potencial más las pérdidas tales como la fricción asociada al rozamiento entre el eje y la barra, que no se están considerando.

El trabajo requerido para darle el cambio de posición angular al péndulo, es igual al cambio de la energía.

Figura 21. Posición 1 de la barra



Fuente: Autores

Figura 22. Posición 2 de la barra



Fuente: Autores

$$E_2 = E_1 + W$$

$$W = E_2 - E_1$$

W es el trabajo realizado, E_1 es la energía en la posición 1 y E_2 es la energía en la posición 2.

$$m = 90[g]$$

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$L_{cm} = 312[mm]$$

$$\Phi = \frac{17}{18} \pi [rad]$$

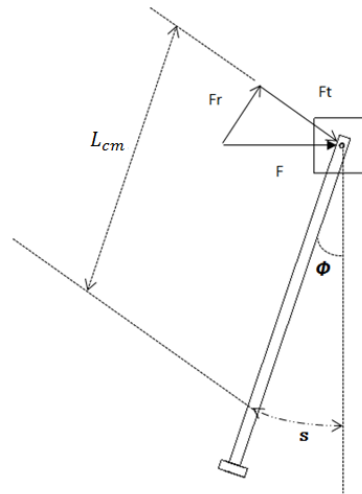
$$W = mgL_{cm} \cos \Phi - 0$$

$$W = -271 [mJ]$$

El signo negativo del trabajo indica que se debe agregar trabajo al sistema para producir el cambio de energía.

Conociendo la magnitud del trabajo necesario para el cambio de posición, se puede calcular la fuerza requerida para llevar de un sólo impulso el carro a la posición 2 mostrada en la figura 22.

Figura 23. Esquema del péndulo



Fuente: Autores

Usando análisis diferencial, el trabajo se define de la siguiente manera:

$$dW = F ds$$

$$dW = F \cos \phi r d\phi$$

$F \cos \phi$ es la componente tangencial de la fuerza, que finalmente es la que realiza el trabajo. La componente radial de la fuerza no realiza trabajo, ya que es perpendicular al desplazamiento. Entonces, el trabajo total realizado para un ángulo ϕ es:

$$W = \int_0^{\phi} F ds$$

$F =$ Fuerza aplicada al carro

$ds =$ diferencial del arco recorrido

$$F = F \cos \phi$$

$$ds = L_{cm} * d\phi$$

$$W = \int_0^{\frac{17}{18}\pi} F ds$$

$$= \int_0^{\frac{17}{18}\pi} F \cos \Phi L_{cm} d\Phi$$

Suponiendo que la aceleración que produce el carrito es constante, entonces la magnitud de la fuerza también es constante:

$$W = F * L_{cm} \int_0^{\frac{17}{18}\pi} \cos \Phi d\Phi$$

$$W = F * L_{cm} \left[\sin\left(\frac{17\pi}{18}\right) - \sin(0) \right]$$

$$F = \frac{W}{L_{cm} \left[\sin\left(\frac{17\pi}{18}\right) - \sin(0) \right]}$$

$$F = 5 [N]$$

Al comparar la fuerza requerida con la fuerza que se puede realizar con el motor, se concluye que el motor de referencia RS-775-12-5000 es apto para realizar el levantamiento del péndulo.

3.2 Eje

Acero 1020 laminado en Caliente

Resistencia a la tensión $S=48000$ [Psi]

DATOS

$$a = 40 [mm]$$

$$b = 10 [mm]$$

$$\sum Fy = 0$$

$$P_B = P_A + P_C$$

$$\sum Mz = 0$$

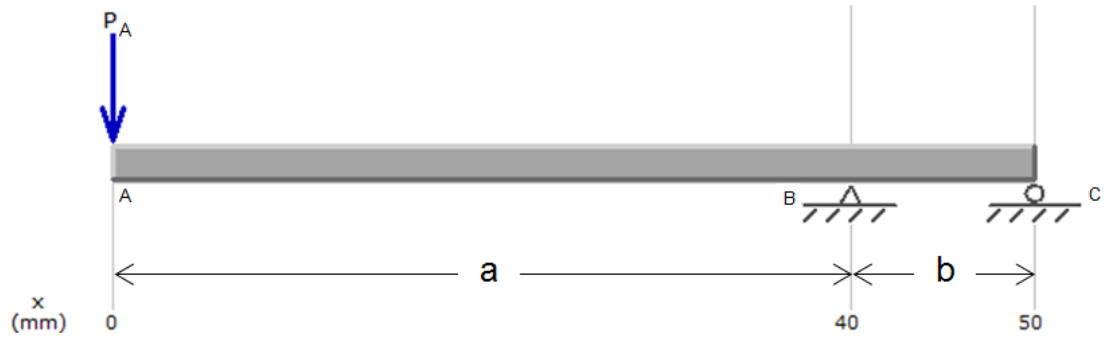
$$P_B = P_C * \left(1 + \frac{b}{a}\right)$$

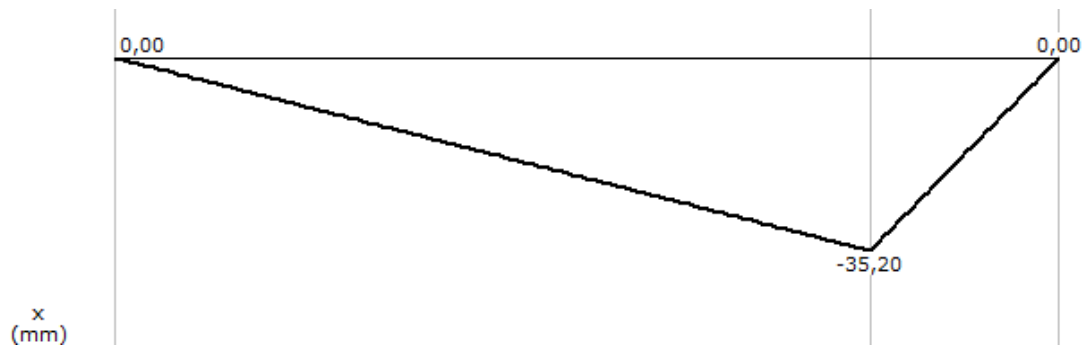
$$P_A = 0,88 [N]$$

$$P_B = 4,4 [N]$$

$$P_C = 3,52 \text{ [N]}$$

Figura 24. Diagramas Eje





Fuente : MD SOLIDS 3.5 versión educativa

➤ Torque

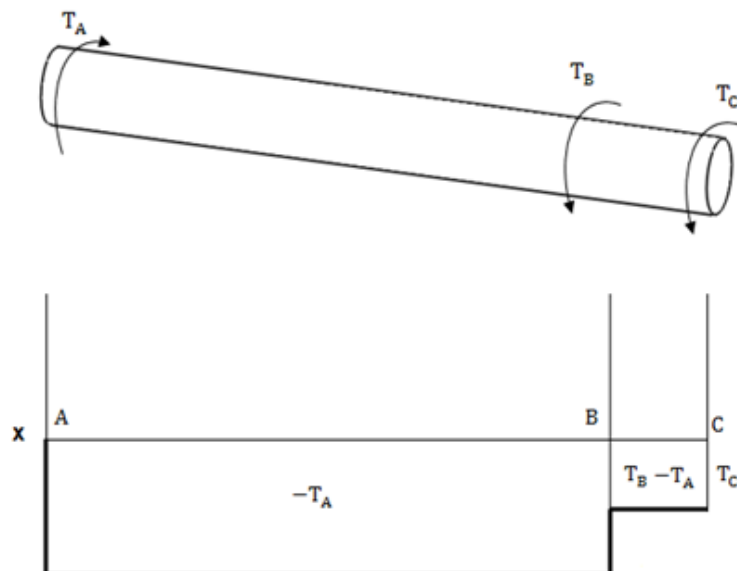
$$T_A = T_B + T_C$$

$$T_B = T_C$$

$$T_A = P_A * L_{cm}$$

El torque en A, se considera debido al peso del péndulo donde el radio es la longitud al centro de masa en la posición horizontal del mismo.

Figura 25. Diagrama de Torque



Fuente: Autores

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3}$$

$$\zeta_{xy} = \frac{16T_A}{\pi d^3}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{S_y}{N}$$

$$\zeta_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + (\zeta_{xy})^2}$$

$$\zeta_{perm} = \frac{\sigma_{perm}}{2}$$

Cuadro 6. Cálculo del eje

NOMENCLATURA	VALOR
Diámetro del eje d (menor)	4 [mm]
Esfuerzo axial en el punto crítico σ_x	5.602.254 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Máximo momento flector M	0,035 [N * m]
Esfuerzo permisible σ_{perm}	165.474.000 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Resistencia a la fluencia S_y	330.948.000 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Factor de seguridad N	2
Esfuerzo cortante en el punto crítico ζ_{xy}	21.485.917 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Peso del péndulo P_A	0,88 [N]
Longitud al centro de masa L_{cm}	312 [mm]
Torque en la sección A-B T_A	0,27 [N * m]
Esfuerzo cortante máximo ζ_{max}	21.667.740 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Esfuerzo cortante permisible ζ_{perm}	82.737.000 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$

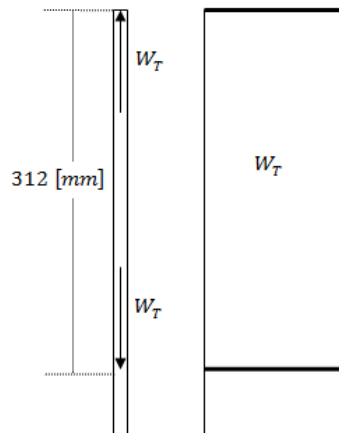
Fuente: Autores

Para los resultados obtenidos, se cumple la condición $\zeta_{max} \leq \zeta_{perm}$, de esta forma se valida la dimensión del diametro del eje.

3.3 Barra

En la figura 18. se observa la sección transversal de la barra.

Figura 26. Diagrama de la barra



Fuente: Autores

$$\sigma_{perm} = \frac{S_y}{N}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{W_T}{A_{req}}$$

$$A_{disp} = \pi(r_{bm}^2 - r_o^2)$$

$$A_{req} \leq A_{disp}$$

Cuadro 7. Cálculo de la barra

NOMENCLATURA	VALOR
Esfuerzo permisible σ_{perm}	17.236.900 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Resistencia a la fluencia S_y	34.473.800 $\left[\frac{N}{m^2}\right]$
Factor de seguridad N	2
Peso del péndulo W_T	0,88 [N]

Área requerida en la barra	0,05 [mm ²]
Radio externo de la barra r_{bm}	8 [mm]
Radio interno de la barra r_o	6 [mm]
Área disponible en la barra	88 [mm ²]

Fuente: Autores

Según los resultados numéricos del cuadro 7, se cumple la condición de que $A_{req} \leq A_{disp}$ implicando que las dimensiones de la barra son suficientes para soportar a carga a la cual está sometida.

4. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES

4.1 Estabilización

La estabilización del péndulo, consiste tal como se indica en mantener el equilibrio del mismo ante cualquier perturbación mediante dos algoritmos de control, uno clásico en este caso el control PID o control proporcional-integral-derivativo y otro moderno llamado control en espacio de estados.

El control de estabilización se activó en un rango de inclinación determinado; para este proyecto se estudia escogiendo un rango entre $\pm 45^\circ$, que referenciado con respecto al eje vertical sería desde un ángulo de 135° (como se muestra en la figura 22) hasta un ángulo de 225° .

4.1.1 Control PID

Con respecto a la llamada ley de control (relación entre la salida y entrada del controlador), existen básicamente tres formas de estas leyes: proporcional, integral y derivativo.

➤ Proporcional

En el control proporcional, la salida del controlador es directamente proporcional a su entrada (la entrada es la señal de error llamada “ e ”), así:

$$\text{Salida} = K_p * e$$

K_p es la constante llamada ganancia proporcional; e es la señal de error y es función del tiempo. Entonces la salida del controlador depende sólo de la magnitud del error en un instante dado y el valor proporcional determina la reacción del error actual. Teniendo en cuenta lo anterior, la función de transferencia $G(s)$ será igual a K_p .

$$G(s) = K_p$$

➤ Integral

En el control integral, la salida del controlador es proporcional a la integral de la señal de error “ e ” con el tiempo, así:

$$Salida = K_i \int_0^t e dt$$

Donde K_i es una constante llamada ganancia integral, tiene unidades de s^{-1} .

e es la señal de error y es función del tiempo.

Eso quiere decir que la salida depende del área bajo la curva de error, entonces la salida en cualquier momento es proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados. Con respecto a la función de transferencia $G(s)$ para este controlador, se tiene:

$$G(s) = \frac{salida(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s}$$

➤ Derivativo

En esta forma de ley de control, la salida del controlador es proporcional a la razón de cambio con el tiempo de error, así:

$$salida = K_d \frac{de}{dt}$$

Donde K_d es una constante llamada ganancia derivativa, tiene unidades de s .

En el control derivativo, cuando la señal de error inicia puede existir una salida de controlador grande dado que es proporcional a la razón de cambio y no al valor del error. Aunque, cuando hay error constante, no hay acción correctiva aún cuando el error sea grande, por esta razón, no se usa esta forma de control aislada de las otras formas de ley control, sino que se combina. Entonces la función de transferencia $G(s)$ queda de la siguiente manera.

$$G(s) = K_d s$$

➤ Proporcional, integral y derivativo

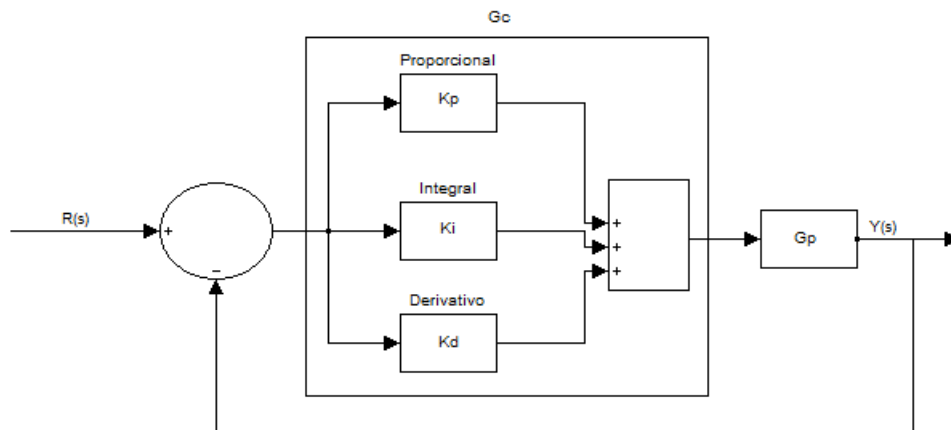
El control proporcional, integral y derivativo llamado PID se conoce como controlador de tres términos, produce el efecto de las tres formas de ley de control combinadas, es decir, la salida es así:

$$Salida = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

Y la función de transferencia obtenida es de la siguiente manera:

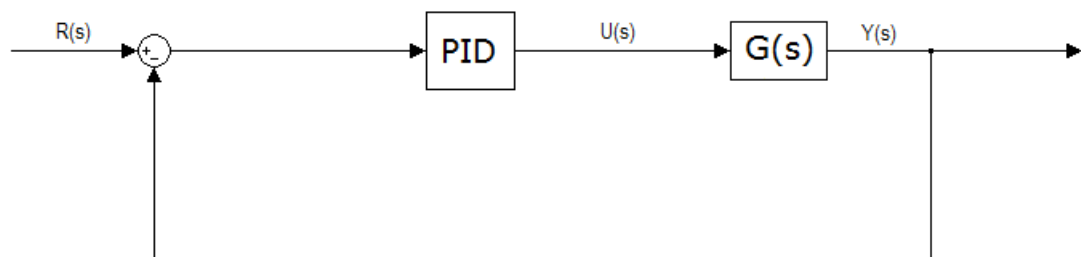
$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Figura 27. Leyes de control PID



Fuente: Autores

Figura 28. Esquema PID del péndulo



Fuente: Autores

Este tipo de control es bastante sencillo y aplicable, sin embargo el control PID no garantiza un control óptimo del sistema ni su estabilidad, además la acción de control es ejecutado en espacio continuo generando una cierta lentitud en la velocidad de respuesta del sistema.

➤ Reglas de sintonización

Cuando es posible obtener un modelo matemático de la planta, se pueden aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Aunque, se puede presentar que en una planta sea complicado obtener el modelo matemático, por lo tanto, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, es necesario recurrir a enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID. Al proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador. Unos de los autores más conocidos son: Ziegler y Nichols quienes sugirieron más reglas para sintonizar los controladores PID (encontrar los valores de **K_p , k_i y k_d**) con base en las respuestas escalón experimentales o basadas en el valor de **K_p** que se produce en la estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional.

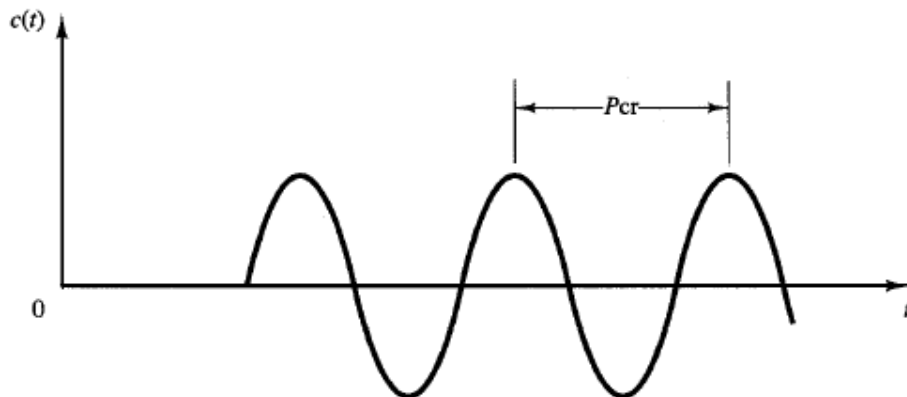
Las reglas de Ziegler-Nichols (Anexo C), son muy útiles cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (También se pueden usar en el diseño de sistemas de los cuales se conocen los modelos matemáticos).

Normalmente la determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID la realizan mediante experimentos sobre la planta, pero usando las reglas mostradas a continuación se tiene una estimación de estos parámetros.

Dado que se tiene el sistema físico montado, para efectos de este proyecto se usa el segundo método regla de Ziegler-Nichols.

El procedimiento realizado para la sintonización, es describe de la siguiente manera: Lo primero es establecer $K_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional, se incrementa K_p de 0 a un valor crítico K_{cr} en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas (Figura 29). Por tanto, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente. Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , k_i y k_d de acuerdo con las fórmulas que se muestran en el cuadro 8.

Figura 29. Oscilación sostenida con un periodo P_{cr}



Fuente: Sistemas de control de ingeniería Nise tercera edición

Cuadro 8. Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica K_{cr} y en el periodo crítico P_{cr} (segundo método)

Tipo de controlador	K_p	t_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Autores

Finalmente, los resultados obtenidos para las respectivas constantes son $K_p=0.1$, $K_i=0.01$ y $K_d=0$ (para el péndulo iniciales). Cabe aclarar que estos valores obtenidos son una estimación para partir, porque se observó experimentalmente que al variar estos valores un poco, se mejora el comportamiento del sistema. Por ello, en últimas los valores usados que dan un buen comportamiento al sistema son $K_p=3$ $K_i=0.001$ y $K_d=0.001$ (finales). En cada prueba estos valores cambian; en el capítulo de pruebas se especifican estos valores tanto para el carro como para el péndulo.

4.1.1.1 Interfaz PID en labview

En esta parte del libro, se presenta la estructura del programa utilizado para controlar el péndulo, el cual está basado en una teoría de control clásico PID. Primero se presentan las diferentes herramientas utilizadas en el programa y luego se explicará el funcionamiento en conjunto de cada una de ellas en la estructura de programación.

Simulation Loop: Es el ciclo dentro del cual se está depurando toda la estructura del programa. Es importante utilizar este en vez de un while loop puesto que presenta una mejor interfaz y permite la configuración de parámetros internos de la simulación, tales como tiempo inicial y final, tiempo de muestreo, periodo, método de solución, etc. Para la configuración interna de la simulación hay que dar click

derecho en el borde negro del bucle para que despliegue la correspondiente ventana.

Figura 30. Herramienta simulation loop



Fuente: Labview 2009

DAQ Assistant: Es la herramienta encargada de adquirir los datos por medio de la tarjeta NI 6216 e introducirlos al ciclo de simulación. Dependiendo de la configuración que se le dé, el DAQ Assistant puede tomar señales análogas (como las enviadas por un encoder) y transformarlas en valores numéricos, como es el caso de este proyecto, que toma los pulsos enviados por el encoder y los transforma en el valor de ángulo en que se encuentra el péndulo.

Figura 31. Herramienta DAQ Assistant

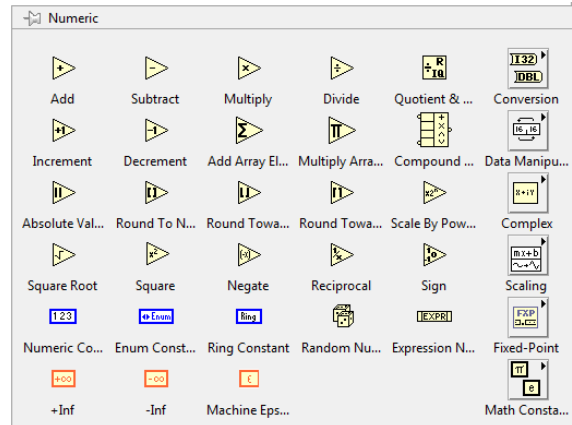


Fuente: Labview 2009

Bloque numéricos: Son aquellos con forma de triángulo y con un signo operacional en su interior. Algunos son tan sencillos que únicamente suman o restan las señales que entran, pero hay algunos otros que cumplen funciones más complejas tales como dividir dos números y mostrar en las salidas el cociente y el

residuo de la división. En este caso fueron utilizados sólo sumas, restas y un bloque **Q & R** que cumple la función anteriormente descrita.

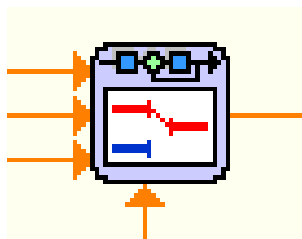
Figura 32. Bloques numéricos Labview



Fuente: Labview 2009

Switch: Es el bloque encargado de limitar una señal de entrada, de acuerdo a un valor de umbral. La entrada superior izquierda es la señal por encima del umbral, la entrada de la mitad es la señal de control, la entrada inferior izquierda es la señal por abajo del umbral y la entrada al inferior del bloque es el umbral. Entonces cuando la señal de control supera el valor de umbral, la señal de salida del bloque será igual a la entrada superior izquierda. Si por el contrario la señal de valor es menor que el valor de umbral, entonces la salida del bloque es igual a la entrada inferior izquierda.

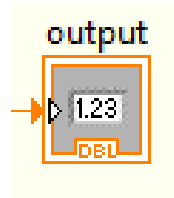
Figura 33. Herramienta Switch Labview



Fuente: Labview 2009

Indicadores y Controles: Son bloques llamados al diagrama con el fin de imprimir el valor de una señal (indicador) o para manipular el valor de una señal (control) desde el panel frontal.

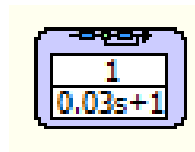
Figura 34. Indicador Labview



Fuente: Labview 2009

Transfer Function: Implementa un modelo del sistema en forma de función de transferencia. Se define el modelo del sistema especificando el numerador y el denominador de la ecuación de la función de transferencia, esto se hace dando click derecho en el bloque para que despliegue la respectiva ventana de configuración. En realidad la función de este bloque dentro del programa es suavizar la señal del ángulo del encoder, puesto que esta es de tipo discreta, el **Transfer Function** la aproxima a una señal continua.

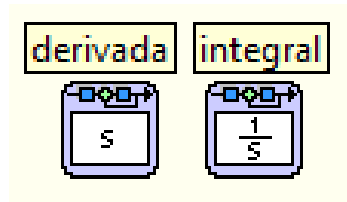
Figura 35. Herramienta Transfer Function Labview



Fuente: Labview 2009

Derivador e integrador: Son herramientas que se encargan de derivar e integrar las señales que se cablean a sus entradas, pero estos sólo funcionan o cumplen correctamente su función si las señales de entrada son de tipo continuas.

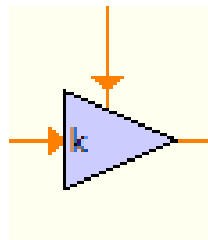
Figura 36. Bloques Derivador e integrador Labview



Fuente: Labview 2009

Gain: Es el bloque encargado de multiplicar la señal de entrada (entrada izquierda) y multiplicarlo por el valor de la ganancia (entrada superior). Es recomendable utilizar este bloque en vez de un bloque multiplicador común, pues el manejo de señales en el **Simulation Loop** es más preciso con esta herramienta.

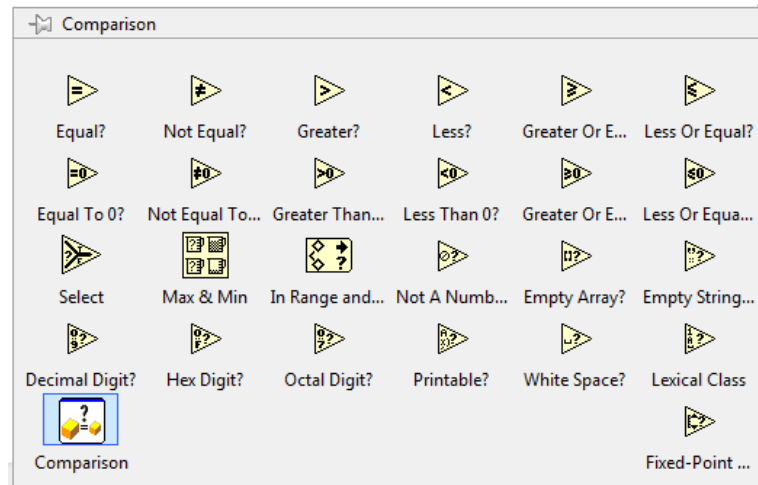
Figura 37. Herramienta Gain Labview



Fuente: Labview 2009

Bloques de comparación: Estos bloques se caracterizan por que manejan señales de orden lógico (1 ó 0). Algunos cumplen tareas tan sencillas como comparar dos números e imprimir una señal de falso o verdadero. Mientras que otros como el **Bloque Select** imprimen una u otra señal de salida de acuerdo con la entrada lógica, si es verdadera o falsa (1 y 0 respectivamente).

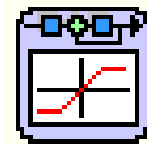
Figura 38. Bloques de comparación Labview



Fuente: Labview 2009

Saturation Function: Esta herramienta limita el valor de la señal a un rango que es especificado dentro de las configuraciones del bloque, esta configuración se hace dando click derecho en el bloque. En este caso se ha utilizado para limitar la señal de salida del control PID de -100 a 100, ya que este es el valor del ciclo de carga del PWM enviado al puente h.

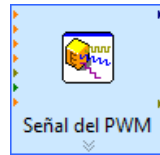
Figura 39. Bloque Saturation Function Labview



Fuente: Labview 2009

Simulate Signal Express: Este bloque es utilizado para configurar la señal de PWM que es enviada al puente h por medio del puerto número 12 de la tarjeta NI 6216. La señal de entrada a este bloque es la salida del control PID que está dada en porcentaje y esta es el valor del ciclo de carga del PWM.

