



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PRÁCTICAS PARA EL
LABORATORIO DE FUNDAMENTOS DE CONTROL”

TESIS PROFESIONAL

para obtener el título de:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

ÁREA

Control y Robótica

PRESENTAN:
MÓNICA ÁLVAREZ CARRILLO
CÉSAR BARRÓN VÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS:
DR. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ ICAZA LONGORIA



OCTUBRE DE 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos de parte de Mónica.

A Dios.

Por permitirme llegar hasta este momento, por protegerme y ayudarme en cada paso que doy.

A la UNAM y a mis profesores.

Por abrirme las puertas y proporcionarme las herramientas necesarias para ser una profesionista que se enorgullece pertenecer a esta Institución. A mis profesores por enseñarme que ser Ingeniero también, es ser un excelente humano.

Papá.

Gracias por ser mi amigo, confidente, ejemplo, guía, simplemente por ser el mejor PADRE. Tus risas, tu fortaleza, tu paciencia, tu dedicación, tu apoyo me han forjado por el mejor camino. ¡SEE YOU TOMORROW!

Geno.

Gracias por darme la vida, enseñarme que ante cualquier adversidad se pueden lograr muchas cosas, que la tenacidad es la mi mayor arma y que siempre hay un mano para ayudarnos. ¡TU FORTALEZA ES MI MAYOR EJEMPLO!

Monse.

Gracias por ser mi amiga, confidente, por demostrarme cada día que además de sangre compartimos un gran amor. ¡DE LA MANO POR SIEMPRE!

Papá Jorge y Mamá Loli.

Gracias por su apoyo incondicional, su protección, su cariño, su gran ejemplo. Papá Jorge gracias por motivarme a lograr este sueño y aunque ya no estes ¡LO LOGRAMOS!

Abues.

Gracias por darme el mayor regalo a mi ¡PAPÁ! Gracias por demostrarme que se puede salir adelante con sacrificio y esfuerzo.

Tíos.

Gracias por su presencia en todo momento, por su apoyo incondicional, su tiempo, sus palabras y ese ánimo que me contagian en la vida. ¡CELEBREMOS CON GUSTO SEÑORES...!

Raúl.

Gracias por hacer brillar mis ojos cada día, por tus risas, tu amor, tu confianza, simplemente por ser el hombre ideal. ¡TE AMO!

Fer, Lupita, Jorge, Omar, Val, Andre y Paty.

Gracias por su cariño, por ser esa lucecita que hace que me supere cada día. Esto solo es un pequeño ejemplo de lo que pueden llegar a lograr. ¡LOS ADORO!.

Amigos.

Gracias por los momentos que pasamos, que vivimos y los que vendrán, por su lealtad, bondad, cariño, risas, abrazos...

Ce Gracias intrañable amiga, por tu confianza, apoyo incondicional, cariño, esas charlas amenas...

Juliet Gracias por ayudarme en todo momento, tus pláticas de 5 *min*, tu confianza, tu lealtad...
¡GRACIAS POR PERMITIRME SER PARTE DE SU VIDA, LOS ADORO!.

Mónica A.C.

Agradecimientos de parte de César.

A mis padres.

Por haberme apoyado incondicionalmente desde muy pequeño hasta esta etapa de mi vida. Por haberme hecho una persona fuerte, responsable y con valores, gracias a ustedes esto es el comienzo de una nueva etapa de mi vida en la que únicamente miraré hacia adelante para lograr mis metas y hacia el pasado para aprender de mis errores. Gracias por todo, los quiero.

A mis amigos.

Por haber estado conmigo en los momentos de gloria y desgracia, por creer al igual que yo en la amistad incondicional, realmente somos un gran equipo colegas Adrián, Carlos, Daniel, Luis Enrique y