Figura 40. Bloque Simulate Signal Express Labview

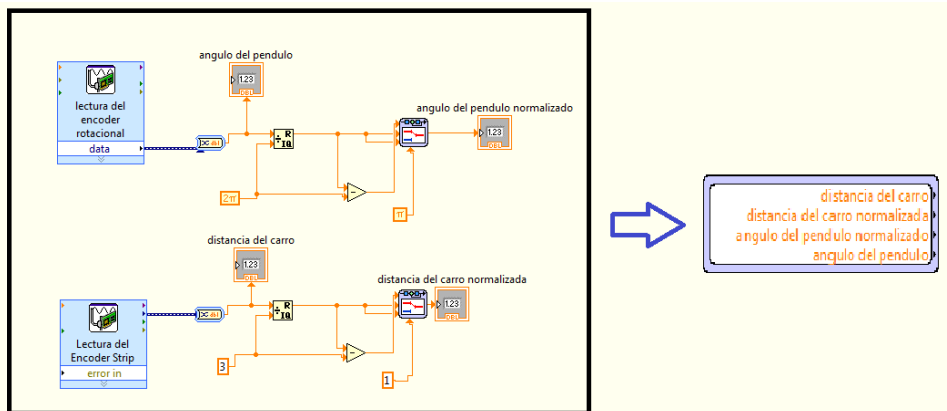


Fuente: Labview 2009

En este programa se han utilizado dos lazos de control PID en serie, uno para el control de la verticalidad del péndulo y el otro para centrar el carro en una zona específica. Se puede decir que las entradas a los controles son las lecturas de los ángulos de la barra y de los metros recorridos por el carro, estos son procesados en los controles y generan la salida de ciclo de carga del PWM.

El subsistema mostrado en la figura 41 es utilizado para ordenar el diagrama de bloques y reducir el espacio. Dentro del subsistema hay un diagrama de bloques que es el encargado de leer los valores de los ángulos y los metros del carro. Los valores de los ángulos son normalizados de tal manera que cuando la barra se encuentre en su posición vertical el encoder esté registrando un valor de cero radianes, sin importar si la subida se hizo en sentido de las manecillas del reloj o sentido contrario.

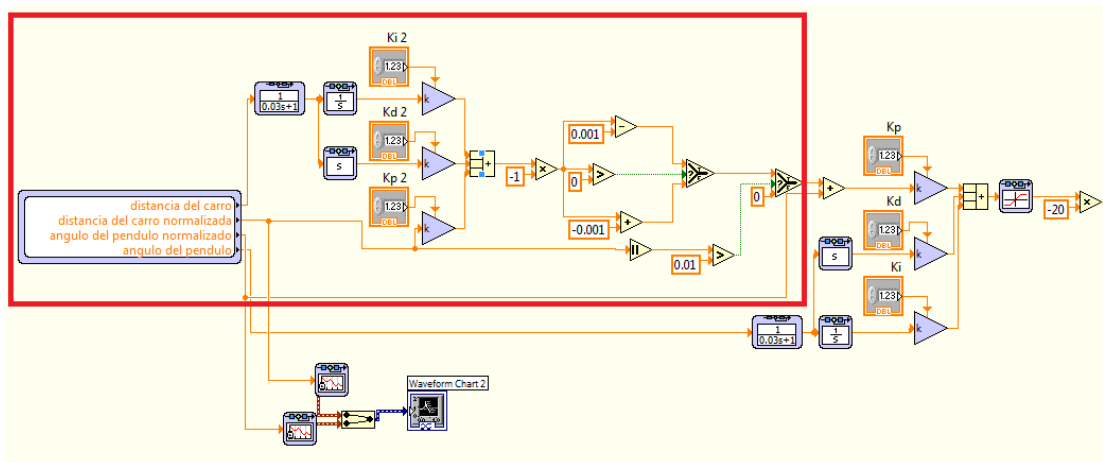
Figura 41. Subsistema



Fuente: Labview 2009

La sección del diagrama encerrada en el recuadro rojo (ver figura 42) es el primer lazo de control, el cual toma la lectura del encoder strip (en metros) la deriva y la integra para luego multiplicarlos por sus respectivas constantes (K_p , K_d y K_i). La salida de este lazo de control es un desfase que se le suma al set-point del segundo lazo de control (encargado de controlar la verticalidad de la barra). Entonces si el valor absoluto de la lectura del encoder es mayor que cero, este valor es procesado por el control y se genera un desfase que luego es sumado o restado (si está a la derecha o izquierda del cero respectivamente) al valor del set-point del segundo lazo de control. En este punto cabe resaltar que el error es igual al valor de la lectura de los encoders puesto que en ambos casos el set-point es cero. En realidad este lazo resulta ser un control PD puesto que el valor de la constante integral es cero, como veremos más adelante en la figura del panel frontal.

Figura 42. Primer lazo de control

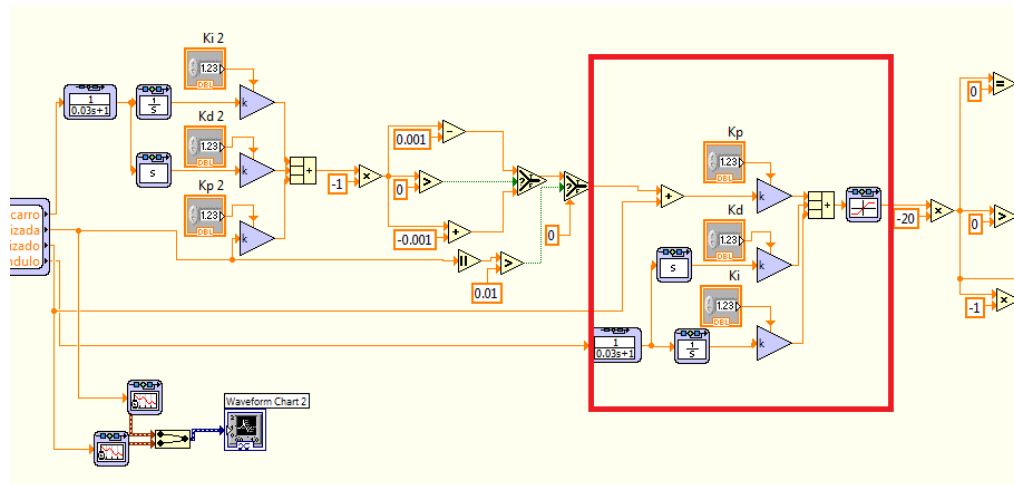


Fuente: Labview 2009

La parte del diagrama de bloques, señalada en la figura 43, es el segundo lazo de control, el cual recibe la señal de salida del primer lazo. Como la acción proporcional es la más significativa de las tres (y el control se debe en gran parte a esta) se ha decidido sólo introducir el desfase del set-point en esta señal. Las otras dos acciones, integral y derivativa se manejan con el mismo set-point de salida

(igual a cero). En este punto del diagrama, la salida es un número que varía desde menos cinco hasta cinco, luego es multiplicada por menos veinte (el signo negativo invertirá la señal, lo que se hizo necesario por el uso de los optoacopladores 6N137 y 4N25 para convertirla en el porcentaje del ciclo de carga.

Figura 43. Segundo lazo de control

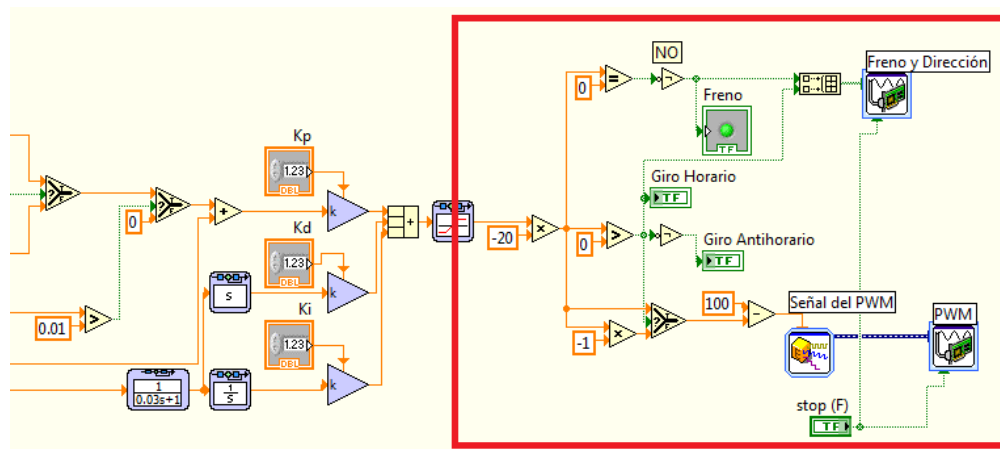


Fuente: Labview 2009

En la figura 44 se muestra la parte del diagrama encargada del control del motor. Como se está utilizando el puente H LMD 18200 para amplificar la señal de voltaje que entra al motor, se dio la necesidad de programar una sección, que prosiga con la idea de control de acuerdo a los puertos manejados en el chip LMD 18200. Entonces la idea es que cuando el ciclo de carga es positivo, la señal enciende el led de giro horario, y mediante el puerto digital de la tarjeta se envía una señal de cinco voltios al pin de **Dirección** del puente h, lo que permite el giro horario del motor. Por el contrario si el ciclo de carga es negativo, el led de giro horario se apaga, enviando una señal de cero voltios al pin de dirección del puente h y esto hace que el motor gire en sentido anti-horario. También existe un pin de **Freno**, que en este caso se activa cuando el ciclo de carga es igual a cero. Cabe resaltar que lo anteriormente descrito se aplica sólo si se tiene conectado el puente h directamente a la tarjeta, pero como en este caso surgió la necesidad de dividir las

tierras mediante el uso de unos optoacopladores (con el fin de evitar desfases en las lecturas de los encoders, causados por los picos de corriente que envía el motor al cambiar el sentido de giro) y estos funcionan de forma inversa en sus pines de salida, hay que anteponer un bloque **NO** a la entrada del pin de **Freno**, y a cien restarle la señal de salida que va al puerto de **Duty cycle** del bloque **Simulate Signal Express** (ver figura 40). Las conexiones y respectivas advertencias se pueden ver en el manual de usuario (**anexo L**).

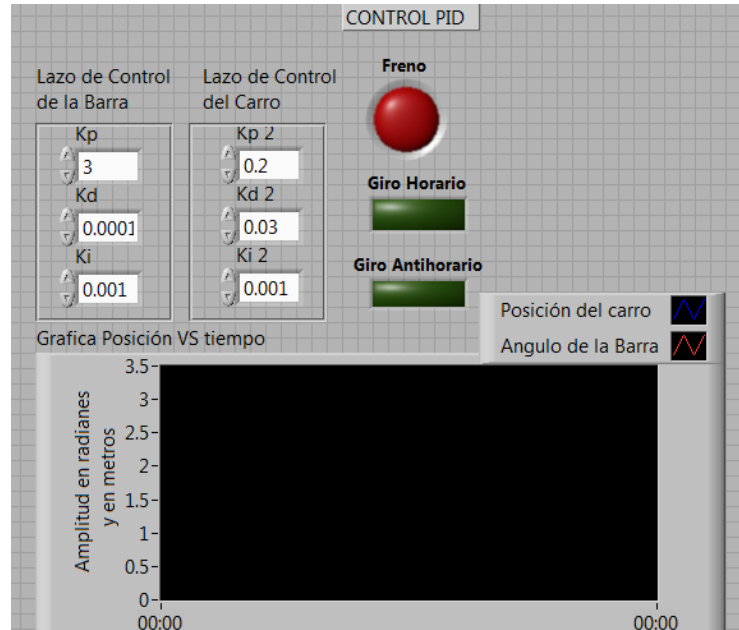
Figura 44. Control del motor en el PID



Fuente: Labview 2009

Por último se muestra en la figura 45 la interfaz del programa con el usuario en el panel frontal de Labview, donde se imprimen los valores del ángulo de la barra (en radianes) y la posición del carro (en metros) con el fin de observar el comportamiento de estos dos elementos y tomar datos para las respectivas pruebas y posterior análisis. También se pueden observar los recuadros para las configuraciones de los valores de las respectivas contantes de cada lazo y los estados lógicos de los leds de sentido de giro.

Figura 45. Panel Frontal del PID



Fuente: Labview 2009

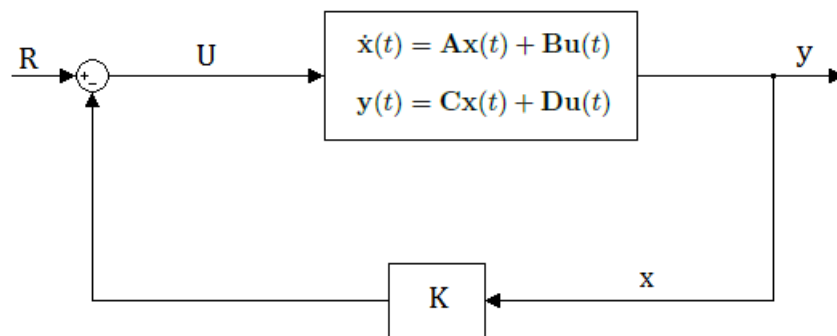
4.1.2 Control en espacio de estados

Se define estado de un sistema, como la mínima cantidad de información necesaria en un instante, para que, conociendo la entrada a partir de ese instante, se pueda determinar cualquier variable del sistema en cualquier instante posterior”. El control moderno se basa en la representación matemática matricial de los sistemas dinámicos por medio del concepto de estado, en contraposición con la “teoría clásica de control”, que utiliza únicamente la relación entre su entrada y su salida. El control en espacio de estados, es una técnica moderna con dominio en el tiempo, usada para sistemas que manejan condiciones iniciales diferentes a cero o sistemas con más de una entrada y/o salida. El uso de la notación matricial simplifica enormemente la representación matemática de los sistemas de

ecuaciones, lo cual implica que un incremento en la cantidad de variables no aumenta la complejidad de las ecuaciones.

El esquema básico de este tipo de control de un sistema de realimentación de variables de estado completo es mostrado a continuación. En él, 'R' representa la señal de referencia (posición deseada del carro), 'u' es la señal de control que se introduce al sistema definido por las matrices [F, G, H, J], 'K' es la matriz de control, 'x' el vector de variables de estado y 'Y' el vector que contiene la salida del sistema.

Figura 46. Esquema control en espacio de estados



Fuente: Autores

La representación matricial de las variables de estado, parten de las ecuaciones dinámicas del sistema, que para este caso particular del péndulo invertido se muestran como se obtienen las mismas.

De las ecuaciones obtenidas en el capítulo 2, despreciando las fricción en el carro y suponiendo que el momento de inercia del péndulo con respecto a su propio centro de gravedad es cero; se linealiza y se llega al siguiente comportamiento dinámico del sistema para proceder a obtener el sistema matricial.

$$MI\ddot{\theta} = (M + m)g\theta - U$$

$$M\dot{x} = U - mg\theta$$

Se definen las variables de estado, de la siguiente manera:

$$x_1 = \theta$$

$$x_2 = \dot{\theta}$$

$$x_3 = x$$

$$x_4 = \dot{x}$$

Derivando,

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{M+m}{Ml}gx_1 - \frac{1}{Ml}U$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{m}{M}gx_1 + \frac{1}{M}U$$

Matricialmente, se representa así:

Figura 47. Matrices espacio de estados

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M+m}{Ml}g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{m}{M}g & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Ml} \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{pmatrix} U$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Fuente: Autores

Para los valores datos en el cuadro 4, se obtienen las siguientes matrices:

Figura 48. Espacio de estados péndulo invertido

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 44,48 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4,07 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -14,77 \\ 0 \\ 14,77 \end{pmatrix} U$$

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix}$$

Fuente: Autores

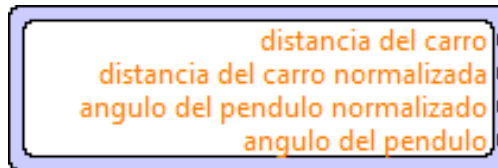
4.1.2.1 Interfaz espacio de estados en Labview

En esta sección del libro se presenta el programa hecho para controlar el péndulo, basado en una metodología de control moderno llamada espacio de estados. Las herramientas utilizadas en este programa son las mismas que se utilizaron en la programación PID, sólo que en este caso se les da una orientación distinta para que cumplan con las especificaciones de un control en espacio de estados. Por ende se procede directamente a la explicación del diagrama de bloques.

Se hace la normalización del ángulo en el mismo subsistema que se utilizó en el control PID (ver Figura 49). Esta normalización del ángulo es hecha con el fin de controlar la barra en su posición vertical, sin importar si la subida se hizo en sentido horario o antihorario. En ese bloque también se definen las variables iniciales para los estados que serán utilizados en el control. Se definieron estos cuatro estados del sistema por ser considerados los más fáciles de adquirir y los de mayor importancia en el control. También se hubiera podido tomar fuerzas y

aceleraciones, pero sería necesario otro tipo de instrumentación en el banco y además su influencia en el control no se considera de gran transcendencia.

Figura 49. Subsistema de estados

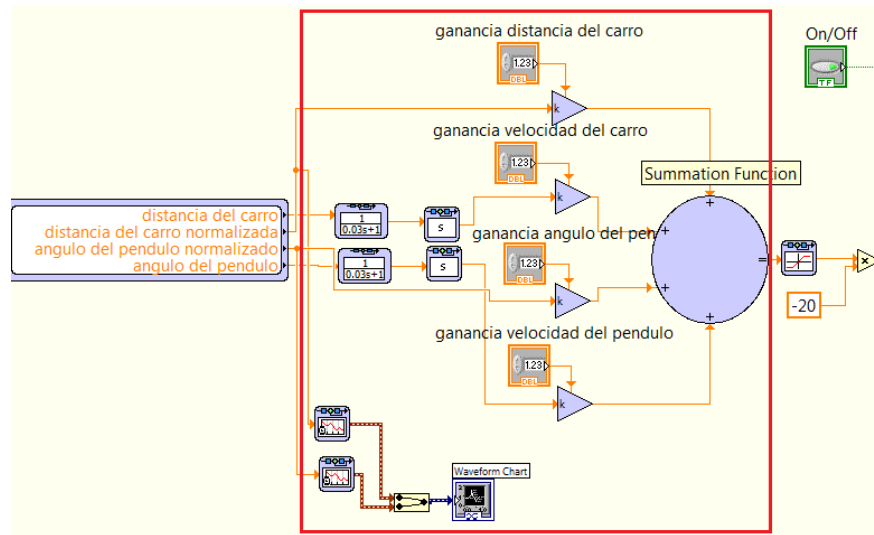


Fuente. Labview 2009

En esta sección del diagrama de bloques (ver figura 50) se toman las variables no normalizadas, se suavizan y se derivan para definir los respectivos estados (velocidad del carro y velocidad del péndulo). Los otros dos estados (posición del péndulo y del carro) son definidos de manera directa por las variables, distancia del carro y ángulo del péndulo. Luego se aplican las respectivas ganancias a cada uno de los estados, para después ser convertidos en la señal de control mediante la herramienta **Summation Function**, que es especial para hacer sumas de señales de tipo matricial o escalar.

En esta parte también se hace la impresión de la señales de interés en el estudio de la estabilidad del péndulo (posiciones del carro y la barra) con la herramienta **Waveform Chart**.

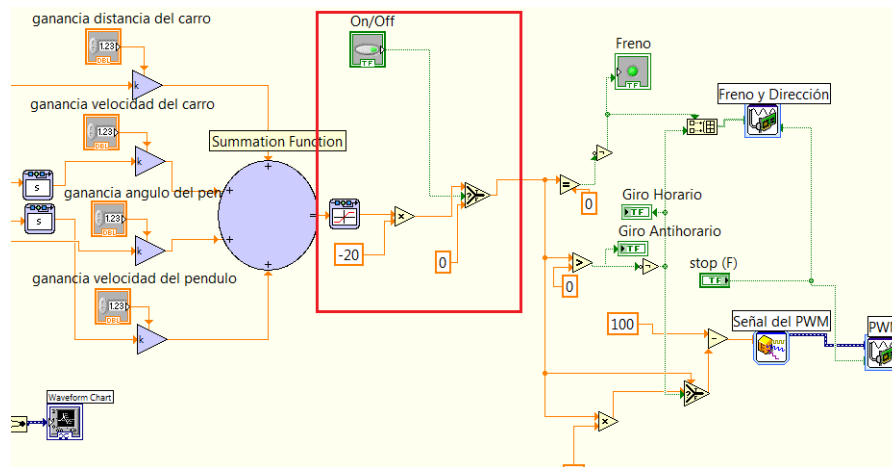
Figura 50. Definición de estados y ganancias



Fuente. Labview 2009

En esta sección del diagrama de bloques se hace la limitación de la señal de control (ciclo de carga del PWM) entre valores de cien y menos cien. También se utiliza la herramienta **on/off** con el fin de manipular el encendido del banco desde el computador.

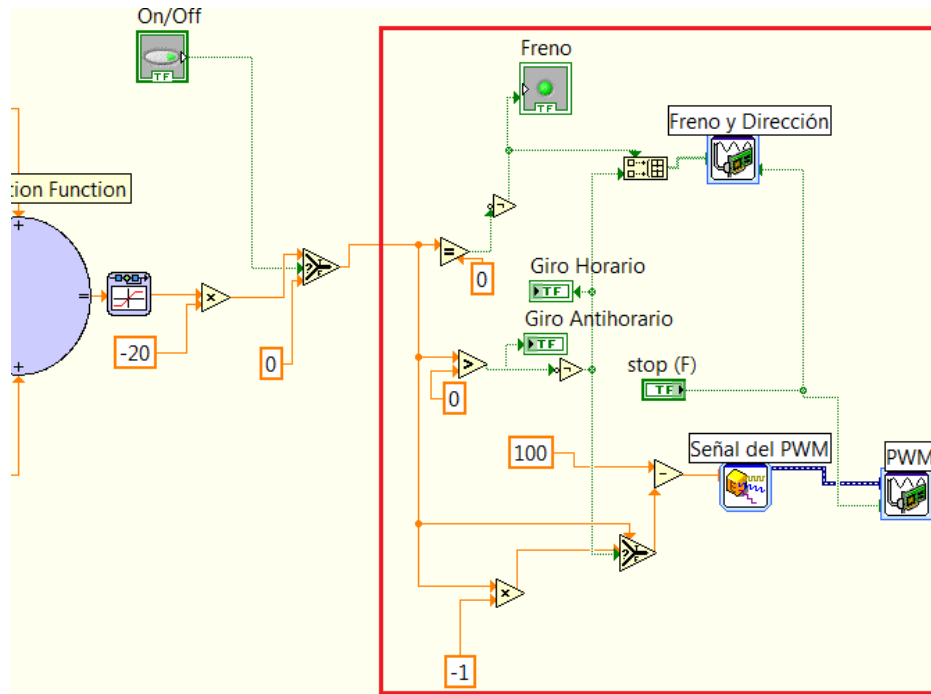
Figura 51. Limitación de la señal de control



Fuente. Labview 2009

Esta última parte del diagrama (figura 52) es la misma que fue utilizada en el control PID, que es la encargada del control del motor, mediante las señales digitales de freno y dirección y la señal analógica de PWM.

Figura 52. Control del motor en el espacio de estados



Fuente. Labview 2009

Por último se muestra el panel frontal del control, donde se hace la sintonización de las ganancias y donde se pueden ver gráficas de las posiciones del carro y la barra.

Figura 53. Panel frontal del espacio de estados



Fuente. Labview 2009

5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Caracterización de las curvas

La respuesta en el tiempo de un sistema de control consta de dos partes; la respuesta transitoria, que se refiere a la que va del estado inicial al estado final, y la respuesta en estado estable que es la entregada por el sistema cuando el tiempo tiende a infinito. Por tanto la respuesta de un sistema de control se puede escribir como:

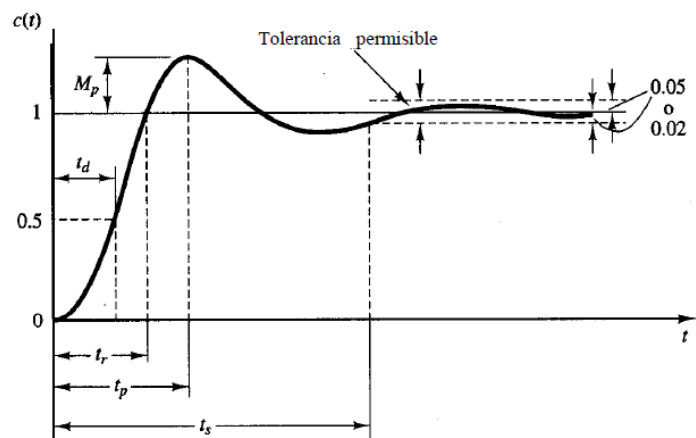
$$C(t) = C_{tr} + C_{ss} (t \rightarrow \text{infinito})$$

5.1.1 Respuesta transitoria

La respuesta transitoria para una entrada escalón depende de las condiciones iniciales. Para efectos de comparación de varios sistemas, es una práctica común usar la condición inicial estándar de que el sistema está en reposo al inicio, por lo cual la salida y todas las derivadas con respecto al tiempo son cero. Así, las características de respuesta se comparan con gran facilidad.

Para la caracterización de la respuesta transitoria, de un sistema de control a una entrada escalón, generalmente se especifican las siguientes variables:

Figura 54. Respuesta transitoria

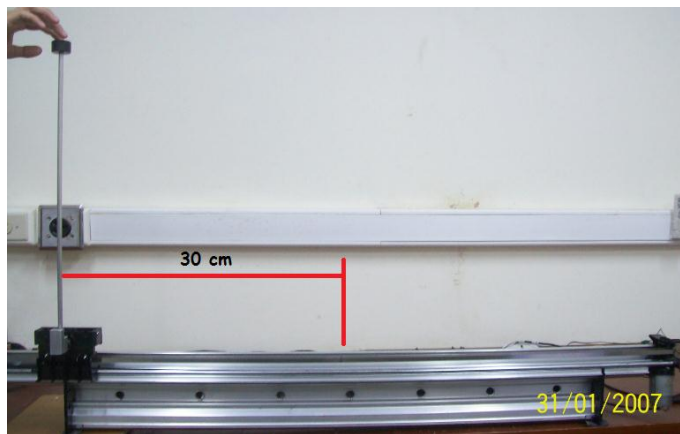


Fuente. Web Wikipedia

- Tiempo de retardo, **td**: El tiempo de retardo es el tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final.
- Tiempo de levantamiento, **tr**: El tiempo de levantamiento es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 0 al 100% de su valor final.
- Tiempo pico, **tp**: El tiempo pico es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico del sobrepaso.
- Sobrepaso máximo, **Mp**: El sobrepaso máximo es el valor pico máximo de la curva de respuesta. Para este caso se da en porcentaje (valor del sobrepaso entre el valor de la entrada escalón) y en metros.

Para el caso de este proyecto, se generó una entrada escalón para el control del posicionamiento del carro, de la siguiente manera: Se hace correr el programa con el carro ubicado en el centro del banco y la barra en posición, luego se ubica el carro en el extremo izquierdo del banco (a treinta centímetros del centro) con la barra en la posición vertical (ver figura 55), se enciende el switch del motor y se toman las respectivas lecturas en las gráficas. Este procedimiento se repitió para el control PID y espacio de estados en las mismas condiciones (velocidad de muestreo igual) para asegurar una comparación válida.

Figura 55. Prueba para la respuesta transitoria

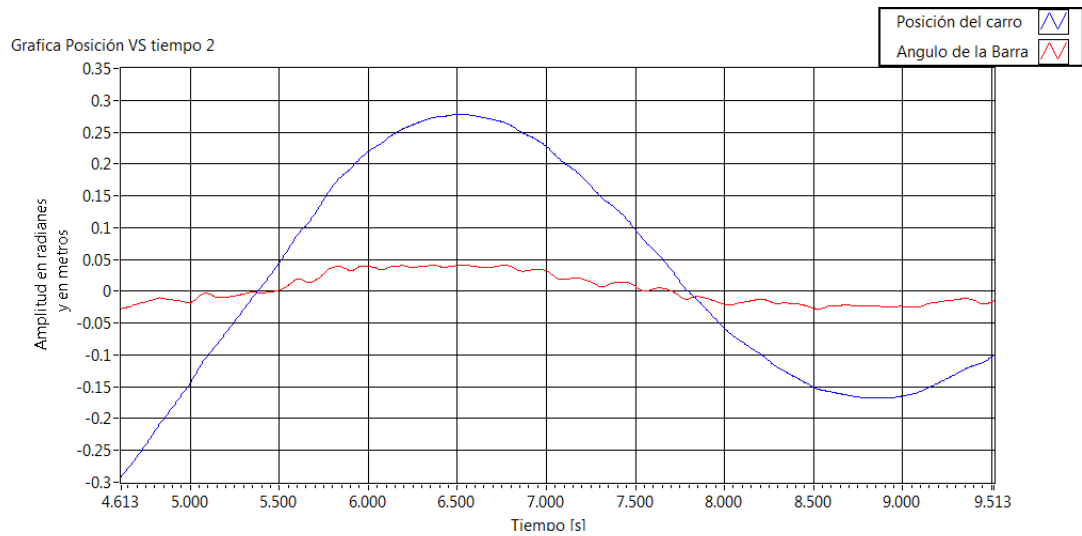


Fuente. Autores

5.1.2 Resultados de la respuesta transitoria

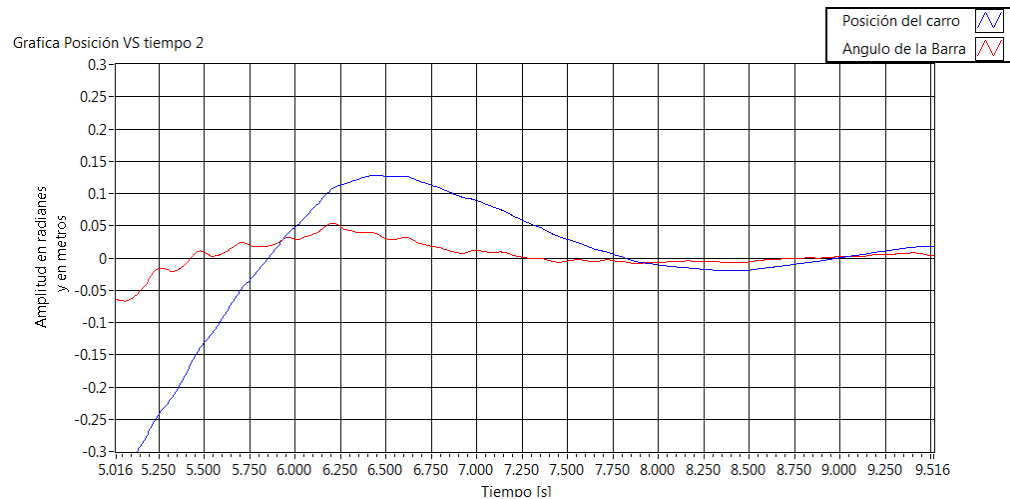
En seguida se muestran las gráficas que se presentaron en la depuración de cada uno de los controles, para esta prueba.

Figura 56. Respuesta transitoria del control PID



Fuente. Labview

Figura 57. Respuesta transitoria del control en espacio de estados



Fuente. Labview

Cuadro 9. Respuesta transitoria de los controles PID y espacio de estados para la posición del carro

Control	Tiempo de retardo [s]	Tiempo de levantamiento [s]	Tiempo pico [s]	Sobrepaso máximo en % y en [m]
PID	0.375	0.75	1.9	90 [0.27]
Espacio de Estados	0.3	0.7	1.35	43 [0.13]

Fuente. Autores

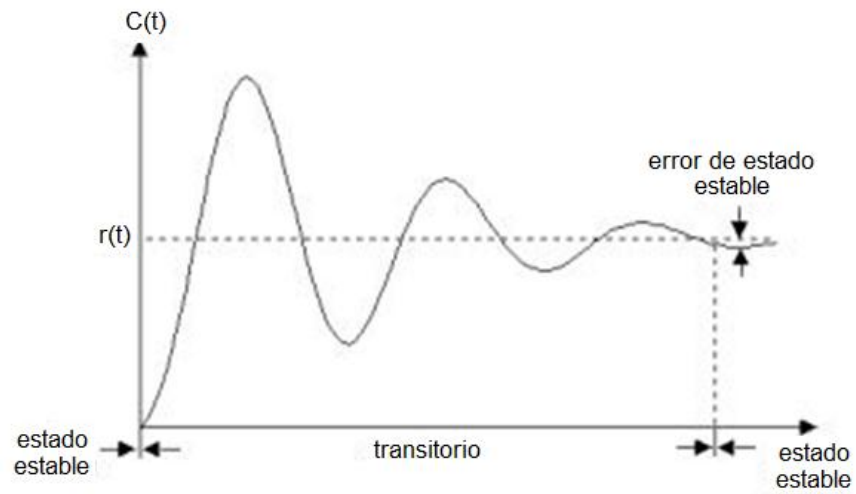
El cuadro 9 se completó con los valores suministrados por las figuras de las pruebas en cada tipo de control, las cuales fueron las mejores entre diez muestras.

5.1.3 Error en estado estable

Si la salida de un sistema de control en estado estable, no coincide con el valor deseado (set-point igual a cero en este caso) se dice que el sistema tiene un error en estado estable (ver figura 58). Para definir totalmente un sistema de control hay que tener en cuenta tanto las variables evaluadas en estado transitorio como el error estado estable.

Como el tiempo de estabilización depende del sistema de control, se puede presentar el caso de que uno de los sistemas de control estabilice con mayor rapidez que el otro. Para efectos de comparación, se tomará como el error en estado estable al valor máximo de posición del carro y de ángulo de la barra, presentados 21 segundos después de haber depurado el programa. También se pretende dar un estado de oscilación del control en estado estable, para tener una idea del comportamiento del programa. El procedimiento es el mismo para los dos tipos de controles manejados en este proyecto.

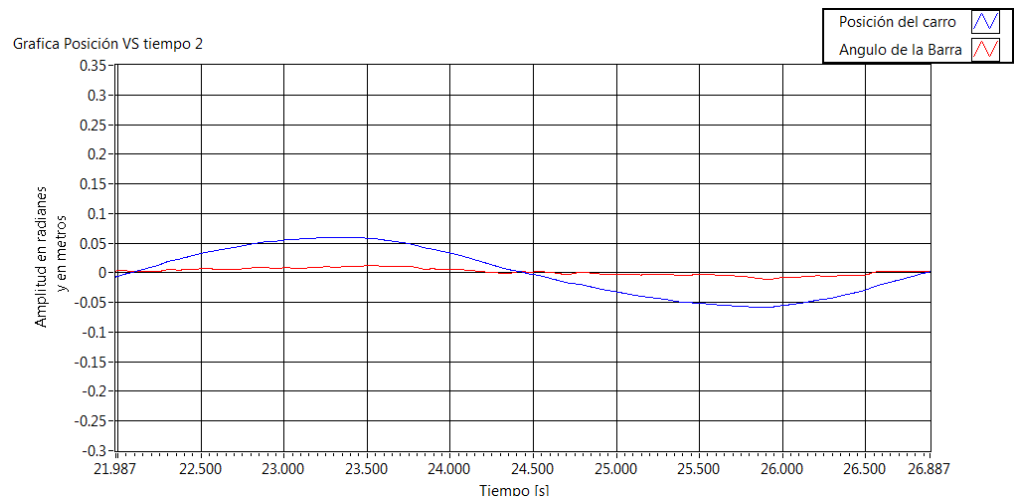
Figura 58. Error en estado estable



Fuente. Web Wikipedia

5.1.4 Resultados del error en estado estable

Figura 59. Error en estado estable para el control PID



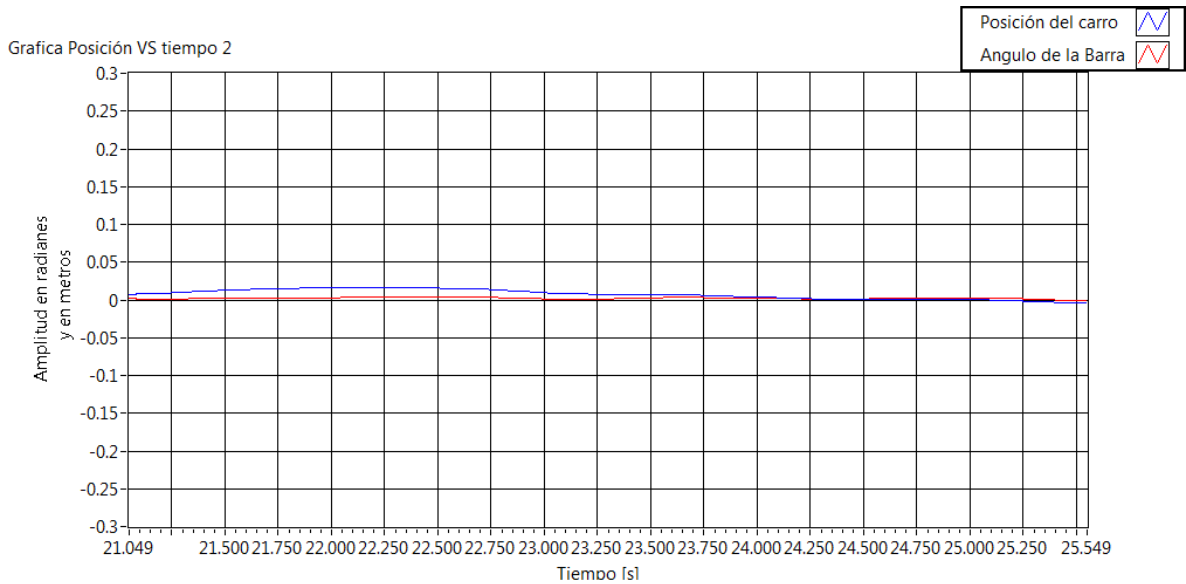
Fuente. Labview

Cuadro 10. Error en estado estable para el control PID

Control de la posición	Error en estado estable [m]	Estado
De la barra [rad]	0.015	Oscilaciones permanentes
Del carro [m]	0.06	

Fuente. Autores

Figura 60. Error en estado estable para el control en espacio de estados



Fuente: Labview

Cuadro 11. Error en estado estable para el control en espacio de estados

Control de la posición	Error máximo	Estado
De la barra [rad]	0.004	Sin oscilaciones
Del carro [m]	0.02	

Fuente. Autores

5.2 Prueba con perturbación

Para garantizar que la perturbación es la misma en ambos casos, se hizo de la siguiente manera: Se puso a funcionar el control con la barra en su posición de reposo, luego la barra se pone en su posición vertical y se activa el switch del motor, después que se halla estabilizado el control se aplica la perturbación (se desplaza con la mano el péndulo hasta treinta centímetro a la izquierda del cero en el banco).

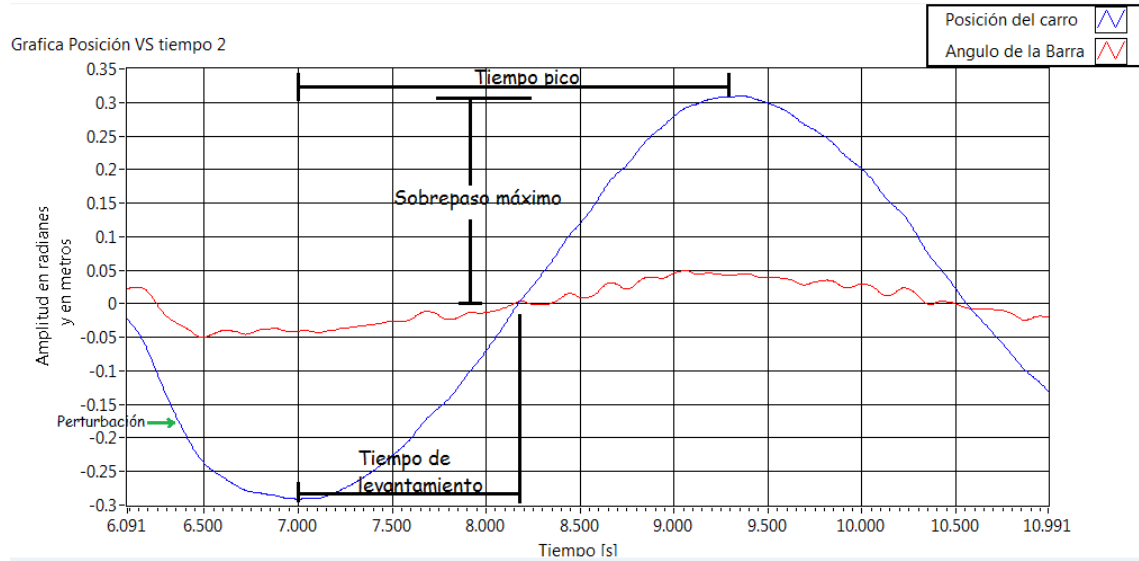
Cabe aclarar la diferencia de este tipo de procedimiento con el anteriormente descrito, de la entrada escalón: En la entrada escalón la iniciación del control se hace con el sistema en reposo, mientras que la perturbación se hace con el control ya ejecutándose (switch del motor encendido).

5.2.1 Resultados de la prueba con perturbación

Se tomaron como punto de comparación tres medidas presentes en la siguientes graficas; tiempo de levantamiento, que se mide desde la mitad del pico de la perturbación, hasta que las curvas pasan por el set-point (cero en ambos casos). El tiempo pico, que es medido desde la mitad del pico de perturbación hasta la mitad del pico de sobrepaso máximo. Y el valor del sobrepaso, que para efectos comparativos, se dará en porcentaje y en las respectivas unidades.

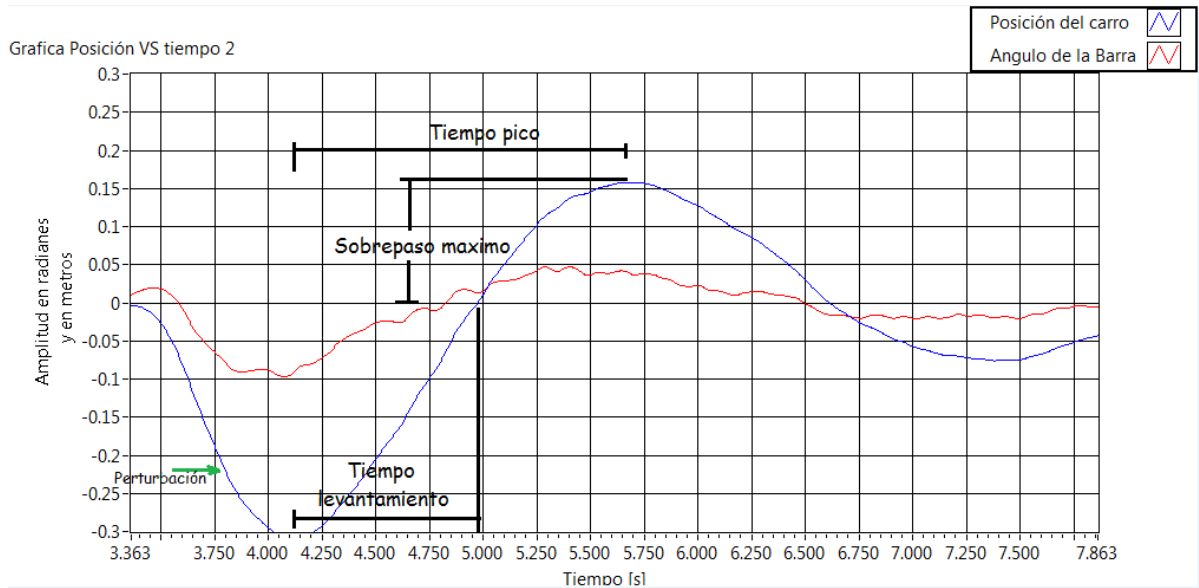
Para simplicidad del análisis de las gráficas, sólo se tendrán en cuenta los tiempos de levantamiento y pico para el posicionamiento del carro, para el posicionamiento de la barra sólo se tendrá en cuenta el sobrepaso máximo.

Figura 61. Prueba con perturbación en el control PID



Fuente. Autores

Figura 62. Prueba con perturbación en el control en espacio de estados



Fuente. Autores

Cuadro 12. Resultados de la perturbación

Control	Tiempo de levantamiento para la posición del carro [s]	Tiempo pico para la posición del carro [s]	Sobrepaso del ángulo de la barra [rad]	Sobrepaso de la posición del carro [m]
PID	1.2	2.25	100% [0.05]	100% [0.31]
Espacio de estados	0.9	1.6	50% [0.05]	53% [0.16]

Fuente: Autores

Los porcentajes tomados para el cuadro anterior, se obtuvieron dividiendo el valor del pico de perturbación entre el pico de sobrepaso máximo, para los dos posicionamientos.

5.3 Pruebas con las ganancias

El valor de las ganancias en cada tipo de control es de vital importancia. Con algunas ganancias el sistema presenta mejor comportamiento en estado estable, y con otras presenta una mejor respuesta transitoria o en la perturbación. En este caso para efectos de comparación se realizaron las pruebas variando el valor de las ganancias, y observando el comportamiento frente a una perturbación hecha de la misma forma que se hizo en la prueba anterior (inciso 5.2). En este caso sólo se va a evaluar el tiempo de levantamiento, el tiempo pico, y el sobrepaso máximo para la posición del carro (línea azul).

El valor a variar en cada una de las ganancias, fue de acuerdo a las observaciones hecha por los autores, buscando que se presentara algún comportamiento relevante en cada prueba con respecto a las demás.

5.3.1 Pruebas con ganancias para el control PID

Teniendo en cuenta la acción generada por cada una de las ganancias en un control PID frente a una entrada escalón o una perturbación, se realizaron pruebas de cambio de ganancias de la siguiente manera. Se cambiaron por pares cada una de las constantes de los dos lazos de control (posición de la barra y el carro) teniendo como referencia el valor de las constantes del control PID mostrado en la figura 61, para luego observar el comportamiento de las posiciones del carro y la barra (ver cuadro 14).

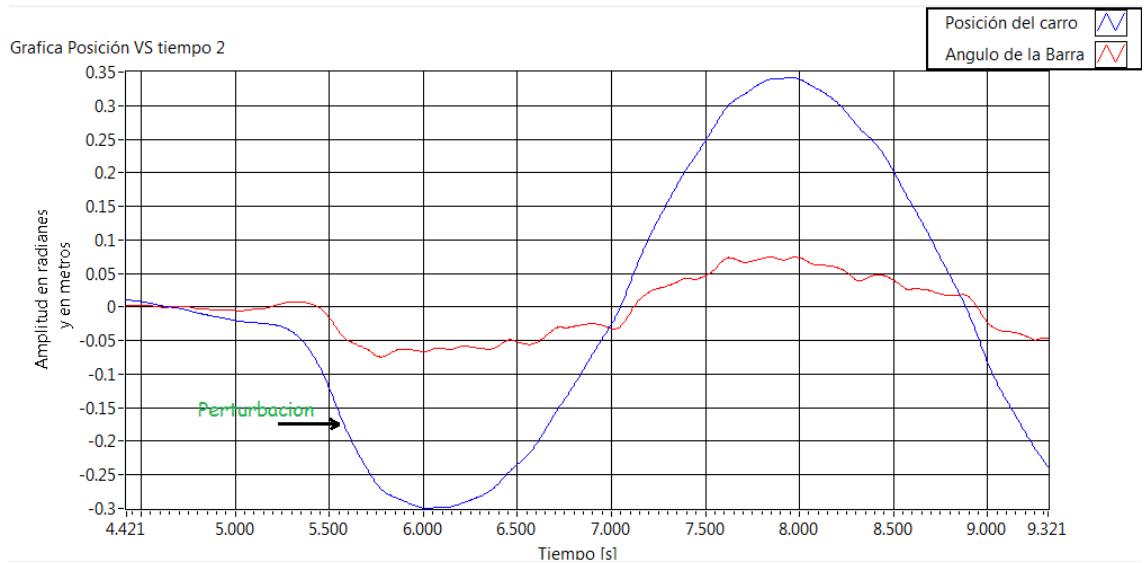
Cuadro 13. Variación de las ganancias para el control PID

Prueba numero	Kp	Kp2	Kd	Kd2	Ki	Ki2
Referencia	190	0.13	5	0.076	0.04	0.01
1	220	0.2	5	0.076	0.04	0.01
2	190	0.13	6	0.1	0.04	0.01
3	190	0.13	5	0.076	0	0

Fuente. Autores

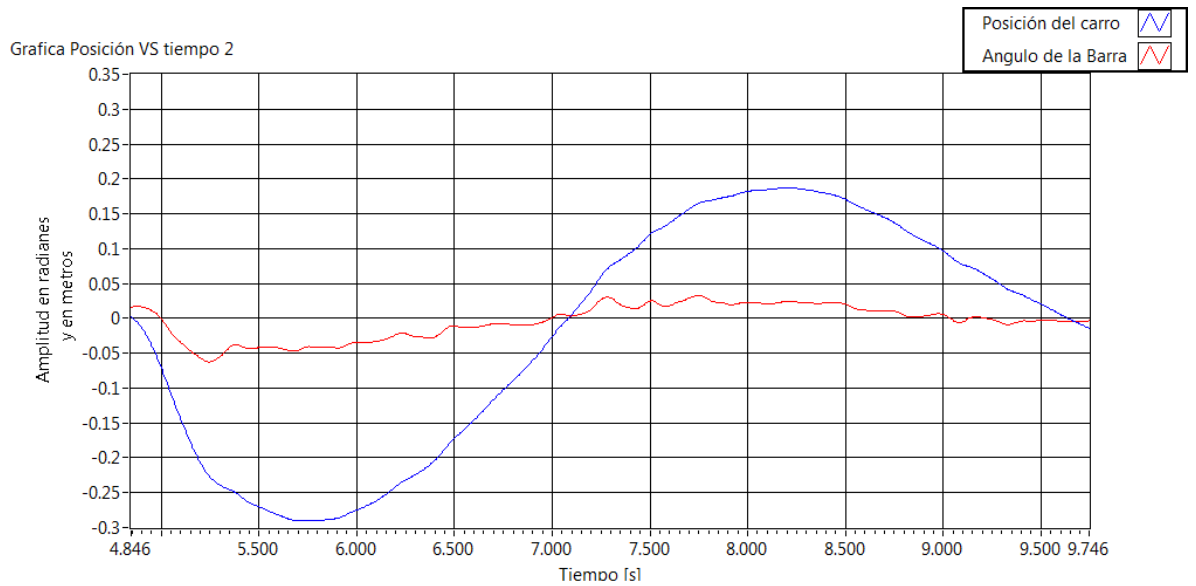
5.3.2 Resultados de las pruebas con ganancias para el control PID

Figura 63. Prueba 1 con ganancias para el control PID



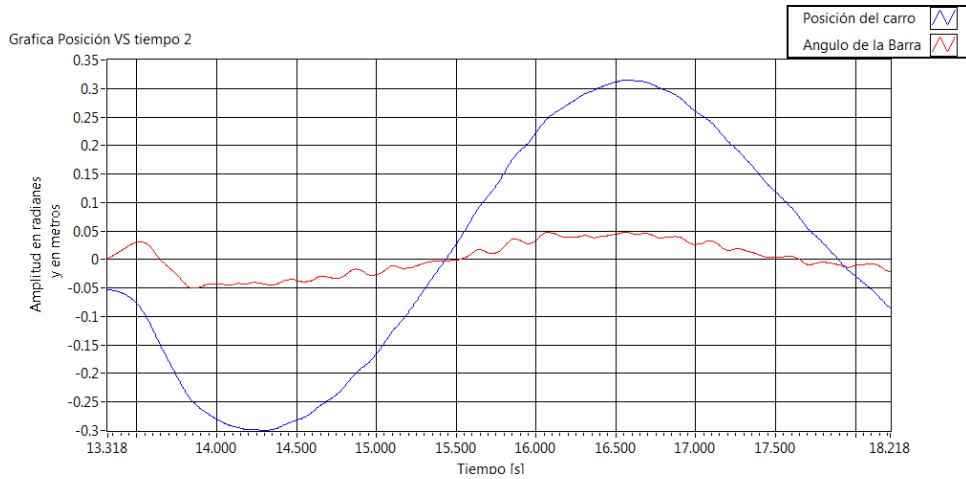
Fuente. Labview

Figura 64. Prueba 2 con ganancias para el control PID



Fuente. Labview

Figura 65. Prueba 3 con ganancias para el control PID



Fuente. Labview

5.3.3 Pruebas con ganancias para el control espacio de estados

Para el espacio de estados, se tomó como referencia el valor de las ganancias de la prueba con perturbación presentada en el inciso 5.2 (ver cuadro 14) y se procedió a cambiar una por una las ganancias, observando el respectivo comportamiento. Los respectivos análisis para cada comportamiento se harán más adelante en el inciso 5.4.

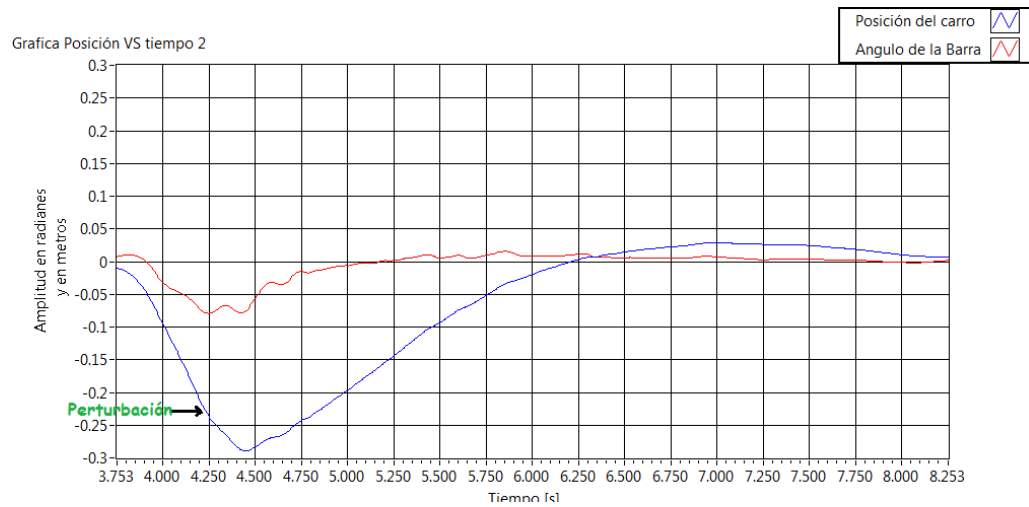
Cuadro 14. Variación de las ganancias para el control en espacio de estados

Prueba Número	Ganancia de la distancia del carro	Ganancia de la velocidad del carro	Ganancia del ángulo del péndulo	Ganancia de la velocidad del péndulo
Referencia	-50	-32	220	12
1	-30	-32	220	12
2	-50	-25	220	12
3	-50	-32	180	12
4	-50	-32	220	11

Fuente. Autores

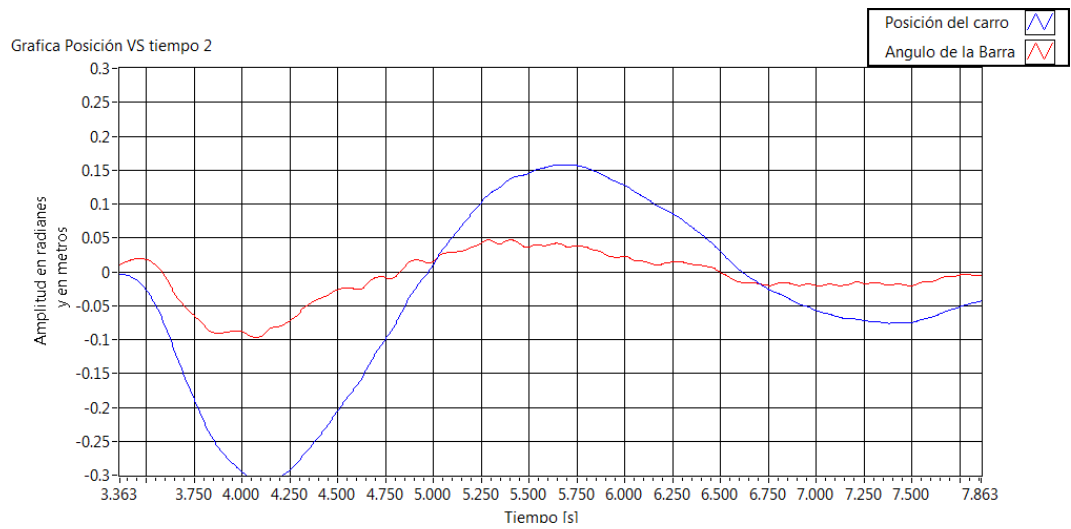
5.3.4 Resultados de las pruebas con ganancias

Figura 66. Prueba 1 con ganancias para el control en espacio de estados



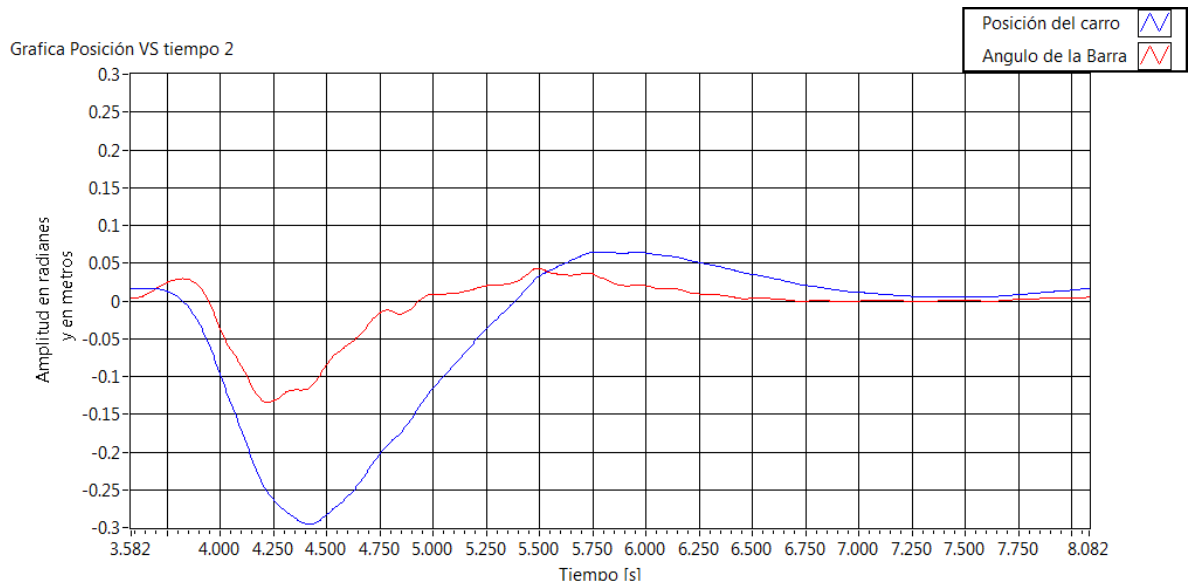
Fuente. Labview

Figura 67. Prueba 2 con ganancias para el control en espacio de estados



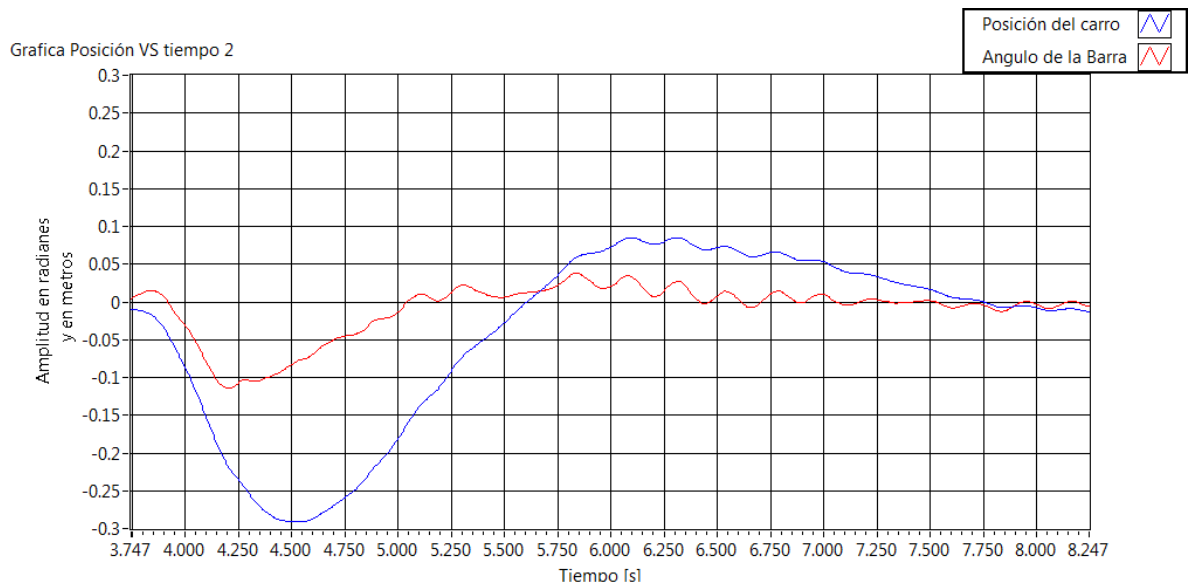
Fuente. Labview

Figura 68. Prueba 3 con ganancias para el control en espacio de estados



Fuente. Labview

Figura 69. Prueba 4 con ganancias para el control en espacio de estados



Fuente. Labview

5.4 Análisis de resultados

5.4.1 Análisis de la respuesta transitoria

- La respuesta transitoria sólo fue posible analizarla para el control del posicionamiento del carro, pues a este control se puede introducirle una entrada escalón de la forma descrita en el inciso 5.1.1. Lo cual no fue posible para el posicionamiento de la barra, pues no era posible iniciar la depuración del programa con esta en reposo.
- Se puede ver en el cuadro 10, que el control en espacio de estados tiene una respuesta transitoria más rápida y el sobresalto menor que el control PID.
- Se puede observar en las figuras 56 y 57 que el control en espacio de estados muestra una estabilización alrededor de los 4.5 segundos, mientras que el control PID no muestra ninguna estabilización en el lapso de tiempo graficado.

5.4.2 Análisis del error en estado estable

- Siendo la respuesta en estado estable una medida de la precisión de un sistema de control, se puede observar en las gráficas obtenidas, que el control en espacio de estado es más preciso que el control PID, pues el espacio de estados mostró un error en estado estable, mucho menor que el control PID, tanto en posicionamiento del carro y de la barra.
- La estabilidad en sistemas de control es algo muy subjetivo, pero para términos comparativos, se pueden calificar cualitativamente los controles espacio de estados y PID como estable y críticamente estable respectivamente.

5.4.3 Análisis en las pruebas con perturbaciones

- Se puede observar también, que el control en espacio de estados es más versátil a la hora de absorber las perturbaciones, pues mostró un menor tiempo de levantamiento y tiempo de pico que el control PID.

- Como se observa en las figuras 61 y 62, los sobrepasos máximos del posicionamiento de la barra y del carro, son de la misma magnitud, pero se diferencian en porcentaje, puesto que el pico de perturbación en la posición de la barra es mayor en el control en espacio de estados, que en el control PID. Esto muestra que el control en espacio de estados descompensa más el posicionamiento de la barra, pero lo absorbe mejor la perturbación.

5.4.4 Análisis del cambio de las ganancias

- Al aumentar las ganancias proporcionales en el control PID, se aumenta el sobrepaso de los dos posicionamientos, luego de la perturbación. Esto se debe, a que la acción proporcional tiende a llevar más rápidamente las posiciones al set-point.
- Al aumentar las ganancias derivativas en el control PID, se disminuye el valor del sobrepaso de los dos posicionamientos, después de la perturbación. Esto se debe a que la acción derivativa es la encargada de absorber los sobrepasos causados por la acción proporcional.
- Al disminuir el valor de las ganancias integrales en el control PID, se aumentó el sobrepaso, y las crestas se hicieron más anchas. Esto se debe a que la acción integral tiende a hacer que el posicionamiento estabilice más rápido, entonces si esta se disminuye, el resultado será que el estado transitorio se prolongue.
- Si se aumenta la ganancia de la distancia del carro, el control tarda más en llevar el carro a su set point, y por ende también se disminuye el sobrepaso después de la perturbación.
- Si se aumenta la ganancia de la velocidad del carro, el posicionamiento del mismo, muestra un mayor sobrepaso, pero un menor tiempo de levantamiento.
- Si se disminuye la ganancia del ángulo del péndulo, el posicionamiento de la misma muestra un menor sobrepaso en porcentaje.
- Si se disminuye la ganancia de velocidad del péndulo, se disminuye el sobrepaso después de la perturbación, pero se prolonga el tiempo de levantamiento.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló una herramienta pedagógica y didáctica que contribuirá al desarrollo de las clases, en las áreas de sistemas dinámicos, ingeniería de control y el futuro curso de robótica, favoreciendo la investigación en estas ramas de la ingeniería, mediante el grupo DICBOT.
- Se diseñó una plataforma experimental (de péndulo invertido lineal) como herramienta de investigación y desarrollo para el laboratorio de sistemas dinámicos, ingeniería de control y robótica, que abarca los siguiente:
 - Una estructura de dimensiones: 130 [cm] de ancho, 60 [cm] de alto y 23 [cm] de profundidad.
 - La base de un plotter referencia HP Design-jet 350C, con un motor de corriente continua RS-775 de potencia nominal 24,4 [W], que cuenta con un mecanismo flexible de correa dentada, guías deslizantes y corredera, ejes y soportes para la construcción del banco.
- Se diseñó y programó el algoritmo de control del sistema de péndulo invertido lineal basado en técnicas de control estándar clásico (control PID) y moderno (control en espacio de estados) implementando una interfaz gráfica para monitorear datos en Labview y con la tarjeta National Instruments NI USB 6216.
- El control en espacio de estados, con valores de tiempo de retardo igual a 0.3 segundos, tiempo de levantamiento igual 0.7 segundos, tiempo pico igual a 1.35 segundos y un sobrepaso de 43% (0.1 metros), muestra una mejor respuesta transitoria que el control PID con valores de; tiempo de retardo igual a 0.375 segundos, tiempo de levantamiento igual 0.75 segundos, tiempo pico igual a 1.9 segundos y un sobrepaso de 90% (0.2 metros).

- El control en espacio de estados, con valores de error máximo en estado estable para el posicionamiento de la barra igual a 0.004 radianes y error máximo en estado estable para posicionamiento del carro igual a 0.02 metros, mostró una mayor precisión que el control PID, con valores de error máximo en estado estable para el posicionamiento de la barra igual a 0.015 radianes y error máximo en estado estable para posicionamiento del carro igual a 0.06 metros.
- El control en espacio de estados, con valores de tiempo de levantamiento igual a 0.9 segundos, sobrepaso en el ángulo de la barra igual a 50% (0.05 radianes) y sobrepaso en la posición de carro igual a 53% (0.16 metros) mostró una mejor respuesta a la perturbación que el control PID, con valores de tiempo de levantamiento igual a 1.2 segundos, sobrepaso en el ángulo de la barra igual a 100% (0.05 radianes) y sobrepaso en la posición de carro igual a 100% (0.31 metros).
- El comportamiento del control PID, ante el cambio de las ganancias estuvo de acuerdo con lo que la teoría dice; el aumento de la constante proporcional permite un levantamiento más rápido, el aumento de la constante derivativa permite la absorción de los sobrepasos y el aumento de la constante integral permite una estabilización más rápida (entre límites que permitan la estabilidad del péndulo).
- El control en espacio de estados (control moderno), mostró una mejor versatilidad ante las distintas pruebas hechas que el control PID (control clásico). Pues el espacio de estados cuenta con la ventaja de manejar varios lazos de control simultáneamente, mientras que el control PID sólo puede manejar un lazo de control a la vez, lo que llevó a que la trayectoria de la señal de control tuviera un recorrido más largo, a través de los diferentes dispositivos electrónicos y del diagrama de bloques del programa.

- La estabilidad y precisión de los controles PID y espacio de estados son muy sensibles a factores de hardware como: Tensión en la correa del mecanismo de transmisión de potencia y lubricación en las guías. Y factores de software como velocidad de muestreo del ciclo y frecuencia del PWM.
- Por último, se mostró que los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander están en total capacidad de incursionar en campos nuevos, como el control moderno, el cual hoy en día es de gran atractivo en la industria del control y la robótica.

RECOMENDACIONES

- Los bancos de laboratorio, como el presentado en este proyecto de grado, manejan un bajo nivel de corriente y voltaje, pero un descuido o mal uso puede llevar a graves accidentes. Por eso se recomienda que antes de utilizar el banco se debe leer el manual del usuario, anexo a este trabajo, o la presencia de un experto en el tema, para una cuidadosa supervisión.
- Se recomienda lubricar las guías del carro constantemente, con el fin de evitar la oxidación y la presencia de particulado que pueda dañar el mecanismo.
- Con el fin de hacer pruebas (con perturbación) más precisas, se recomienda la adaptación de un mecanismo que permita aplicar fuerzas instantáneas de igual magnitud a la barra del péndulo, en cada uno de los controles.
- Se recomienda continuar con la investigación en el banco, adaptando nuevos programas de control, con el fin de obtener más puntos de comparación entre las diferentes metodologías de control.
- La Universidad Industrial de Santander debe actuar como motor que apoye este tipo de tecnologías, potenciando la utilización de sistemas inteligentes que aporten grandes beneficios académicos y sociales a la comunidad en general.

BIBLIOGRAFIA

- OGATA, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Traducido por Miguel Ángel Martínez Sarmiento. 3 ed. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 1998. 997 p. ISBN 970-17-0048-1.
- BOLTON, William. Ingeniería de Control. Traducido por Francisco José Rodríguez Ramírez. 2 ed. México D.F.: Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V., 2001. 397 p. ISBN 970-15-0636-7.
- NISE, Norman. Ingeniería de Control para Ingeniería. 3 ed. México D.F.: Compañía Editorial Continental., 2004. 970 p.
- KUO, Benjamín. Sistemas de Control Automático. Traducido por Guillermo Aranda Pérez. 7 ed. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1996. 897 p. ISBN 968-880-723-0.
- ASKELAND, Donald. Ciencia e Ingeniería de los materiales. 3 ed. México D.F.: International Thomson Editores S.A. de C.V., 1998. 624 p. ISBN 968-7529-36-9.
- NORTON, Robert. Diseño de Maquinaria. 3 ed. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006. 1048 p. ISBN 970-17-0257-3.
- MOTT, Robert. Diseño de Elementos De Máquinas. Traducido por Virgilio González y Pozo. 4 ed. México: Pearson Educación, 2006. 944 p. ISBN 970-26-0812-0.

- PEÑA GIRALDO, Mauricio Vladimir; VIVAS GONZALES, Edilberto Carlos y RODRIGUEZ FELICIANO, Carol Ivonn. Modelamiento Dinámico y Control LQR de un Quadrotor. En: Revista Avances Investigación en Ingeniería. Diciembre, 2010. Vol. 13, p. 71-86.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Referencias Bibliográficas. Contenido, forma y estructura, NTC 5613. Bogotá: El instituto, 2008. 33 p.
- ELTRA. Encoder Incremental [en línea].[Buenos Aires, Argentina]: [citado 10 de febrero de 2012]. Disponible en internet: < <http://facultad.bayamon.inter.edu/arincon/encoderIncrementales.pdf> >.
- ELTRA. Encoder Absoluto [en línea].[Buenos Aires, Argentina]: [citado 10 de febrero de 2012]. Disponible en internet:< <http://www.eltra.it/web/downloadfiles> >.
- FEEDBACK INSTRUMENTS. Digital Pendulum System [en línea]. [Crowborough, Inglaterra]: [citado 11 de agosto de 2012]. Disponible en internet: < http://automatica.li2.uchile.cl/exp/files/man_pi/reference_manual.pdf >.
- SGMADA. RS-775 DC MOTOR Series [en línea]. [Zhejiang, China]: [citado 11 de agosto de 2012]. Disponible en internet: < <http://www.sgmada.com/wx/pdf/RS-775.pdf>>.
- CASTRO ZALDÚA, Diego Alejandro y PEÑA DELGADO, Jhon Sebastián. Diseño y construcción de un prototipo experimental de un vehículo eléctrico.
- FIGUEROA ROJAS, Gabriel Enrique. PÉNDULO INVERTIDO CONTROLADO POR UN SISTEMA DE LÓGICA DIFUSA (PRIMERA PARTE). Trabajo de grado

Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 1997.

- MARIN, Edgar Augusto; ORTIZ, Oscar Javier. CONTROL MEDIANTE LÓGICA FUZZY DE UN PÉNDULO INVERTIDO. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2005.

ANEXOS

ANEXO A. SISTEMA DE CONTROL

Un sistema de control se puede considerar como una caja negra, la cual tiene una salida y una entrada, dentro de esta caja negra lo que realmente importa es la relación entre la salida y la entrada. La salida del sistema se controla para que tenga un valor específico según lo determine la entrada al sistema.

En este caso particular, la idea es mantener el péndulo en la posición de equilibrio, en este caso la posición vertical. La señal de entrada es el set-point o punto de referencia para que la salida deseada sea esta.

En general, se tiene dos formas básicas de control llamadas control en lazo abierto y control en lazo cerrado; funcionan como se indica a continuación.

El controlador es un elemento del sistema de control al cual entra la señal de error y sale una señal que se convierte en la entrada del elemento correctivo. La relación que hay entre la salida y entrada al controlador normalmente se denomina ley de control.

➤ CONTROL EN LAZO ABIERTO

En el sistema de control lazo abierto, la entrada se elige con base en la experiencia que se tiene de dichos sistemas para producir un valor de salida requerido. En la figura 70. Se muestra un esquema del mismo.

Figura 70. Esquema del sistema lazo abierto

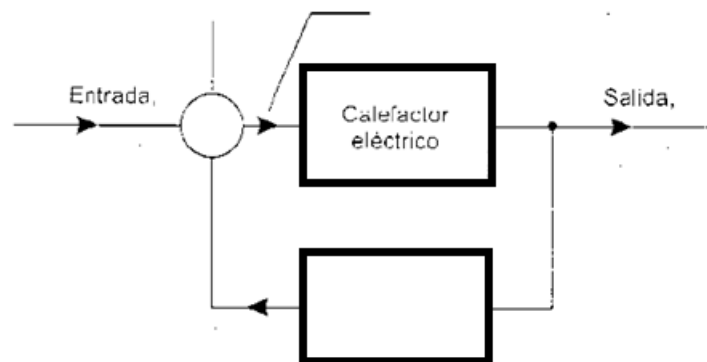


Fuente: Ingeniería de control Bolton, 2da edición

➤ CONTROL EN LAZO CERRADO

En el sistema de control en lazo cerrado, se tiene una señal adicional llamada señal de realimentación que se dirige a la entrada desde la salida, como se muestra en la figura 71. La señal de realimentación se usa para modificar la entrada de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación.

Figura 71. Esquema del sistema lazo cerrado

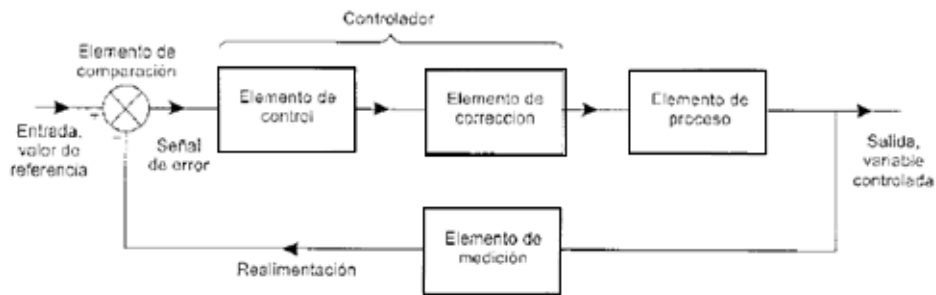


Fuente: Ingeniería de control Bolton, 2da edición

Este sistema de control se optó para la realización de este proyecto, donde es ventajoso conocer la posición del péndulo en cada instante de tiempo.

Un sistema lazo cerrado consiste en un grupo de subsistemas básicos como se observa en la figura 72. La entrada al sistema de control es el valor requerido y la variable de salida es el valor real de la variable.

Figura 72. Subsistemas de un sistema de control en lazo cerrado



Fuente: Ingeniería de control Bolton, 2da edición

➤ Elemento de comparación

La función de este elemento es la comparación del valor requerido o set-point de la variable a controlar con el valor medido obtenido a la salida que produce una señal de error que se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Señal de error} = \text{Señal del valor de referencia} - \text{señal del valor medido}$$

Se dice que se tiene señal de realimentación negativa en el caso de que la señal realimentada se sustrae o resta de la señal de referencia. Y cuando la señal de realimentación se adiciona a la señal de referencia se llama realimentación positiva.

Para lograr el control es necesario usar realimentación negativa.

➤ Elemento de control

Este elemento decide que acción tomar cuando recibe una señal de error.

➤ Elemento de corrección

La función de este elemento es producir un cambio para eliminar el error y es frecuente denominarlo actuador.

➤ Elemento de proceso

Es la planta donde se va a controlar la variable

➤ Elemento de medición

Este elemento se encarga de producir la señal de la variable controlada y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar el error.

ANEXO B. ESTABILIDAD DE UN SISTEMA

➤ ESTABILIDAD DE UN SISTEMA

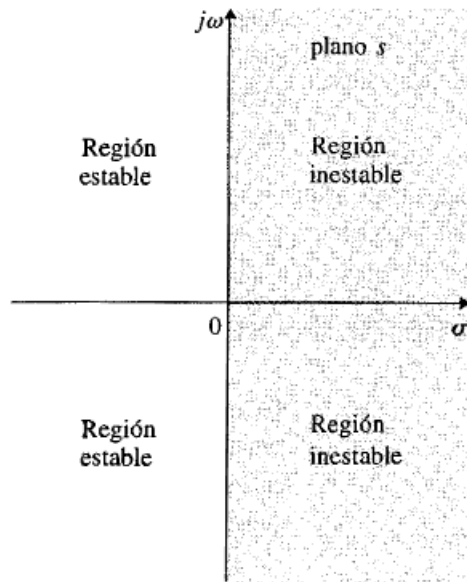
Uno de los problemas más relevantes en los sistemas de control lineal tiene que ver con la estabilidad. Esto se refiere las condiciones que hacen que el sistema se vuelva inestable y si es inestable como se estabiliza tal sistema.

La función de transferencia de un sistema en lazo cerrado tiene por lo general la siguiente forma:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} = \frac{B(s)}{A(s)}$$

en donde las **a** y **b** son constantes y $m \leq n$, si hay polos en el semiplano derecho, se concluye que el sistema es inestable; para saber si hay polos que hagan al sistema inestable es decir polos encontrados en el semiplano derecho, se debe factorizar el polinomio **A(s)**. Una forma de saber si hay polos en el semiplano derecho es aplicar el criterio de estabilidad de Routh, que permite determinar la cantidad de polos en lazo cerrado que se encuentran en el semiplano derecho del plano **s** sin tener que factorizar el polinomio.

Figura 73. Estabilidad



Fuente: KUO, Benjamin. Sistemas de Control Automático

➤ Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz

El criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz nos dice si existen o no raíces inestables en una ecuación polinomial, sin tener que obtenerlas en realidad. Este criterio de estabilidad sólo se aplica a los polinomios con una cantidad finita de términos. Cuando se aplica el criterio a un sistema de control, la información acerca de la estabilidad absoluta se obtiene directamente de los coeficientes de la ecuación característica. El procedimiento en el criterio de estabilidad de Routh es el siguiente:

- Escriba el polinomio en s de la siguiente forma:

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0$$

Donde los coeficientes son cantidades reales. Suponemos que a_n es diferente de cero; es decir, se elimina cualquier raíz cero.

- Si alguno de los coeficientes es cero o negativo, ante la presencia de al menos un coeficiente positivo, hay una raíz, o raíces imaginarias o que tiene partes reales positivas, en tal caso, el sistema no es estable. Si sólo nos interesa la estabilidad absoluta, no es necesario continuar con el procedimiento. Observe que todos los coeficientes deben ser positivos.
- Si todos los coeficientes son positivos, ordene los coeficientes del polinomio en renglones y columnas de acuerdo con el patrón o arreglo siguiente:

$$\begin{array}{rcccccccc}
 s^n & a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & . & . & . \\
 s^{n-1} & a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & . & . & . \\
 s^{n-2} & b_1 & b_2 & b_3 & b_4 & . & . & . \\
 s^{n-3} & c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & . & . & . \\
 s^{n-4} & d_1 & d_2 & d_3 & d_4 & . & . & . \\
 & . & . & . & . & . & . & . \\
 & . & . & . & . & . & . & . \\
 & . & . & . & . & . & . & . \\
 s^2 & e_1 & e_2 & . & . & . & . & . \\
 s^1 & f_1 & . & . & . & . & . & . \\
 s^0 & g_1 & . & . & . & . & . & .
 \end{array}$$

Los coeficientes b_1, b_2, b_3 , etc., se evalúan del modo siguiente:

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1}$$

$$b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1}$$

$$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1}$$

La evaluación de las b continúa hasta que todas las restantes son cero. Se sigue el mismo patrón de multiplicación cruzada de los coeficientes de los dos renglones anteriores al evaluar las c , las d , las e , etc.

$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1}$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1}$$

$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1}$$

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1}$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1}$$

Este proceso continúa hasta que se completa el enésimo renglón.

El criterio de estabilidad de Routh plantea que el número de raíces de la ecuación con partes reales positivas es igual al número de cambios de signo de los coeficientes de la primera columna del arreglo. Debe señalarse que no es necesario conocer los valores exactos de los términos de la primera columna; sólo se necesitan los signos. La condición necesaria y suficiente para que todas las raíces se encuentren en el semiplano izquierdo del plano s es que todos los coeficientes y que todos los términos de la primera columna del arreglo tengan signo positivo.

Al aplicar este criterio al sistema de la plataforma de péndulo invertido, se observa que el sistema no es estable.

Se toma el denominador de la función de transferencia mostrada en la sección 2.1 $s^4 + 0,41s^3 - 26,87s^2 - 8,75s$

$$a_0 = 1$$

$$a_1 = 0,41$$

$$a_2 = -26.87$$

$$a_3 = 0$$

Teniendo en cuentas las condiciones del criterio de Routh, como en este caso el coeficiente de S^0 es igual a cero y además se tienen raíces negativas en presencia de raíces positivas, entonces se puede deducir que el sistema es inestable.

ANEXO C. SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID

➤ CÁLCULO DE LAS CONSTANTES DEL CONTROLADOR PID

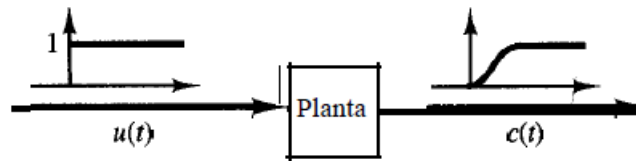
El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se conoce como sintonización del controlador. Ziegler y Nichols indicaron más reglas para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer valores K_p , T_i y T_d) con base en las respuestas escalón experimentales o basadas en el valor de K_p que se produce en la estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (Por supuesto, estas reglas se aplican también al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos.)

Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID. Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , con base en las características de respuesta transitoria de una planta específica. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o de la sintonización de los controles PID la realizan los ingenieros en el sitio mediante experimentos sobre la planta.

Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols (existen más métodos).

- En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, como se observa en la figura 74. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 75. (Si la respuesta no exhibe una curva con forma de S, este método no es pertinente.) Tales curvas de respuesta escalón se generan experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

Figura 74. Respuesta escalón unitario de una planta

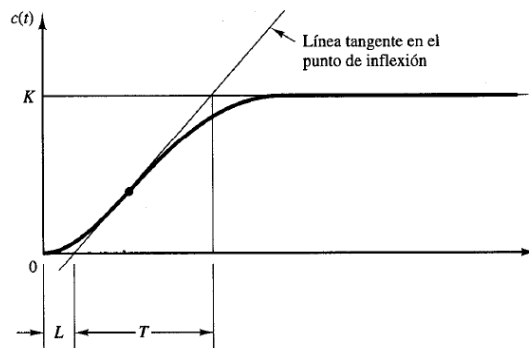


Fuente: NISE. Sistemas de control de ingeniería. Tercera edición.

La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: El tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea $c(t) = K$, como se aprecia en la figura 75. En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Figura 75. Curva de respuesta con forma de S



Fuente: NISE. Sistemas de control de ingeniería. Tercera edición.

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de Kp , Ti y Td de acuerdo con la fórmula que aparece en el cuadro 15.

Cuadro 15. Cálculo de constantes PID primer método

Tipo de controlador	K_p	Ti	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Fuente: NISE. Sistemas de control de ingeniería. Tercera edición.

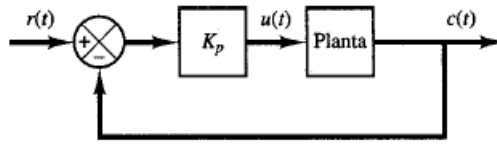
Observe que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\
 &= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -1/L$.

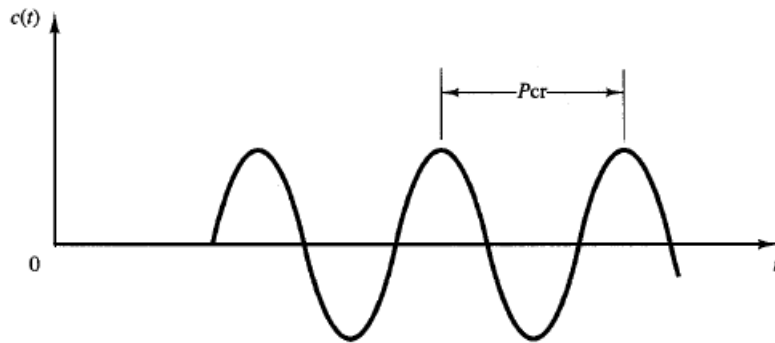
- En el segundo método, primero establecemos $Ti = CC$ y $Td = 0$. Usando sólo la acción de control proporcional, incremente Kp de 0 a un valor crítico Kcr en donde la salida exhiba primero oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar Kp , no se aplica este método.) Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros Kp , Ti y Td de acuerdo con las fórmulas que aparecen en el cuadro 16.

Figura 76. Sistema en lazo cerrado con controlador proporcional



Fuente: NISE. Sistemas de control de ingeniería. Tercera edición.

Figura 77. Oscilación sostenida con un periodo P_{cr}



Fuente: NISE. Sistemas de control de ingeniería. Tercera edición

Cuadro 16. Cálculo de constantes segundo método

Tipo de controlador	K_p	τ_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Autores

Observe que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
&= 0.6 K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5 P_{cr} s} + 0.125 P_{cr} s \right) \\
&= 0.075 K_{cr} P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
\end{aligned}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y cero doble en $s = -4/P_{cr}$.

ANEXO D. DATASHEET DEL MOTOR



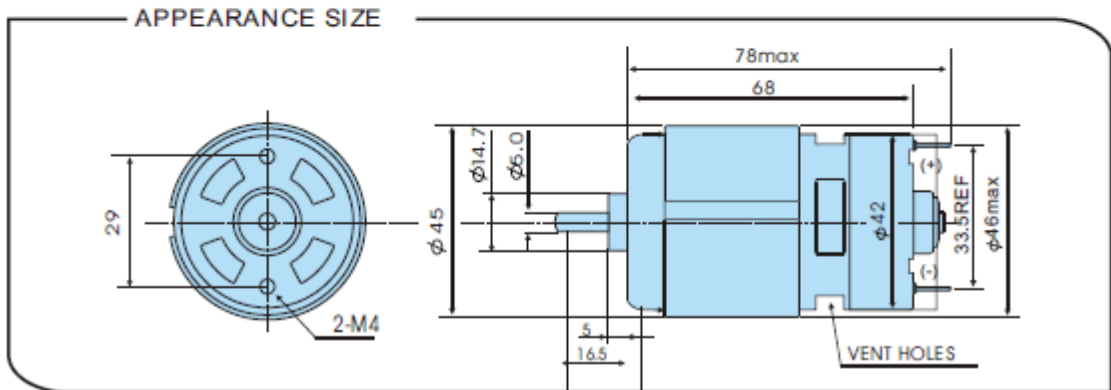
RS-775 DC MOTOR Series



Typical applications: RG-50 (Φ50.8mm), PG-45(Φ45mm) planetary box, TT(60X95mm), GF(69.9X119.1mm), QF(73.2X95.8mm), ZF(63.5X90.2mm), RF(63.5X90.2mm), MF(70X70mm), KF(63.5X68.3mm), JR55.6X104.2mm), VF (69.9X76.2), 60X60mm, gearedbox .

MOTOR TORQUE/SPEED/CURRENT

MOTOR MODEL	Rated Vol. V	No load		At maximum efficiency				Stall	
		Current	Speed	Current	Speed	Torque	Power	Torque	Current
		mA	r/min	mA	r/min	g·cm	W	g·cm	mA
RS-775-12-2500	12	<200	2500	<0.9	1850	300	5.6	1200	3.3
RS-775-24-2500	24	<150	2550	<0.5	1850	300	5.6	1200	1.8
RS-775-12-5000	12	<700	5000	<4.0	3750	650	24.4	2700	14.0
RS-775-24-5000	24	<250	5000	<2.0	3750	650	24.4	2700	7.0



RS-775-12-2500 CHARACTERISTICS

RS-775-24-2500 CHARACTERISTICS

ANEXO E. DATASHEET DEL ENCODER ROTATIVO ϕ 30 Body Standard Shaft Type

Diameter ϕ 30mm shaft type INCREMENTAL Rotary encoder

■ Features

- ϕ 30mm shaft type rotary encoder
- Easy installation at narrow space
- Small inertia moment
- Wide range of power source : 5VDC, 12-24VDC ±5%
- Various output types



⚠ Please read "Caution for your safety" in operation manual before using.



■ Ordering information

E30S	4	—	1024	—	3	—	2	—	24	—	
Series	Shaft diameter	Pulse/1 Revolution	Output phase	Output	Power supply	Cable					
Diameter ϕ 30mm, shaft type	ϕ 4mm	See resolution	2:A, B 3:A, B, Z 4:A, \bar{A} , B, \bar{B} 6:A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z}	1: Totem pole output 2: NPN open collector output 3: Voltage output L: Line driver output(*)	5 :5VDC ±5% 24:12-24VDC ±5%	No mark: Normal type (*) 2C: Cable outgoing connector type					

*Standard: E30S4-PULSE-3-2-24(12-24VDC) *Standard: A, B, Z *The power of Line driver is only for 5VDC *Cable length: 200mm

■ Specifications

Item		Diameter ϕ 30mm shaft type Incremental Rotary encoder		
Resolution(P/R)		100, 200, 360, 500, 1000, 1024, 3000 (Not indicated type is available to customize)		
Electrical specification	Phase difference of output	Output between A and B phase : $\frac{T}{4} \pm \frac{T}{8}$ (T=1 cycle of A phase)		
	Control output	Totem pole output	• Low \Rightarrow Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC • High \Rightarrow Load current : Max. 10mA, Output voltage : Min. (Power supply-1.5)VDC	
		NPN open collector output	Load current : Max. 30mA, Residual voltage : Max. 1VDC	
		Voltage output	Load current : Max. 10mA, Residual voltage : Max. 0.4VDC	
		Line driver output	Low \Rightarrow Load current : Max. 20mA, Residual : Max. 0.5V High \Rightarrow Load current : Max. -20mA, Output voltage : Min. 2.5V	
	Response time (Rise/Fall)	Totem pole output	Max. 1 μ s	
		NPN open collector output	Max. 1 μ s	
		Voltage output	Max. 1 μ s (5VDC: Output resistance 820 Ω), Max. 2 μ s (12-24VDC: Output resistance 4.7k Ω)	
		Line driver output	Max. 0.5 μ s	
	Max. Response frequency	180kHz		
Current consumption	Max. 60mA (disconnection of the load), Line driver output: Max. 50mA (disconnection of the load)			
Insulation resistance	Min. 100M Ω (at 500VDC)			
Dielectric strength	750VAC 50/60Hz for 1 minute (Between all terminals and case)			
Connection	Cable outgoing type, 200mm cable outgoing connector type			
Mechanical specification	Starting torque	Max. 20gf · cm (0.002N · m)		
	Moment of inertia	Max. 20g · cm ² (2×10 ⁻⁶ kg · m ²)		
	Shaft loading	Radial : Max. 2kgf, Thrust : Max. 1kgf		
	Deviation of shaft position	Radial : Max. 0.1mm, Thrust : Max. 0.2mm		
	Max. allowable revolution	(*)Note1) 5000rpm		
	Vibration	1.5mm amplitude at frequency of 10 ~ 55Hz in each of X, Y, Z directions for 2 hours		
Shock	Max. 50G			
Ambient temperature	-10 ~ 70°C (at non-freezing status), Storage: -25 ~ 85°C			
Ambient humidity	35-85%RH, Storage: 35-90%RH			
Protection	IP50 (IEC specification)			
Cable	(*)Note2) 5P, (Line driver: 8P) ϕ 5mm, Length: 2m, Shield cable (Basic)			
Accessory	ϕ 4mm coupling			
Weight	Approx. 80g			
Approval	CE (Except Line driver output)			

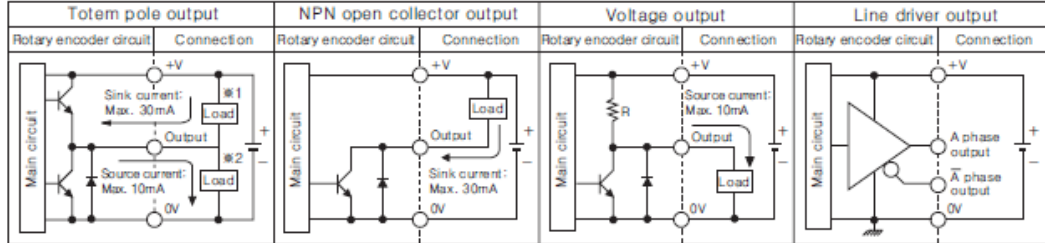
※(*)Note1) Max. allowable revolution \geq Max. response revolution [Max. response revolution (rpm) = $\frac{\text{Max. response frequency}}{\text{Resolution}} \times 60 \text{ sec}$]

Please select the resolution to make lower max. revolution than max. allowable revolution.

※(*)Note2) The cable length is changeable. (Option)

E30S4 Series

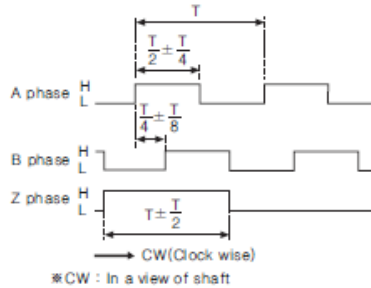
Control output diagram



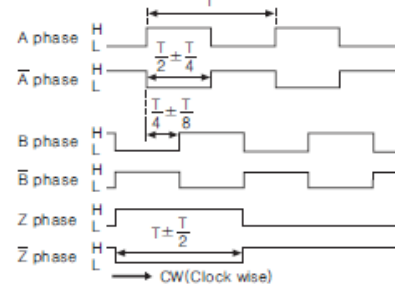
- ⇒ Totem pole output type can be used for NPN open collector output type(*1) or Voltage output type(*2).
- ⇒ All output circuits are the same A, B, Z phase(Line driver output is A, \bar{A} , B, \bar{B} , Z, \bar{Z})

Output waveform

Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



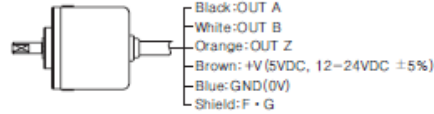
Line driver output



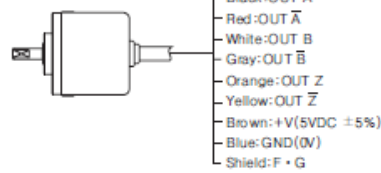
Connections

Normal type

Totem pole output / NPN open collector output / Voltage output



Line driver output



- ※The body of encoder is connected to a shield.
- ※Unused wires must be insulated.

Cable outgoing connector type

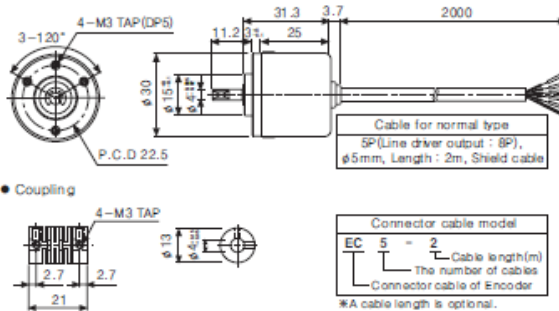


Pin No.	Cable color	Totem pole output NPN open collector output Voltage output	Line driver output
①	Black	OUT A	OUT A
②	Red	N.C	OUT \bar{A}
③	Brown	+V	+V
④	Blue	GND	GND
⑤	White	OUT B	OUT B
⑥	Gray	N.C	OUT \bar{B}
⑦	Orange	OUT Z	OUT Z
⑧	Yellow	N.C	OUT \bar{Z}
⑨	Shield	F.G	F.G
⑩	Purple	N.C	N.C

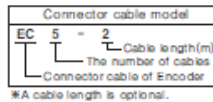
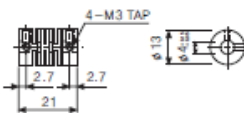
- ※N.C(Not Connected)
- ※F.G(Field Ground)

Dimensions

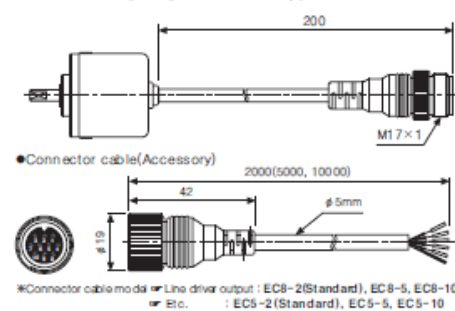
Normal type



Coupling



Cable outgoing connector type



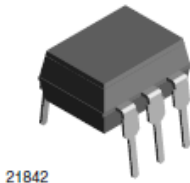
ANEXO F. DATASHEET OPTOACOPLADOR 4N25

4N25, 4N26, 4N27, 4N28

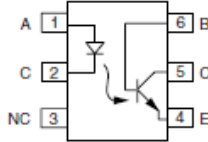
Vishay Semiconductors



Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection



21842



FEATURES

- Isolation test voltage 5000 V_{RMS}
- Interfaces with common logic families
- Input-output coupling capacitance < 0.5 pF
- Industry standard dual-in-line 6 pin package
- Compliant to RoHS directive 2002/95/EC and in accordance to WEEE 2002/96/EC



RoHS COMPLIANT

APPLICATIONS

- AC mains detection
- Reed relay driving
- Switch mode power supply feedback
- Telephone ring detection
- Logic ground isolation
- Logic coupling with high frequency noise rejection

AGENCY APPROVALS

- UL1577, file no. E52744
- BSI: EN 60065:2002, EN 60950:2000
- FIMKO: EN 60950, EN 60065, EN 60335

DESCRIPTION

The 4N25 family is an industry standard single channel phototransistor coupler. This family includes the 4N25, 4N26, 4N27, 4N28. Each optocoupler consists of gallium arsenide infrared LED and a silicon NPN phototransistor.

ORDER INFORMATION	
PART	REMARKS
4N25	CTR > 20 %, DIP-6
4N26	CTR > 20 %, DIP-6
4N27	CTR > 10 %, DIP-6
4N28	CTR > 10 %, DIP-6

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V _R	5	V
Forward current		I _F	60	mA
Surge current	t ≤ 10 μs	I _{FSM}	3	A
Power dissipation		P _{diss}	100	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V _{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V _{EBO}	7	V
Collector current		I _C	50	mA
	t ≤ 1 ms	I _C	100	mA
Power dissipation		P _{diss}	150	mW



4N25, 4N26, 4N27, 4N28

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors
with Base Connection

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
COUPLER				
Isolation test voltage		V_{ISO}	5000	V_{RMS}
Creepage distance			≥ 7	mm
Clearance distance			≥ 7	mm
Isolation thickness between emitter and detector			≥ 0.4	mm
Comparative tracking index	DIN IEC 112/VDE 0303, part 1		175	
Isolation resistance	$V_{IO} = 500\text{ V}, T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IO}	10^{12}	Ω
	$V_{IO} = 500\text{ V}, T_{amb} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	R_{IO}	10^{11}	Ω
Storage temperature		T_{stg}	- 55 to + 125	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature		T_{amb}	- 55 to + 100	$^{\circ}\text{C}$
Junction temperature		T_j	125	$^{\circ}\text{C}$
Soldering temperature ⁽²⁾	max.10 s dip soldering: distance to seating plane $\geq 1.5\text{ mm}$	T_{sld}	260	$^{\circ}\text{C}$

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified.

Stresses in excess of the absolute maximum ratings can cause permanent damage to the device. Functional operation of the device is not implied at these or any other conditions in excess of those given in the operational sections of this document. Exposure to absolute maximum ratings for extended periods of the time can adversely affect reliability.

⁽²⁾ Refer to reflow profile for soldering conditions for surface mounted devices (SMD). Refer to wave profile for soldering conditions for through hole devices (DIP).

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ⁽¹⁾							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
INPUT							
Forward voltage ⁽²⁾	$I_F = 50\text{ mA}$		V_F		1.3	1.5	V
Reverse current ⁽²⁾	$V_R = 3\text{ V}$		I_R		0.1	100	μA
Capacitance	$V_R = 0\text{ V}$		C_O		25		pF
OUTPUT							
Collector base breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 100\text{ }\mu\text{A}$		BV_{CBO}	70			V
Collector emitter breakdown voltage ⁽²⁾	$I_C = 1\text{ mA}$		BV_{CEO}	30			V
Emitter collector breakdown voltage ⁽²⁾	$I_E = 100\text{ }\mu\text{A}$		BV_{ECO}	7			V
$I_{CEO}(\text{dark})$ ⁽²⁾	$V_{CE} = 10\text{ V}, (\text{base open})$	4N25			5	50	nA
		4N26			5	50	nA
		4N27			5	50	nA
		4N28			10	100	nA
$I_{CBO}(\text{dark})$ ⁽²⁾	$V_{CB} = 10\text{ V}, (\text{emitter open})$				2	20	nA
Collector emitter capacitance	$V_{CE} = 0$		C_{CE}		6		pF
COUPLER							
Isolation test voltage ⁽²⁾	Peak, 60 Hz		V_{IO}	5000			V
Saturation voltage, collector emitter	$I_{CE} = 2\text{ mA}, I_F = 50\text{ mA}$		$V_{CE(\text{sat})}$			0.5	V
Resistance, input output ⁽²⁾	$V_{IO} = 500\text{ V}$		R_{IO}	100			$\text{G}\Omega$
Capacitance, input output	$f = 1\text{ MHz}$		C_{IO}		0.6		pF

Notes

⁽¹⁾ $T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified.

Minimum and maximum values are testing requirements. Typical values are characteristics of the device and are the result of engineering evaluation. Typical values are for information only and are not part of the testing requirements.

⁽²⁾ JEDEC registered values are 2500 V, 1500 V, 1500 V, and 500 V for the 4N25, 4N26, 4N27, and 4N28 respectively.

4N25, 4N26, 4N27, 4N28



Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection

CURRENT TRANSFER RATIO ⁽¹⁾							
PARAMETER	TEST CONDITION	PART	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
DC current transfer ratio	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_F = 10\text{ mA}$	4N25	CTR_{DC}	20	50		%
		4N26	CTR_{DC}	20	50		%
		4N27	CTR_{DC}	10	30		%
		4N28	CTR_{DC}	10	30		%

Note

⁽¹⁾ Indicates JEDEC registered values.

SWITCHING CHARACTERISTICS							
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT	
Rise and fall times	$V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_F = 10\text{ mA}$, $R_L = 100\ \Omega$	t_r , t_f		2		μs	

TYPICAL CHARACTERISTICS

$T_{amb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified

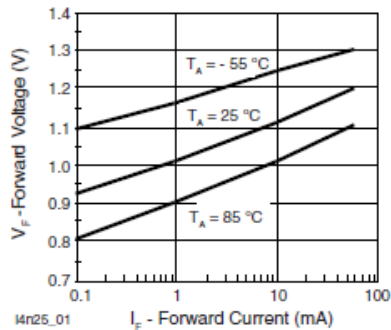


Fig. 1 - Forward Voltage vs. Forward Current

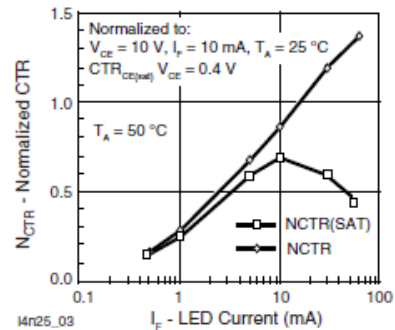


Fig. 3 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

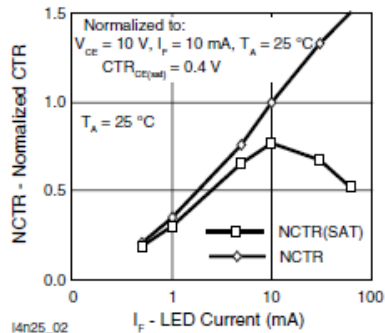


Fig. 2 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

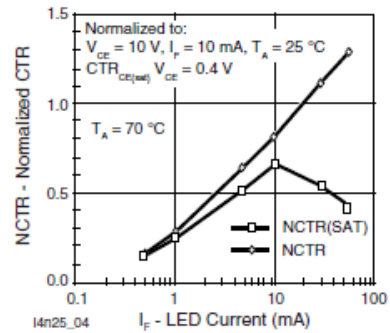


Fig. 4 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current



4N25, 4N26, 4N27, 4N28

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors with Base Connection

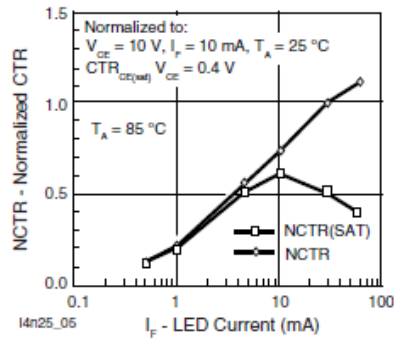


Fig. 5 - Normalized Non-Saturated and Saturated CTR vs. LED Current

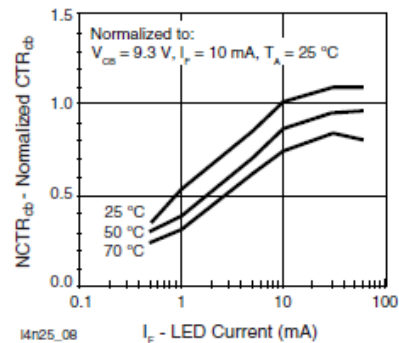


Fig. 8 - Normalized CTRcb vs. LED Current and Temperature

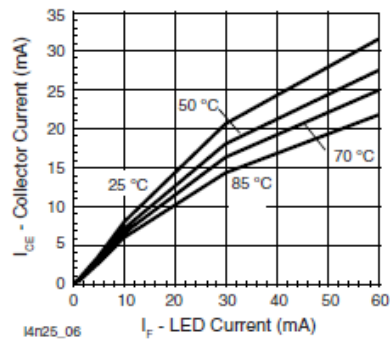


Fig. 6 - Collector Emitter Current vs. Temperature and LED Current

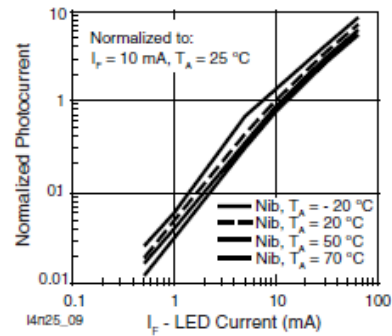


Fig. 9 - Normalized Photocurrent vs. I_F and Temperature

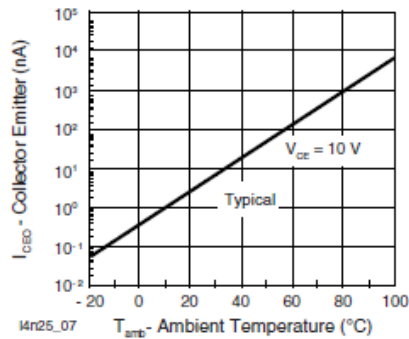


Fig. 7 - Collector Emitter Leakage Current vs. Temperature

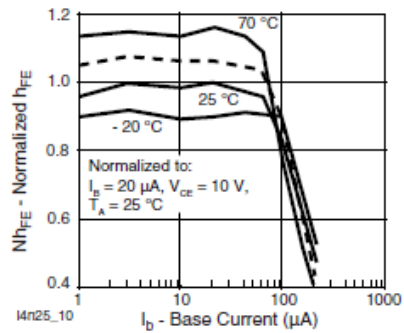


Fig. 10 - Normalized Non-Saturated h_{FE} vs. Base Current and Temperature

4N25, 4N26, 4N27, 4N28



Vishay Semiconductors Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection

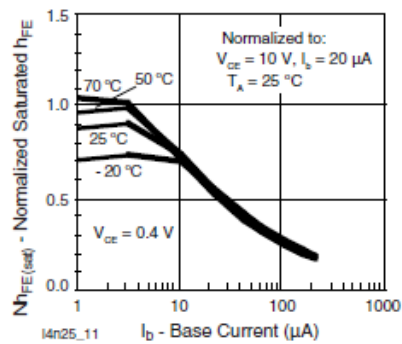


Fig. 11 - Normalized h_{FE} vs. Base Current and Temperature

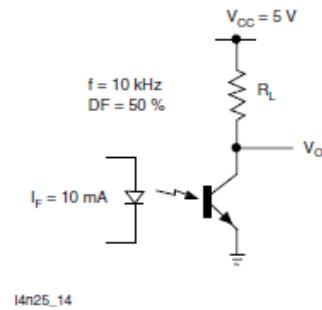


Fig. 14 - Switching Schematic

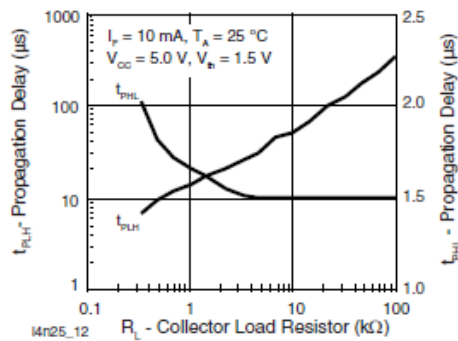


Fig. 12 - Propagation Delay vs. Collector Load Resistor

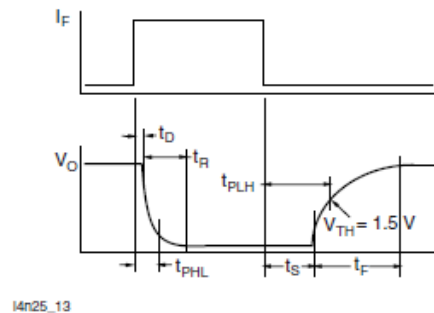


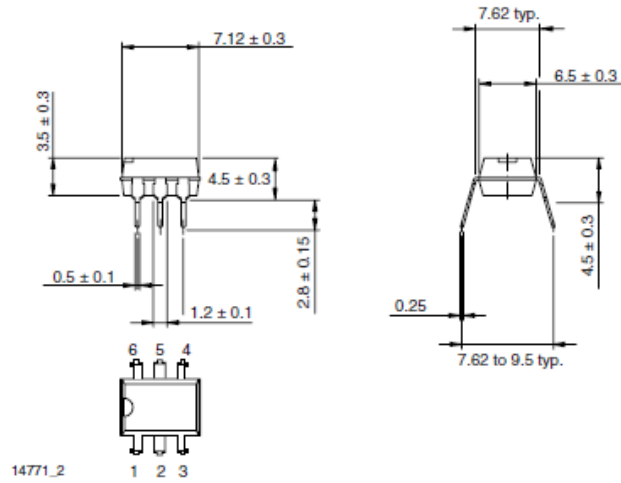
Fig. 13 - Switching Timing



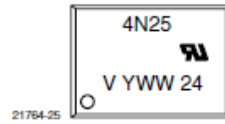
4N25, 4N26, 4N27, 4N28

Optocoupler, Phototransistor Output, Vishay Semiconductors
with Base Connection

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters



PACKAGE MARKING





Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and/or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk and agree to fully indemnify and hold Vishay and its distributors harmless from and against any and all claims, liabilities, expenses and damages arising or resulting in connection with such use or sale, including attorneys fees, even if such claim alleges that Vishay or its distributor was negligent regarding the design or manufacture of the part. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Material Category Policy

Vishay Intertechnology, Inc. hereby certifies that all its products that are identified as RoHS-Compliant fulfill the definitions and restrictions defined under Directive 2011/65/EU of The European Parliament and of the Council of June 8, 2011 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (EEE) - recast, unless otherwise specified as non-compliant.

Please note that some Vishay documentation may still make reference to RoHS Directive 2002/95/EC. We confirm that all the products identified as being compliant to Directive 2002/95/EC conform to Directive 2011/65/EU.

ANEXO G. DATASHEET OPTOACOPLADOR 6N137

High CMR, High Speed TTL Compatible Optocouplers

Technical Data

6N137	
HCNW137	HCPL-0631
HCNW2601	HCPL-0661
HCNW2611	HCPL-2601
HCPL-0600	HCPL-2611
HCPL-0601	HCPL-2630
HCPL-0611	HCPL-2631
HCPL-0630	HCPL-4661

Features

- 5 kV/ μ s Minimum Common Mode Rejection (CMR) at $V_{CM} = 50$ V for HCPL-X601/X631, HCNW2601 and 10 kV/ μ s Minimum CMR at $V_{CM} = 1000$ V for HCPL-X611/X661, HCNW2611
- High Speed: 10 MBd Typical
- LSTTL/TTL Compatible
- Low Input Current Capability: 5 mA
- Guaranteed ac and dc Performance over Temperature: -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Available in 8-Pin DIP, SOIC-8, Widebody Packages
- Strobable Output (Single Channel Products Only)
- Safety Approval
UL Recognized - 2500 V rms for 1 minute and 5000 V rms* for 1 minute per UL1577
CSA Approved
VDE 0884 Approved with $V_{IORM} = 630$ V peak for HCPL-2611 Option 060 and $V_{IORM} = 1414$ V peak for HCNW137/26X1
BSI Certified (HCNW137/26X1 Only)
- MIL-STD-1772 Version Available (HCPL-56XX/66XX)

Applications

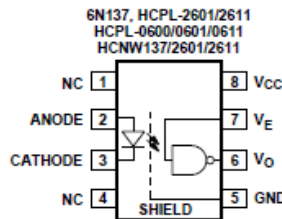
- Isolated Line Receiver
- Computer-Peripheral Interfaces
- Microprocessor System Interfaces
- Digital Isolation for A/D, D/A Conversion
- Switching Power Supply
- Instrument Input/Output Isolation
- Ground Loop Elimination
- Pulse Transformer Replacement

- Power Transistor Isolation in Motor Drives
- Isolation of High Speed Logic Systems

Description

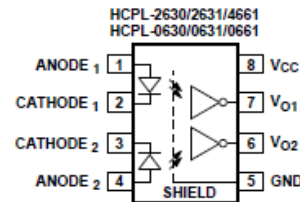
The 6N137, HCPL-26XX/06XX/4661, HCNW137/26X1 are optically coupled gates that combine a GaAsP light emitting diode and an integrated high gain photo detector. An enable input allows the detector to be strobed. The output of the detector IC is

Functional Diagram



TRUTH TABLE (POSITIVE LOGIC)

LED	ENABLE	OUTPUT
ON	H	L
OFF	H	H
ON	L	H
OFF	L	H
ON	NC	L
OFF	NC	H



TRUTH TABLE (POSITIVE LOGIC)

LED	OUTPUT
ON	L
OFF	H

*5000 V rms/1 Minute rating is for HCNW137/26X1 and Option 020 (6N137, HCPL-2601/11/30/31, HCPL-4661) products only.

A 0.1 μF bypass capacitor must be connected between pins 5 and 8.

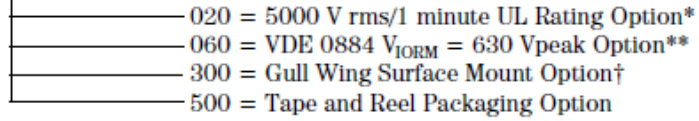
CAUTION: It is advised that normal static precautions be taken in handling and assembly of this component to prevent damage and/or degradation which may be induced by ESD.

Ordering Information

Specify Part Number followed by Option Number (if desired).

Example:

HCPL-2611#XXX



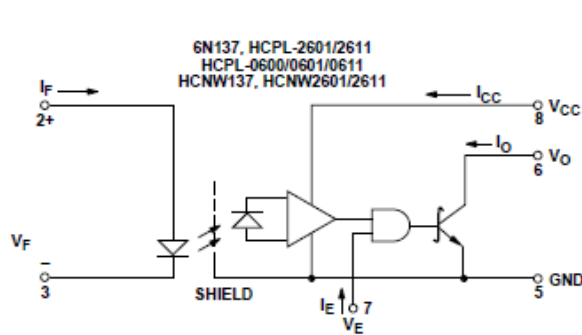
Option data sheets available. Contact Hewlett-Packard sales representative or authorized distributor for information.

*For 6N137, HCPL-2601/11/30/31 and HCPL-4661 (8-pin DIP products) only.

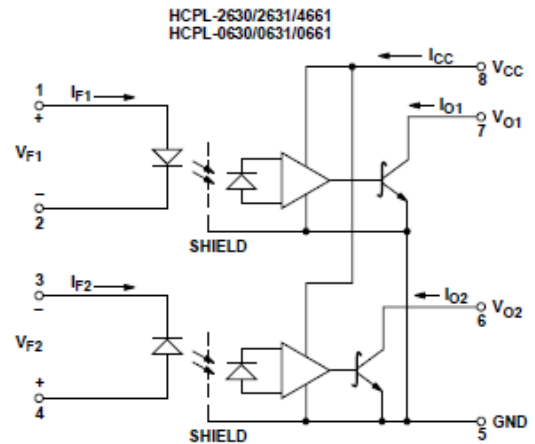
**For HCPL-2611 only. Combination of Option 020 and Option 060 is not available.

†Gull wing surface mount option applies to through hole parts only.

Schematic

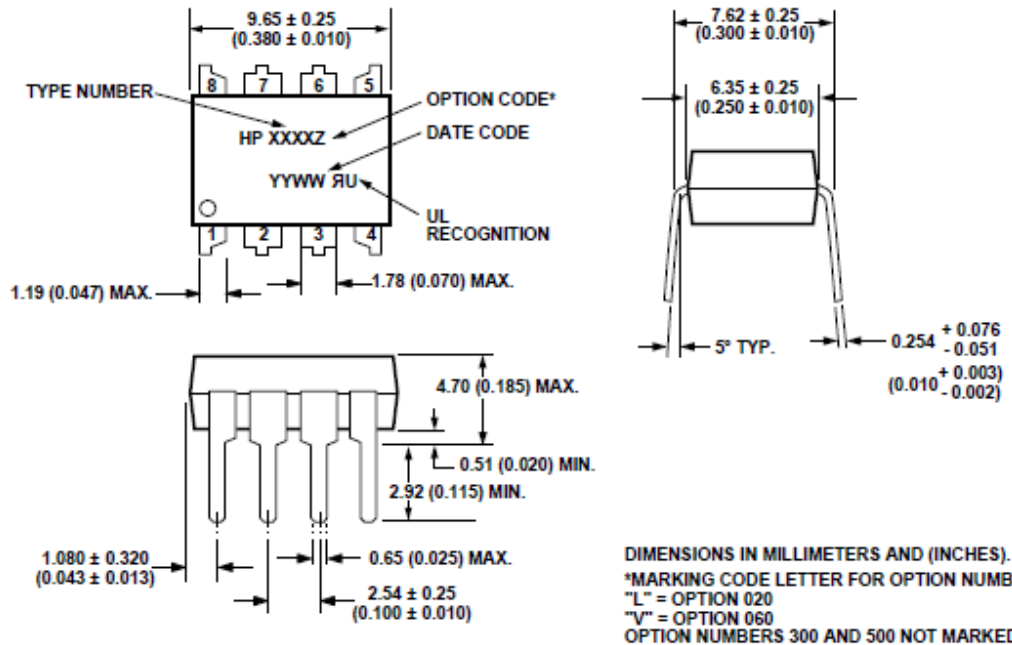


USE OF A 0.1 μ F BYPASS CAPACITOR CONNECTED BETWEEN PINS 5 AND 8 IS RECOMMENDED (SEE NOTE 5).



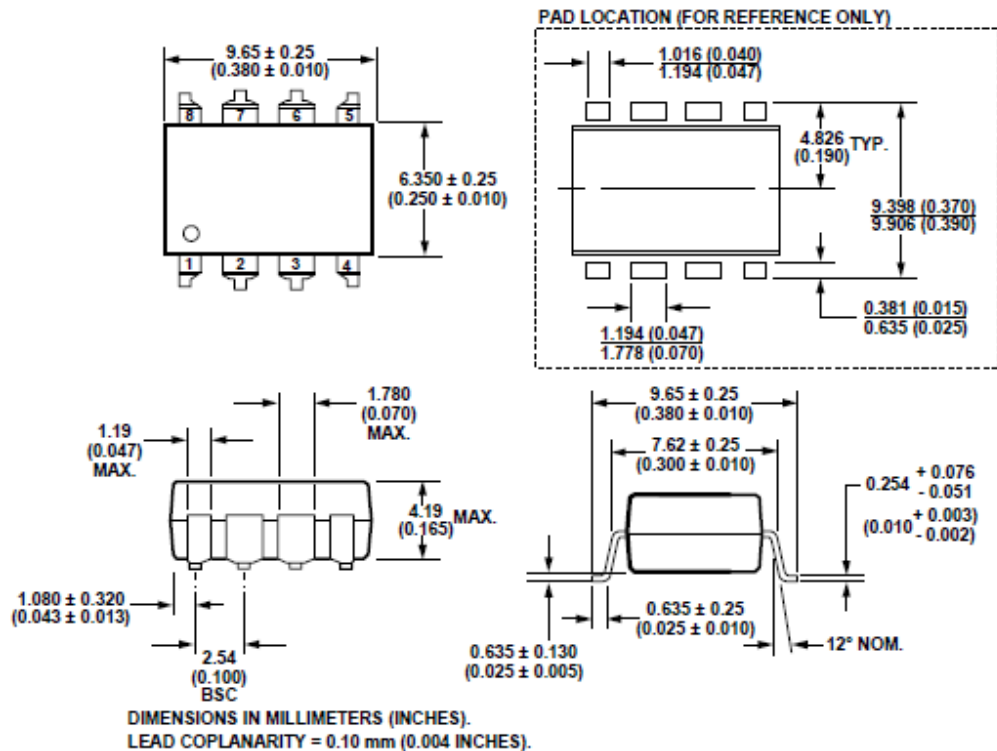
Package Outline Drawings

8-pin DIP Package** (6N137, HCPL-2601/11/30/31, HCPL-4661)



**JEDEC Registered Data (for 6N137 only).

8-pin DIP Package with Gull Wing Surface Mount Option 300 (6N137, HCPL-2601/11/30/31, HCPL-4661)



Absolute Maximum Ratings* (No Derating Required up to 85°C)

Parameter	Symbol	Package**	Min.	Max.	Units	Note
Storage Temperature	T _S		-55	125	°C	
Operating Temperature†	T _A		-40	85	°C	
Average Forward Input Current	I _F	Single 8-Pin DIP Single SO-8 Widebody		20	mA	2
		Dual 8-Pin DIP Dual SO-8		15			1, 3
Reverse Input Voltage	V _R	8-Pin DIP, SO-8		5	V	1
		Widebody		3		
Input Power Dissipation	P _I	Widebody		40	mW	
Supply Voltage (1 Minute Maximum)	V _{CC}			7	V	
Enable Input Voltage (Not to Exceed V _{CC} by more than 500 mV)	V _E	Single 8-Pin DIP Single SO-8 Widebody		V _{CC} + 0.5	V	
Enable Input Current	I _E			5	mA	
Output Collector Current	I _O			50	mA	1
Output Collector Voltage (Selection for Higher Output Voltages up to 20 V is Available.)	V _O			7	V	1
Output Collector Power Dissipation	P _O	Single 8-Pin DIP Single SO-8 Widebody		85	mW	
		Dual 8-Pin DIP Dual SO-8		60			1, 4
Lead Solder Temperature (Through Hole Parts Only)	T _{LS}	8-Pin DIP	260°C for 10 sec., 1.6 mm below seating plane			
		Widebody	260°C for 10 sec., up to seating plane			
Solder Reflow Temperature Profile (Surface Mount Parts Only)		SO-8 and Option 300	See Package Outline Drawings section			

*JEDEC Registered Data (for 6N137 only).

Ratings apply to all devices except otherwise noted in the **Package column.

†0°C to 70°C on JEDEC Registration.

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Max.	Units
Input Current, Low Level	I _{FL} *	0	250	μA
Input Current, High Level ^[1]	I _{FH} **	5	15	mA
Power Supply Voltage	V _{CC}	4.5	5.5	V
Low Level Enable Voltage†	V _{EL}	0	0.8	V
High Level Enable Voltage†	V _{EH}	2.0	V _{CC}	V
Operating Temperature	T _A	-40	85	°C
Fan Out (at R _L = 1 kΩ) ^[1]	N		5	TTL Loads
Output Pull-up Resistor	R _L	330	4 k	Ω

*The off condition can also be guaranteed by ensuring that V_{FL} ≤ 0.8 volts.

**The initial switching threshold is 5 mA or less. It is recommended that 6.3 mA to 10 mA be used for best performance and to permit at least a 20% LED degradation guardband.

†For single channel products only.

Electrical Specifications

Over recommended temperature ($T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$) unless otherwise specified. All Typical at $V_{CC} = 5\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$. All enable test conditions apply to single channel products only. See note 5.

Parameter	Sym.	Package	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions	Fig.	Note		
High Level Output Current	I_{OH}^*	All		5.5	100	μA	$V_{CC} = 5.5\text{ V}$, $V_E = 2.0\text{ V}$, $V_O = 5.5\text{ V}$, $I_F = 250\ \mu\text{A}$	1	1, 6, 19		
Input Threshold Current	I_{TH}	Single Channel		2.0	5.0	mA	$V_{CC} = 5.5\text{ V}$, $V_E = 2.0\text{ V}$, $V_O = 0.6\text{ V}$, $I_{OL}(\text{Sinking}) = 13\text{ mA}$	2, 3	19		
		Widebody		2.5							
Low Level Output Voltage	V_{OL}^*	8-Pin DIP		0.35	0.6	V	$V_{CC} = 5.5\text{ V}$, $V_E = 2.0\text{ V}$, $I_F = 5\text{ mA}$, $I_{OL}(\text{Sinking}) = 13\text{ mA}$	2, 3, 4, 5	1, 19		
		SO-8		0.4							
High Level Supply Current	I_{CCH}	Single Channel		7.0	10.0*	mA	$V_E = 0.5\text{ V}$ $V_{CC} = 5.5\text{ V}$ $I_F = 0\text{ mA}$		7		
		Widebody		6.5							
Low Level Supply Current	I_{CCL}	Single Channel		9.0	13.0*	mA	$V_E = 0.5\text{ V}$ $V_{CC} = 5.5\text{ V}$ $I_F = 10\text{ mA}$		8		
		Widebody		8.5							
High Level Enable Current	I_{EH}	Single Channel		-0.7	-1.6	mA	$V_{CC} = 5.5\text{ V}$, $V_E = 2.0\text{ V}$				
		Widebody		-0.9	-1.6						
Low Level Enable Current	I_{EL}^*						$V_{CC} = 5.5\text{ V}$, $V_E = 0.5\text{ V}$		9		
High Level Enable Voltage	V_{EH}		2.0			V			19		
Low Level Enable Voltage	V_{EL}				0.8	V					
Input Forward Voltage	V_F	8-Pin DIP	SO-8	1.4	1.5	1.75*	V	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$I_F = 10\text{ mA}$	6, 7	1
			Widebody	1.3		1.80					
		Widebody		1.25	1.64	1.85	V	$T_A = 25^\circ\text{C}$			
				1.2		2.05					
Input Reverse Breakdown Voltage	BV_R^*	8-Pin DIP	5			V	$I_R = 10\ \mu\text{A}$		1		
		SO-8									
Widebody		3				$I_R = 100\ \mu\text{A}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$					
Input Diode Temperature Coefficient	$\Delta V_F / \Delta T_A$	8-Pin DIP		-1.6		mV/°C	$I_F = 10\text{ mA}$	7	1		
		SO-8		-1.9							
Input Capacitance	C_{IN}	8-Pin DIP		60		pF	$f = 1\text{ MHz}$, $V_F = 0\text{ V}$		1		
		SO-8		70							
Widebody			70								

*JEDEC registered data for the 6N137. The JEDEC Registration specifies 0°C to $+70^\circ\text{C}$. HP specifies -40°C to $+85^\circ\text{C}$.

ANEXO H. DATASHEET PUENTE H LMD-18200T



February 7, 2011

LMD18200

3A, 55V H-Bridge

General Description

The LMD18200 is a 3A H-Bridge designed for motion control applications. The device is built using a multi-technology process which combines bipolar and CMOS control circuitry with DMOS power devices on the same monolithic structure. Ideal for driving DC and stepper motors; the LMD18200 accommodates peak output currents up to 6A. An innovative circuit which facilitates low-loss sensing of the output current has been implemented.

Features

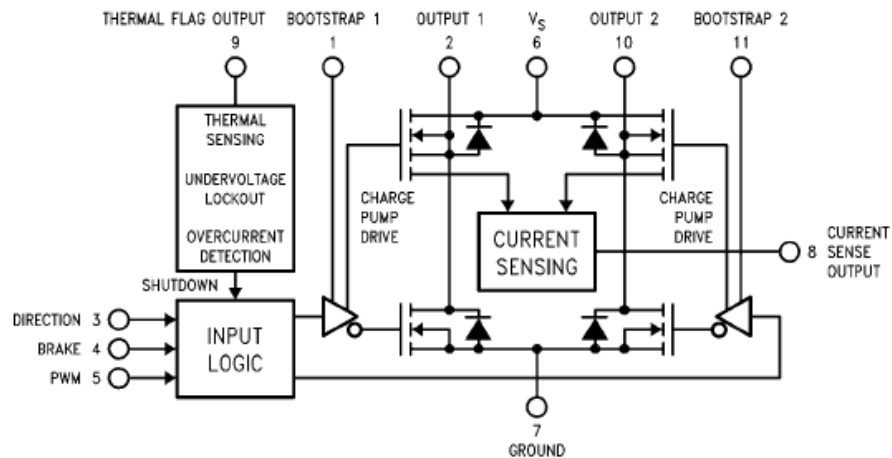
- Delivers up to 3A continuous output
- Operates at supply voltages up to 55V
- Low $R_{DS(ON)}$ typically 0.33 Ω per switch at 3A
- TTL and CMOS compatible inputs

- No "shoot-through" current
- Thermal warning flag output at 145°C
- Thermal shutdown (outputs off) at 170°C
- Internal clamp diodes
- Shorted load protection
- Internal charge pump with external bootstrap capability

Applications

- DC and stepper motor drives
- Position and velocity servomechanisms
- Factory automation robots
- Numerically controlled machinery
- Computer printers and plotters

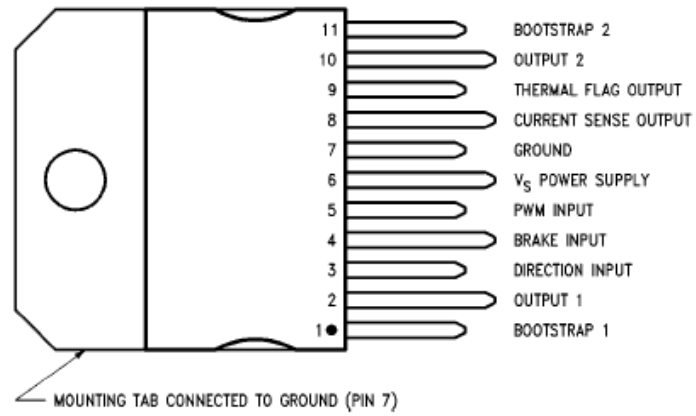
Functional Diagram



1056801

FIGURE 1. Functional Block Diagram of LMD18200

Connection Diagram and Ordering Information



**11-Lead TO-220 Package
Top View
Order Number LMD18200T
See NS Package TA11B**

1056802

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage (V_S , Pin 6)	60V
Voltage at Pins 3, 4, 5, 8 and 9	12V
Voltage at Bootstrap Pins (Pins 1 and 11)	$V_{OUT} + 16V$
Peak Output Current (200 ms)	6A
Continuous Output Current (Note 2)	3A

Power Dissipation (Note 3)	25W
Power Dissipation ($T_A = 25^\circ\text{C}$, Free Air)	3W
Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$	150°C
ESD Susceptibility (Note 4)	1500V
Storage Temperature, T_{STG}	-40°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)	300°C

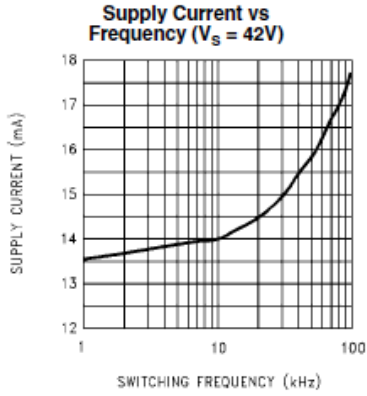
Operating Ratings (Note 1)

Junction Temperature, T_J	-40°C to +125°C
V_S Supply Voltage	+12V to +55V

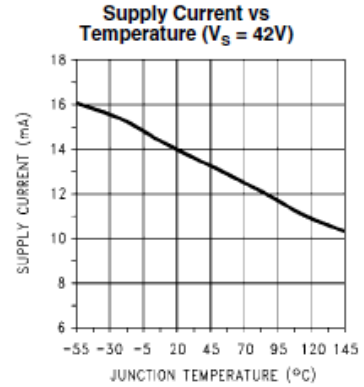
Electrical Characteristics (Note 5)

The following specifications apply for $V_S = 42V$, unless otherwise specified. **Boldface** limits apply over the entire operating temperature range, $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, all other limits are for $T_A = T_J = 25^\circ\text{C}$.

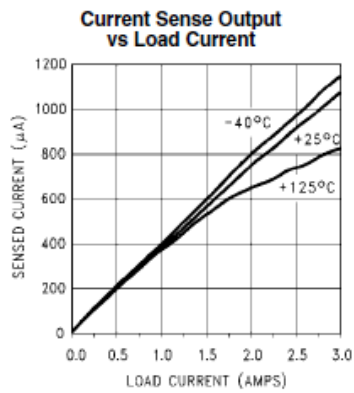
Symbol	Parameter	Conditions	Typ	Limit	Units
$R_{DS(ON)}$	Switch ON Resistance	Output Current = 3A (Note 6)	0.33	0.40/ 0.6	Ω (max)
$R_{DS(ON)}$	Switch ON Resistance	Output Current = 6A (Note 6)	0.38	0.45/ 0.6	Ω (max)
V_{CLAMP}	Clamp Diode Forward Drop	Clamp Current = 3A (Note 6)	1.2	1.5	V (max)
V_{IL}	Logic Low Input Voltage	Pins 3, 4, 5		-0.1 0.8	V (min) V (max)
I_{IL}	Logic Low Input Current	$V_{IN} = -0.1V$, Pins = 3, 4, 5		-10	μA (max)
V_{IH}	Logic High Input Voltage	Pins 3, 4, 5		2 12	V (min) V (max)
I_{IH}	Logic High Input Current	$V_{IN} = 12V$, Pins = 3, 4, 5		10	μA (max)
	Current Sense Output	$I_{OUT} = 1A$ (Note 8)	377	325/300 425/450	μA (min) μA (max)
	Current Sense Linearity	$1A \leq I_{OUT} \leq 3A$ (Note 7)	± 6	± 9	%
	Undervoltage Lockout	Outputs turn OFF		9 11	V (min) V (max)
T_{JW}	Warning Flag Temperature	Pin 9 $\leq 0.8V$, $I_L = 2\text{ mA}$	145		$^\circ\text{C}$
$V_F(ON)$	Flag Output Saturation Voltage	$T_J = T_{JW}$, $I_L = 2\text{ mA}$	0.15		V
$I_F(OFF)$	Flag Output Leakage	$V_F = 12V$	0.2	10	μA (max)
T_{JSD}	Shutdown Temperature	Outputs Turn OFF	170		$^\circ\text{C}$
I_S	Quiescent Supply Current	All Logic Inputs Low	13	25	mA (max)
t_{Don}	Output Turn-On Delay Time	Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$ Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	300 300		ns
t_{on}	Output Turn-On Switching Time	Bootstrap Capacitor = 10 nF Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$ Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	100 80		ns
t_{Doff}	Output Turn-Off Delay Times	Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$ Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	200 200		ns
t_{off}	Output Turn-Off Switching Times	Bootstrap Capacitor = 10 nF Sourcing Outputs, $I_{OUT} = 3A$ Sinking Outputs, $I_{OUT} = 3A$	75 70		ns
t_{pw}	Minimum Input Pulse Width	Pins 3, 4 and 5	1		μs
t_{opr}	Charge Pump Rise Time	No Bootstrap Capacitor	20		μs



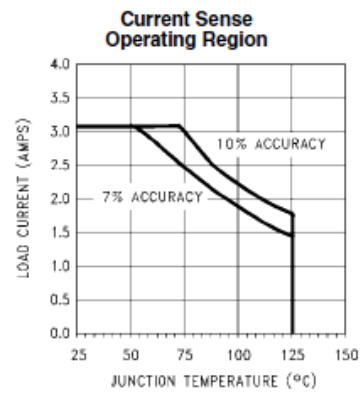
1056820



1056821

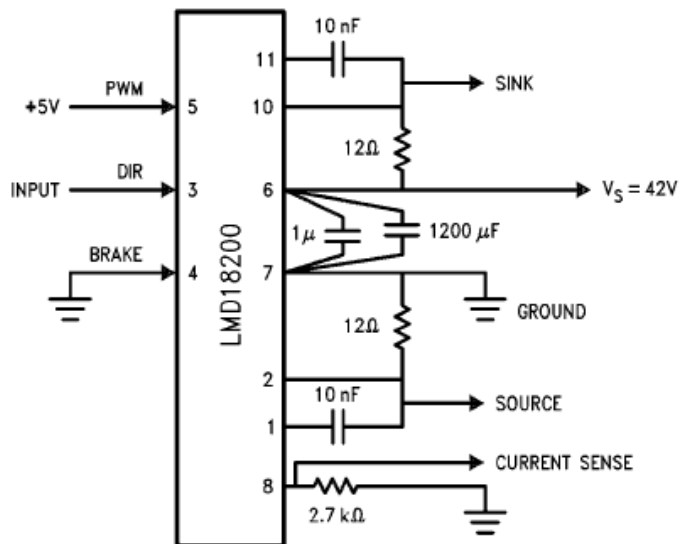


1056822



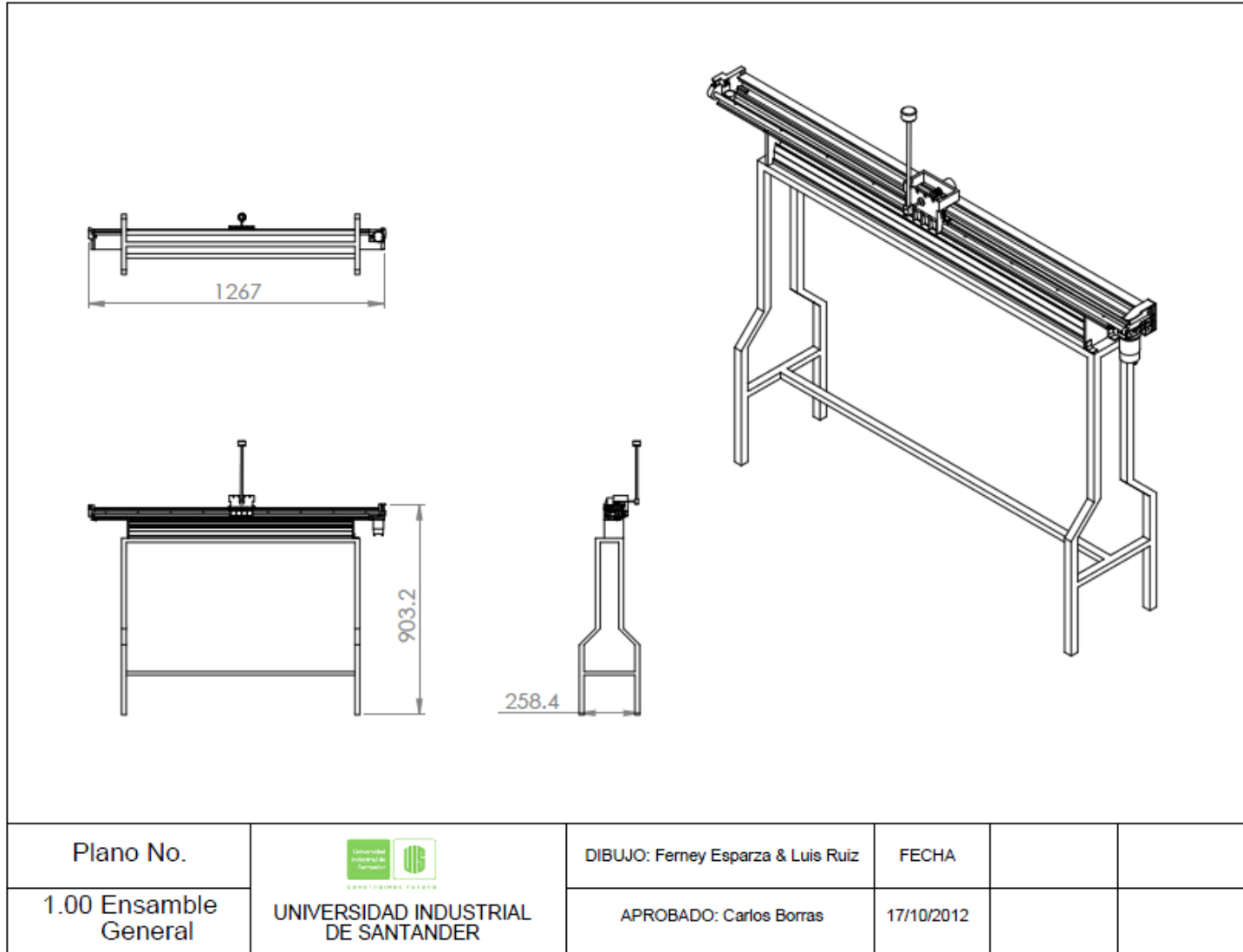
1056823

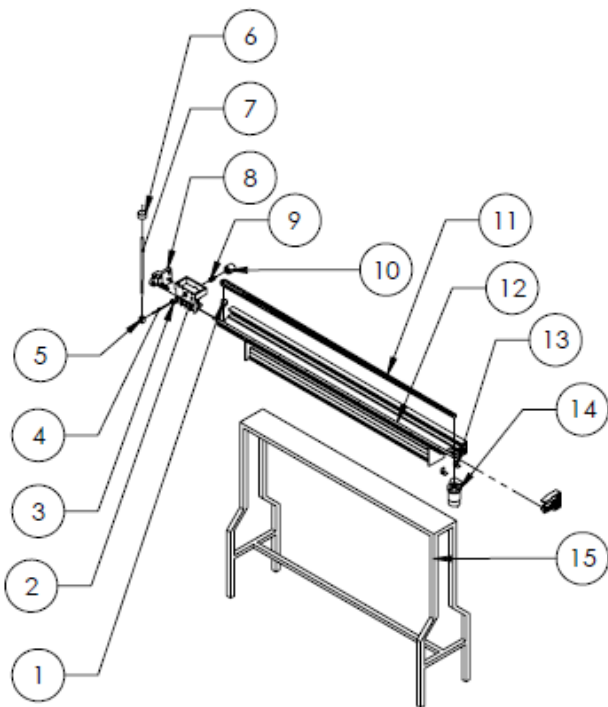
Test Circuit




1056808

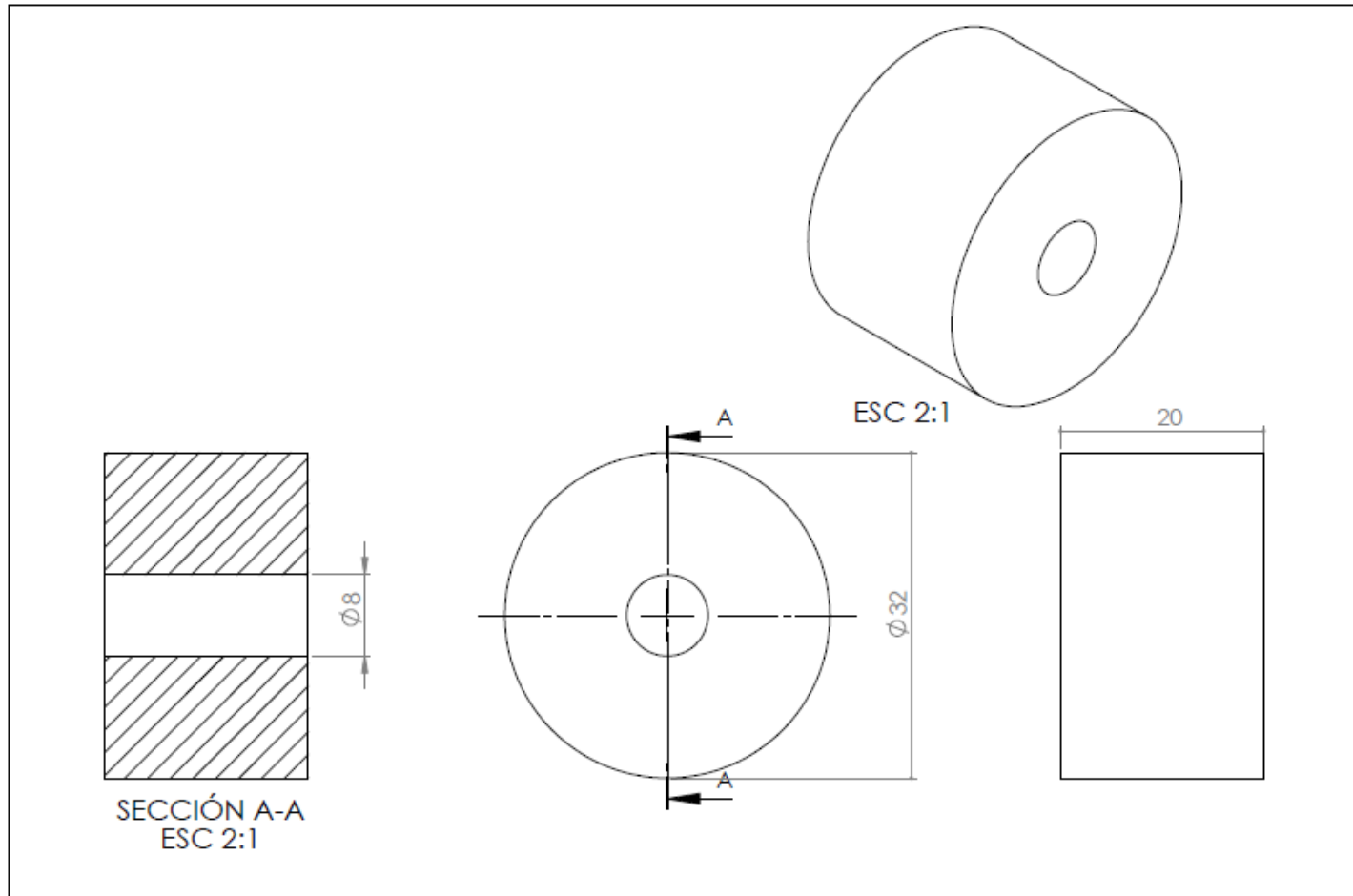
ANEXO I. PLANOS




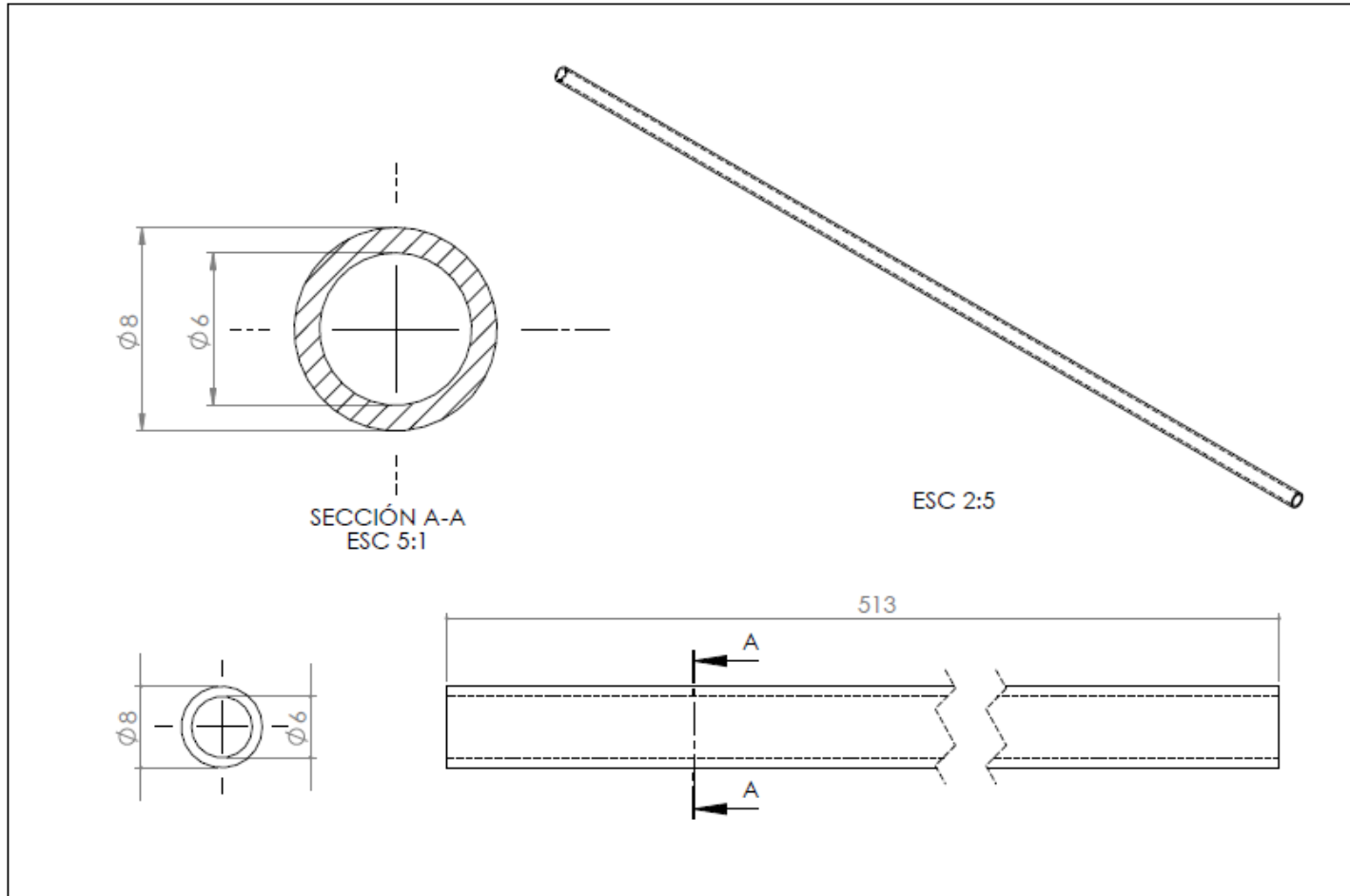



Número	Nombre	Cantidad	Plano No.
1	Polea	1	no especificado
2	Carro	1	no especificado
3	Rodamiento	1	no especificado
4	Eje de la barra	1	1.05
5	Union	1	1.04
6	Disco	1	1.02
7	Barra	1	1.03
8	Tapa	2	no especificado
9	Acople	1	no especificado
10	Encoder rotativo	1	no especificado
11	Correa	1	no especificado
12	Encoder strip	1	no especificado
13	Platina de soporte	4	no especificado
14	Motor	1	no especificado
15	Mesa	1	no especificado

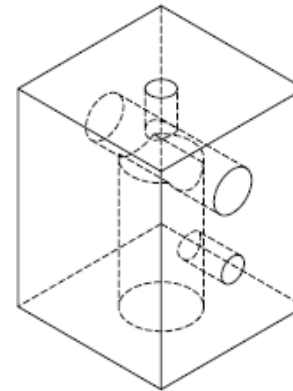
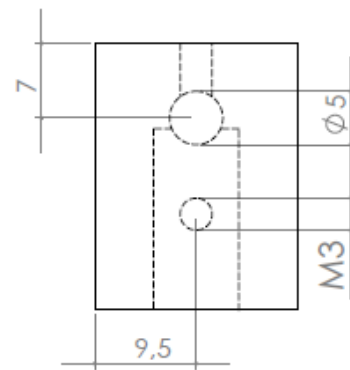
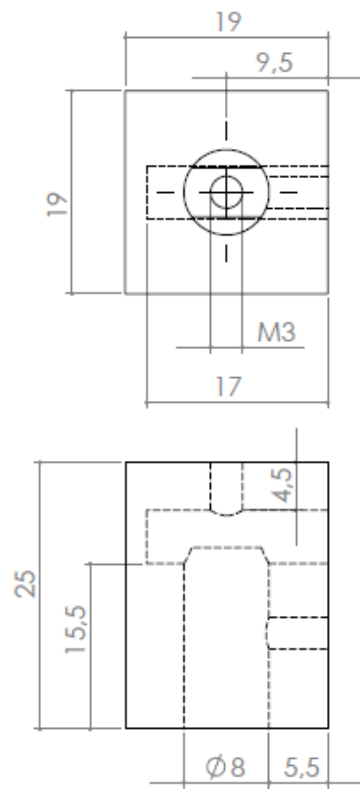
Plano No.	 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER <small>CONSTRUYENDO FUTURO</small>	DIBUJO: Ferney Esparza & Luis Ruiz	FECHA		
1.01 Vista Exploracionada		APROBADO: Carlos Borrás	17/10/2012		




Plano No.	 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	DIBUJO: Ferney Esparza & Luis Ruiz	FECHA	MATERIAL	ESCALA
1.02 Disco		APROBADO: Carlos Borrás	17/10/2012	ACERO AISI 1020	2:1

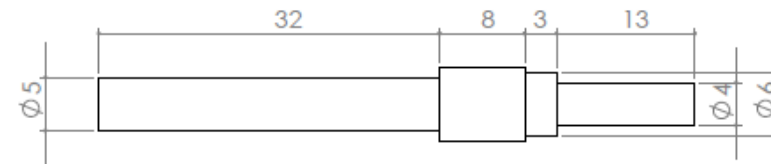
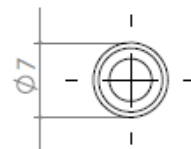
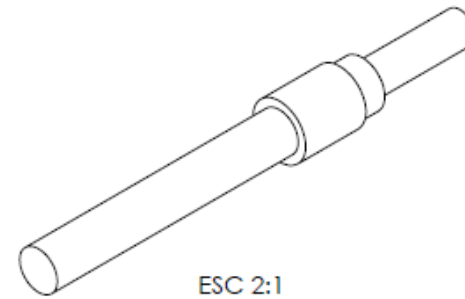



Plano No.	 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	DIBUJO: Ferney Esparza & Luis Ruiz	FECHA	MATERIAL	ESCALA
1.03 Barra			APROBADO: Carlos Borrás	17/10/2012	ALUMINIO	2:1



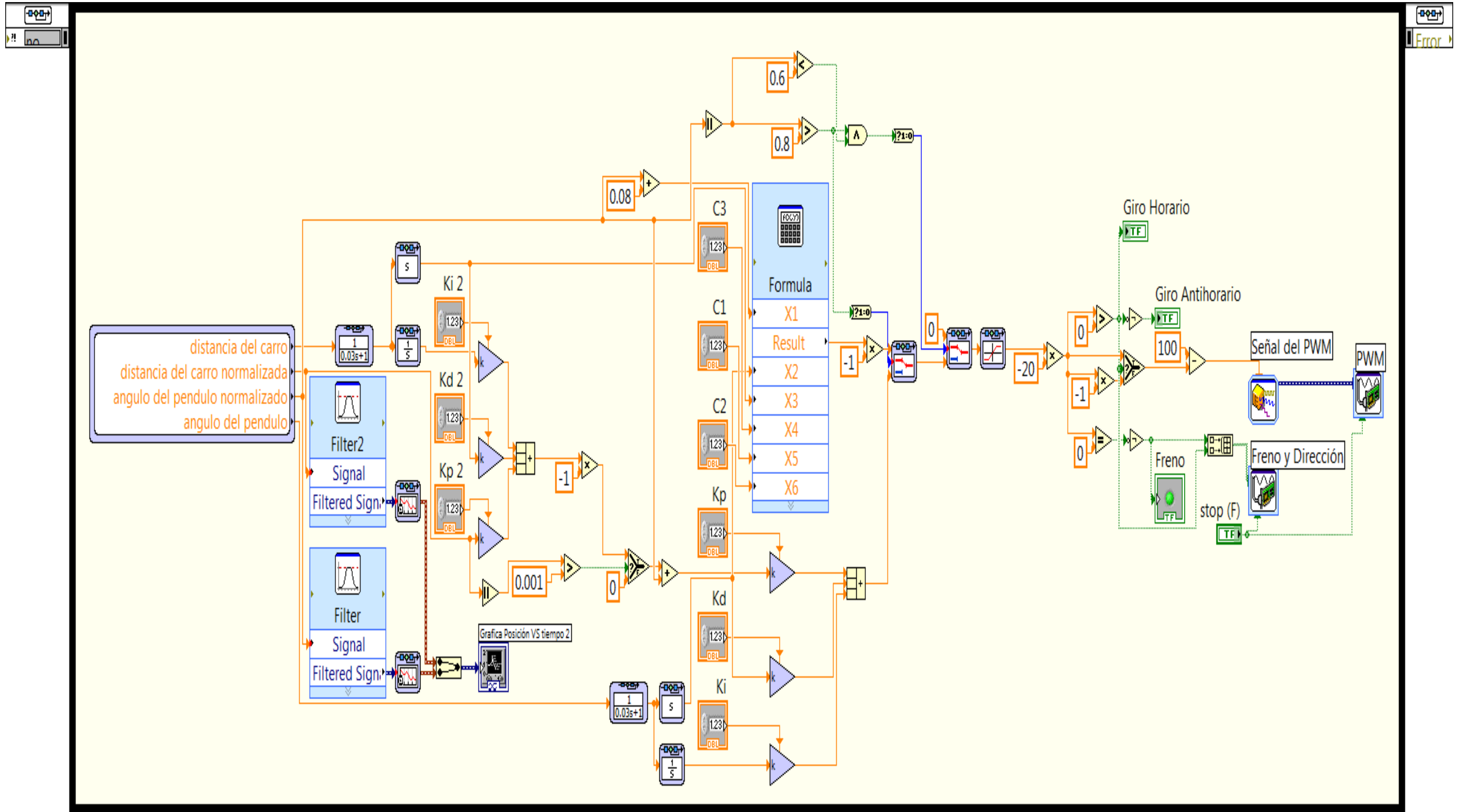
ESC 2:1

Plano No.	 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	DIBUJO: Ferrey Esparza & Luis Ruiz	FECHA	MATERIAL	ESCALA
1.04 Unión		APROBADO: Carlos Borrás	17/10/2012	ALUMINIO	2:1

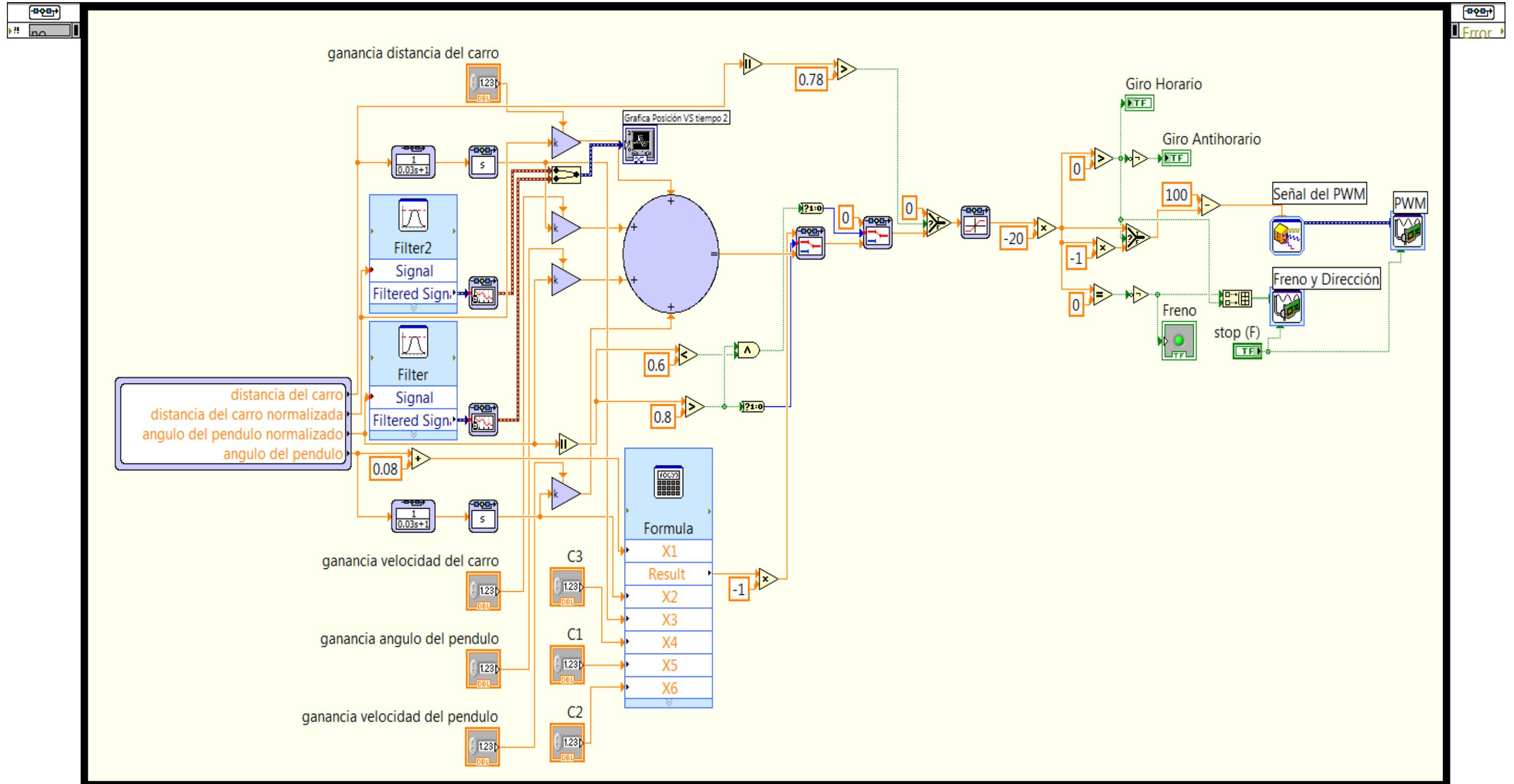


Plano No.	 UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER <small>CONSTRUYENDO FUTURO</small>	DIBUJO: Ferney Esparza & Luis Ruiz	FECHA	MATERIAL	ESCALA
1.05 Eje		APROBADO: Carlos Borrás	17/10/2012	ACERO AISI 1020	2:1

ANEXO J. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL PID



ANEXO K. DIAGRAMA DE BLOQUES CONTROL EN ESPACIO DE ESTADOS



ANEXO L. ELEMENTOS MECÁNICOS ADICIONALES

- Acople: Se opta por usar un acople de aluminio de 4[mm] x 4[mm] ubicado entre el encoder y el eje que está conectado al péndulo, este geométricamente cuenta con una espiral que permite absorber el desalineamiento para no afectar notoriamente la señal medida por el encoder rotativo.

Figura 78. Acople entre el eje y encoder



Fuente: Web Autonics

- Rodamiento: La plataforma cuenta con un rodamiento referencia 606-2RS ubicado en el carro para dar soporte al eje, este es de 6 [mm] de diámetro interno y del cual se adjunta el respectivo catálogo. La carga estática y dinámica que soporta este rodamiento es adecuada para la función que va a desarrollar teniendo en cuenta que la magnitud de la fuerza y revoluciones a las que opera son bajas.

Figura 79. Rodamiento 606-2RS

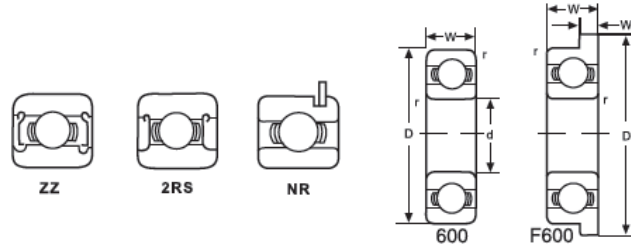


Fuente: Web China suppliers

ANEXO M. CATÁLOGO RODAMIENTO 606-2RS

METRIC MINNATURE & INSTRUMENT BEARINGS

600, F600 METRIC SERIES





Bearing No.	Bore d	Outer Diameter D	Width W		Flange Dimensions		Radius r	Basic Load Rating lbs.		Weight lbs. (Open)
			Open	Shielded	D _f	Open W _f		Dynamic C	Static C ₀	
681	1	3	1	-	-	-	0.15	18	5	*
691	1	4	1.6	-	-	-	0.2	35	9.5	*
681X	1.5	4	1.2	2	5	0.4	0.2	36	10	*
691X	1.5	5	2	2.6	6.5	0.6	0.3	53	15	*
601X	1.5	6	2.5	3	7.5	0.6	0.3	62	19	*
682	2	5	1.5	2.3	6.1	0.5	0.2	38	11	*
692	2	6	2.3	3	7.5	0.6	0.3	63	20	*
602	2	7	2.8	3.5	8.5	0.7	0.3	86	28	.001
682X	2.5	6	1.8	2.6	7.1	0.5	0.3	47	16	*
692X	2.5	7	2.5	3.5	8.5	0.7	0.3	64	22	*
602X	2.5	8	2.8	4	9.5	0.7	0.3	123	39	.001
683	3	7	2	3	8.1	0.5	0.3	87	29	*
693	3	8	3	4	9.5	0.7	0.3	126	40	*
603	3	9	3	5	10.5	0.7	0.3	142	49	.002
623	3	10	4	4	11.5	1.0	0.3	144	50	.003
633	3	13	5	5	15	1.0	0.5	295	116	.005
684	4	9	2.5	4	10.3	0.6	0.3	144	50	.001
694	4	11	4	4	12.5	1.0	0.3	161	62	.004
604	4	12	4	4	13.5	1.0	0.4	218	80	.005
624	4	13	5	5	15	1.0	0.4	295	110	.007
634	4	16	5	5	**	**	0.3	395	153	.011
685	5	11	3	5	12.5	0.8	0.3	161	63	.003
695	5	13	4	4	15	1.0	0.4	242	97	.005
605	5	14	5	5	16	1.0	0.4	299	114	.007
625	5	16	5	5	18	1.0	0.3	395	153	.010
635	5	19	6	6	**	**	0.3	525	199	.017
686	6	13	3.5	5	15	1.0	0.3	243	99	.004
696	6	15	5	5	17	1.2	0.4	305	119	.009
606	6	17	6	6	19	1.2	0.5	495	195	.013
626	6	19	6	6	22	1.5	0.5	525	199	.017
636	6	22	7	7	**	**	**	**	**	**
687	7	14	3.5	5	16	1.0	0.3	264	115	.004
697	7	17	5	5	19	1.2	0.3	360	160	*
607	7	19	6	6	**	**	0.3	505	205	.018
627	7	22	7	7	**	**	0.3	750	315	.024
637	7	26	9	9	**	**	**	**	**	**
688	8	16	4	5	18	1.0	0.3	283	131	.007
698	8	19	6	6	22	1.5	0.3	445	194	*
608	8	22	7	7	25	1.5	0.3	750	315	.024
628	8	24	8	8	**	**	0.3	900	355	.026
638	8	28	8	9	**	**	**	**	**	**
689	9	17	4	5	19	1.0	0.3	390	184	.013
699	9	20	6	6	**	**	0.3	560	245	*
609	9	24	7	7	**	**	0.3	765	325	.026
629	9	26	8	8	**	**	0.6	1030	440	.040
639	9	30	10	10	**	**	**	**	**	**

Larger sizes or New size available upon request

ANEXO N. MANUAL DEL USUARIO

En el contenido de este manual se dan los pasos a seguir y las precauciones a tener en cuenta a la hora de poner en funcionamiento el banco. Antes de realizar conexiones o cualquier acción en el banco, se recomienda haber leído el contenido de este manual.

Cuadro 17. Precauciones de seguridad

Elemento	 Peligro	 Precaución	Imagen de muestra
Estado del tomacorriente	Cortocircuito, electrocutamiento, daño de las fuentes de voltaje	Si se encuentra algún deterioro en la toma, usar una extensión eléctrica a un toma en buen estado.	Ver figura 80
Estado del cableado	Cortocircuito, daño en los dispositivos electrónicos	Revisar si hay cables sin recubrimiento, y aislarlos si los hay.	Ver figura 81
Alimentación	Daño en los dispositivos electrónicos	Cerciorarse con un multímetro si las fuentes están entregando el voltaje especificado por cada dispositivo.	Ver Cuadro 18
Fuentes	Picos de corriente, daños en el motor y dispositivos electrónicos	Revisar que las fuentes no hagan ruidos fuertes o extraños al momento	Ver figura 14

		de funcionar.	
Espaciamiento del banco	Golpes entre objetos ajenos al banco y la barra del péndulo, ruptura del eje del péndulo, ruptura del acople	Permitir un espaciamiento de un metro a lado y lado del banco.	Ver figura 82

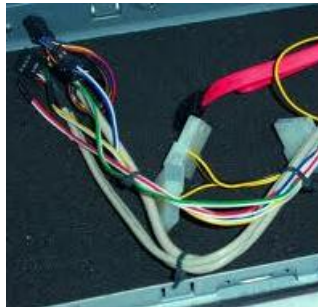
Fuente. Autores

Figura 80. Buen estado del tomacorriente



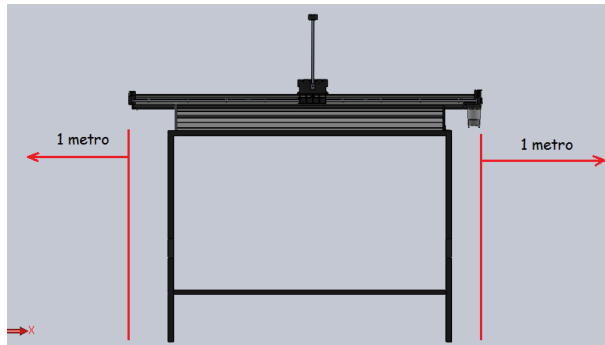
Fuente. Autores

Figura 81. Buen estado del cableado



Fuente. Autores

Figura 82. Espaciamiento del banco



Fuente. Autores

Cuadro 18. Especificaciones de voltaje y corriente para dispositivos electrónicos

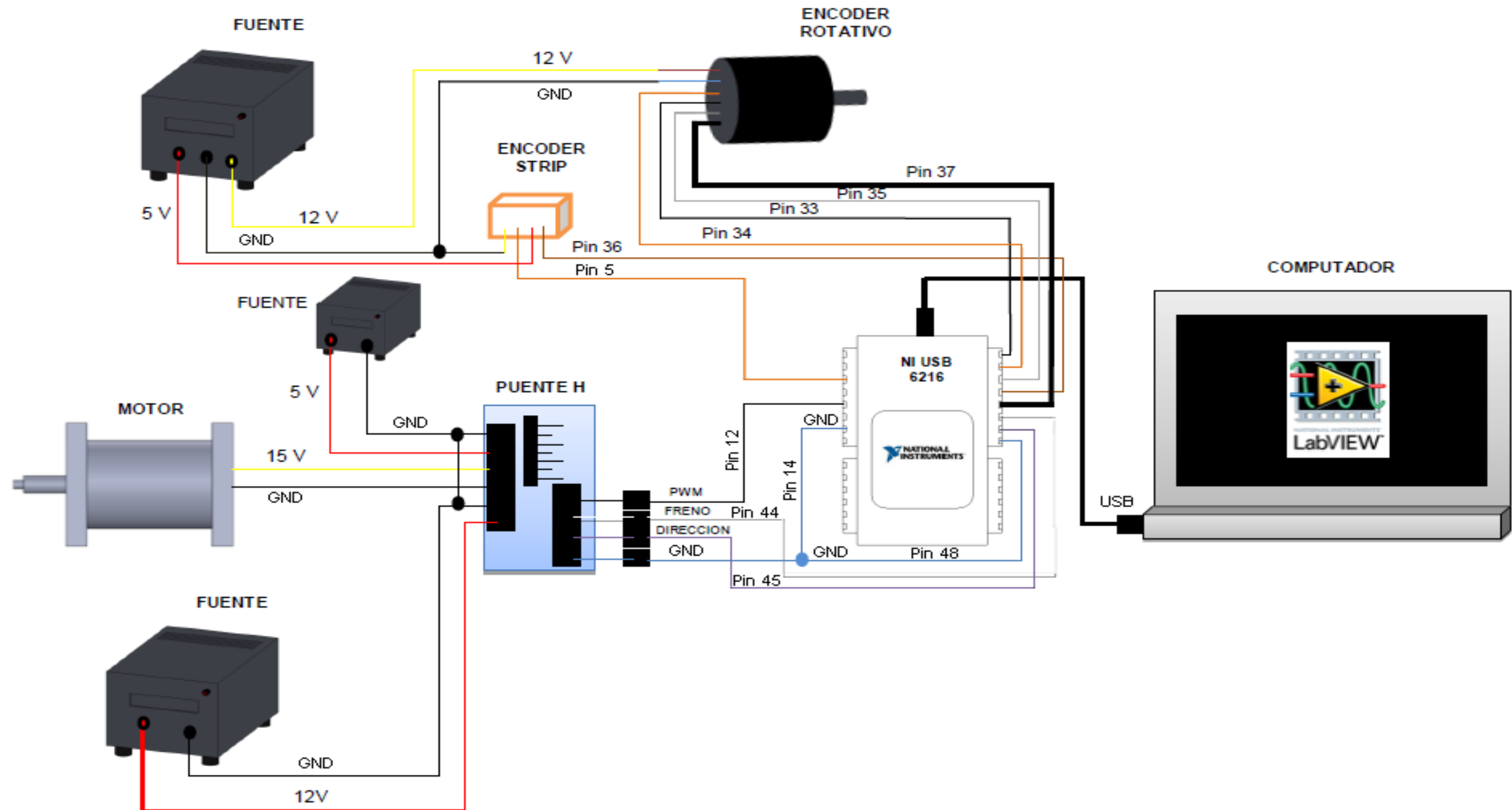
Elemento	Voltaje VDC [V]	Corriente [mA]
Encoder rotacional	12-24	5
Encoder Strip	5	5
Optoacopladores	5	5
Motor	15	100-900

Fuente. Autores

Protocolo de encendido y sintonización del programa

- Revisar que todo esté conectado, o conectar como muestra la figura 83.

Figura 83. Esquema de conexiones eléctricas



Fuente: Autores

- Revisar que los pernos en el prisma y en el acople están bien ajustados.

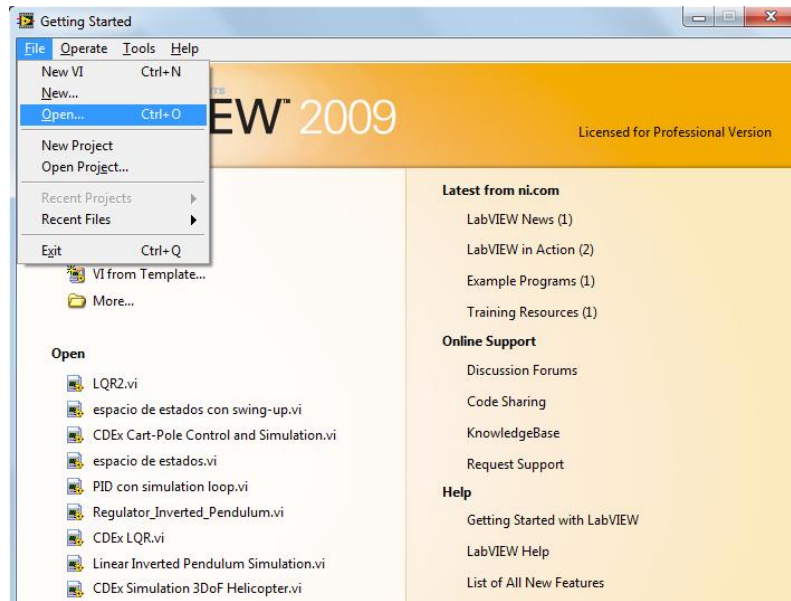
Figura 84. Ajuste de pernos



Fuente. Autores

- Encender las fuentes. Se recomienda que cada una de estas sea conectada en tomas distintas y que estén lo más alejadas posible, puesto que el campo magnético que se genera alrededor de ellas hace interferencia en su funcionamiento (se generan picos de corriente que desfasan las lecturas de los encoders).
- Abrir **Labview** y el programa con el que se desea controlar el péndulo (control PID o control en espacio de estados). Esto se puede hacer desde la ventana inicial de LABVIEW desplegando el menú de archivo, dando clic en abrir y escogiendo el programa a ejecutar. Ver figura 85.

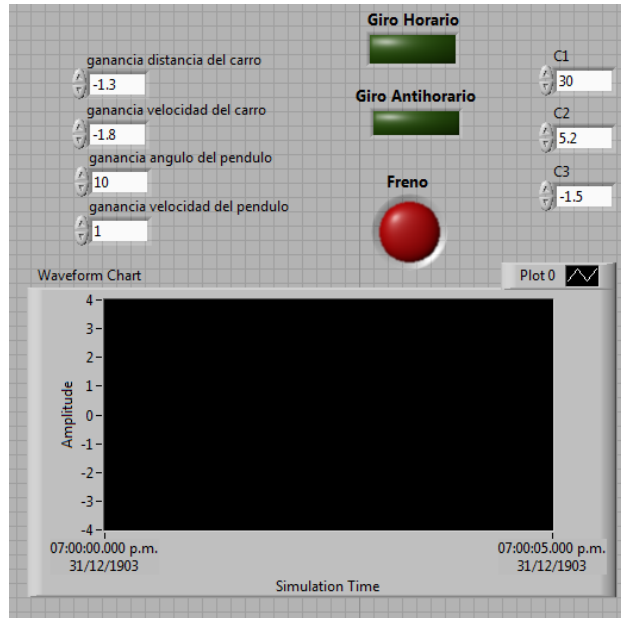
Figura 85. Ventana inicial de Labview



Fuente. Labview 2009

➤ Cuando se halla desplegado el panel frontal del Labview, este debe estar configurado como lo muestra la figura 86 (en el caso de control en espacio de estados). Los valores mostrados dentro de las casillas blancas son tomados por defecto siempre que se abra el programa. Estos valores son los que hicieron funcionar el péndulo en el momento en que se desarrolló el proyecto, pero como el control del péndulo es sensible a distintas características como el ajuste de la correa, lubricación de la guía del carro, tamaño de la barra, voltaje de alimentación, etc. Puede que sea necesario reajustar el valor de cada una de estas constantes en el panel frontal para el correcto funcionamiento del banco.

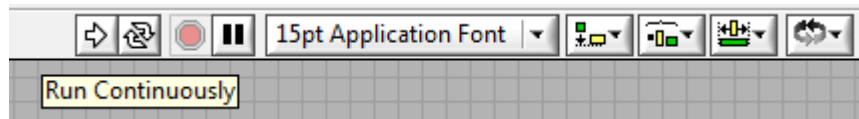
Figura 86. Configuración del panel frontal



Fuente. Labview 2009

➤ Con el fin de asegurar que las ganancias del control estén sintonizadas, se debe poner a correr el programa (con el botón Run Continuously) con la barra desde la posición de reposo (menos π radianes), luego la barra se debe subir hasta una posición cercana a la posición vertical (cero radianes, set-point) y con la barra allí se debe encender el switch del motor.

Figura 87. Botón Run Continuously

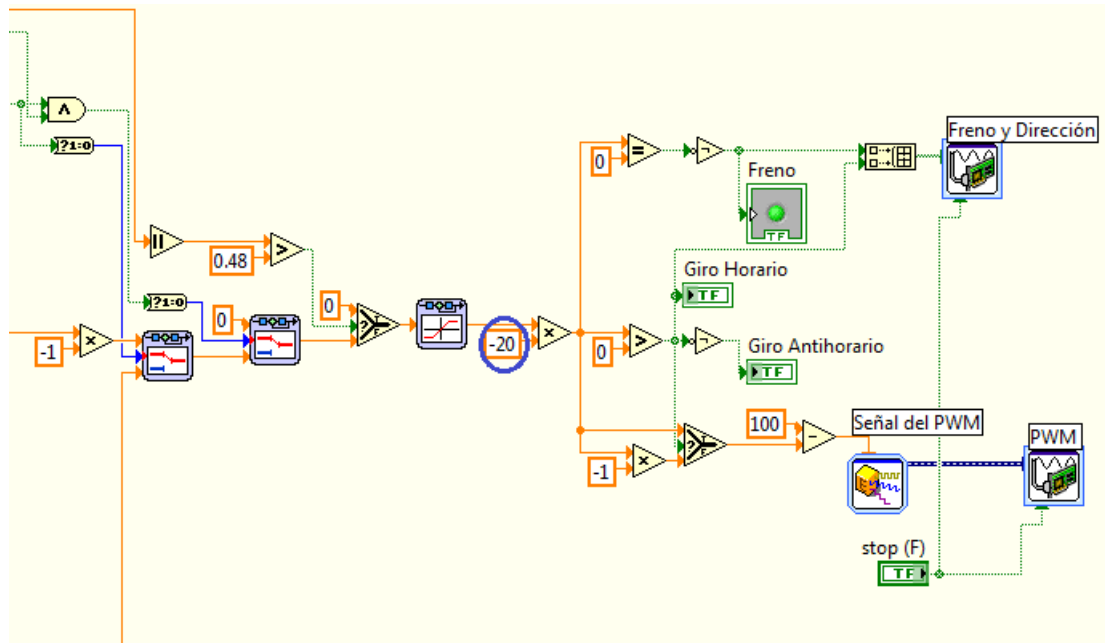


Fuente. Labview

Haciendo esto, el sistema de control entra en funcionamiento y la barra debe permanecer en posición vertical, si no, se deben cambiar el valor de las ganancias de los estados hasta que esto suceda. Si el sistema responde contrario a lo que se espera (que al mover la barra para un lado, el carro se mueva para el lado

contrario) se deben intercambiar los cables de entrada al motor o en el diagrama de bloques cambiar el signo menos veinte. Ver figura 88.

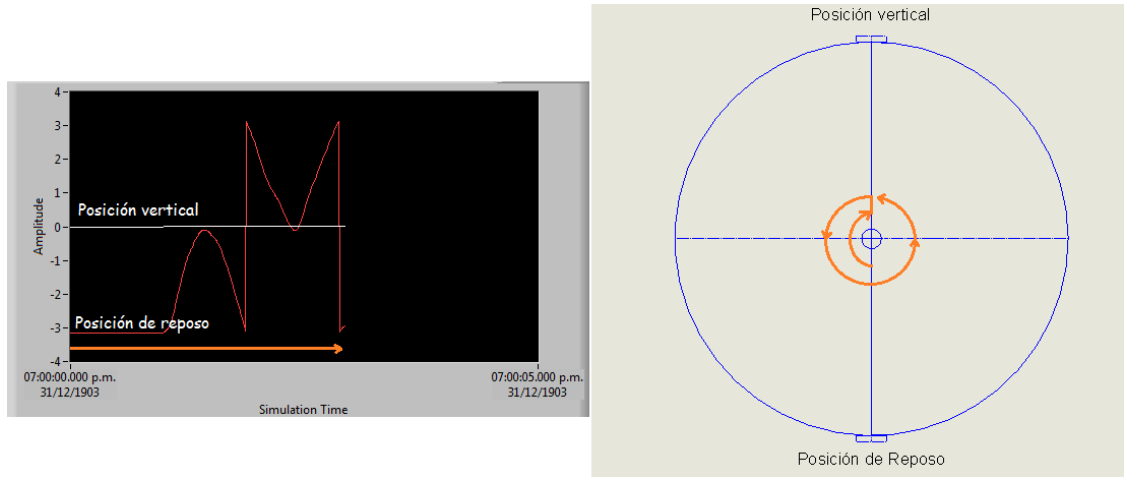
Figura 88. Inversor de señal en el diagrama de bloques



Fuente. Labview 2009

➤ En los dos programas (PID y espacio de estados) siempre se debe iniciar la depuración con la barra en la posición de reposo, puesto se programaron para que reconocieran la posición vertical como cero radianes y el reposo como menos π o π radianes (ver figura 89).

Figura 89. Normalización del ángulo



Fuente. Autores

La normalización del ángulo, se hace con el fin de que el péndulo reconozca la posición vertical como el set-point, sin importar si el swing up se hace por la derecha o por la izquierda. Esto también se puede ver en la figura anterior.

Es posible que el swing up también se vea afectado por ciertas características como el temple de la correa, lubricación, etc. Entonces, si este no está funcionando de forma correcta se debe hacer la respectiva sintonización de las ganancias identificadas como C1, C2 y C3 en el panel frontal.

Una vez se haya realizado lo anteriormente listado, se puede depurar el programa y cerrar el switch del motor, con la barra desde la posición de reposo, y el programa que se esté utilizando se encargará de subir la barra a su posición vertical y mantenerla así por un tiempo moderado (aún si esta es perturbada suavemente).

Nota: La sintonización no será muy complicada si se comienza con los siguientes valores.

Cuadro 19. Valores para iniciar la sintonización en el control PID posición carro y ángulo del péndulo

Número del lazo de control	Kp	Kd	Ki
Lazo 1 (posición del carro)	1	0	0
Lazo 2 (ángulo de la barra)	0.1	0.01	0

Fuente. Autores

Cuadro 20. Valores para iniciar la sintonización en el control espacio de estados

Ganancia de la distancia del carro	Ganancia de la velocidad del carro	Ganancia del ángulo del péndulo	Ganancia de la velocidad del péndulo
-1	-1	5	1

Fuente. Autores

Cuadro 21. Valores para iniciar la sintonización en el swing up

C1	C2	C3
10	1	-1

Fuente. Autores

ANEXO O. CATÁLOGO PRISIONEROS



PRISIONERO SOCKET (Milimétricos)

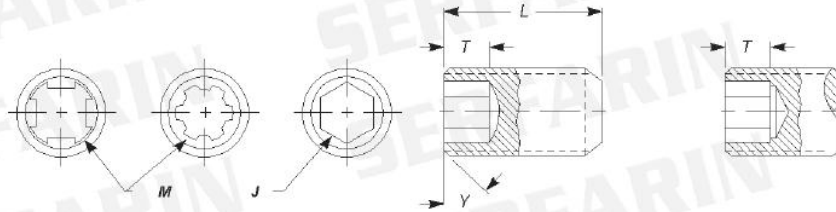


Tabla 1 Dimensiones de los Prisioneros milimétricos

D	Hilos por Rosca	J	M	L	T					
					Contacto Dominante Mínimo					
					Diámetro de la taza y del punto plano		Cono y Punto Oval		Puntos medios	
Hex. T_n	Spl. T_a	Hex. T_n	Spl. T_a	Hex. T_b	Spl. T_e					
		Nom	Nom		Min	Min	Min	Min	Min	Min
1.6	0.35	0.7	0.84	1.5	0.6	0.6	0.6	0.6	...	...
				2	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.6
				2.5	1.0	0.7	1.0	0.7	0.7	0.7
				3	1.26	0.7	1.26	0.7	1.26	0.7
2	0.4	0.9	0.84	1.5	0.6	0.6	0.6	0.6	...	...
				2	0.8	0.7	0.8	0.7	...	...
				2.5	1.0	0.7	1.0	0.7	0.8	0.7
				3	1.2	0.7	1.2	0.7	1.2	0.7
				4	1.5	0.7	1.5	0.7	1.5	0.7
2.5	0.45	1.3	1.22	2	0.7	0.7	0.7	0.7	...	...
				2.5	1.1	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9
				3	1.5	1.0	1.3	1.0	1.2	1.0
				4	1.8	1.0	1.8	1.0	1.8	1.0
3	0.5	1.5	1.52	2	0.6	0.6	...	...	...	...
				2.5	1.1	1.1	0.7	0.7	...	...
				3	1.5	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0
				4	2.1	1.2	1.5	1.2	2.0	1.2
				5	2.1	1.2	2.1	1.2	2.1	1.2
4	0.7	2	2.44	2.5	1.0	1.0	...	...	...	...
				3	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0
				4	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	1.5
				5	2.3	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
				6	2.3	2.0	2.3	2.0	2.3	2.0
5	0.8	2.5	2.82	3	1.2	1.2	...	...	...	...
				4	2.0	2.0	1.2	1.2	...	...
				5	2.7	2.3	1.7	1.7	2.0	2.0
				6	2.7	2.3	2.0	2.0	2.5	2.3
				8	2.7	2.3	2.7	2.3	2.7	2.3
Ve a los Parafos		2.2.1	2.2.1		2.2.2					

D	Hilos por Rosca	J	M	L	T					
					Contacto Dominante mínimo					
					Diámetro de la taza y del punto plano		Cono y punto oval		Puntos medios	
Hex. T_n	Spl. T_a	Hex. T_n	Spl. T_a	Hex. T_b	Spl. T_e					
		Nom	Nom		Min	Min	Min	Min	Min	Min
6	1	3	3.68	4	1.8	1.8	...	...	...	...
				5	2.5	2.5	1.8	1.8	1.5	1.5
				6	3.0	3.0	2.7	2.7	2.0	2.0
				8	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
8	1.25	4	4.65	5	1.8	1.8	...	...	...	...
				6	2.5	2.5	2.3	2.3	1.8	1.8
				8	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0
				10	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
10	1.5	5	5.49	6	2.0	2.0	...	...	...	...
				8	3.6	3.6	3.0	3.0	2.5	2.5
				10	5.0	5.0	4.0	4.0	4.0	4.0
				12	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
12	1.75	6	6.38	8	3.0	3.0	...	...	...	...
				10	4.5	4.5	3.8	3.8	3.5	3.5
				12	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0
				16	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
16	2	8	9.45	10	3.0	3.0	...	...	...	...
				12	4.8	4.8	3.0	3.0	3.0	3.0
				16	8.0	8.0	6.0	6.0	6.0	6.0
				20	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
20	2.5	10	11.53	12	...	...	...	...	...	...
				16	6.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0
				20	9.0	9.0	8.0	8.0	8.0	8.0
				25	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
				30	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
24	3	12	15.11	16	5.0	5.0	...	...	...	...
				20	8.0	8.0	7.0	7.0	6.0	6.0
				25	12.0	12.0	10.0	10.0	10.0	10.0
				30	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
				30	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Ve a los Parafos		2.2.1	2.2.1		2.2.2					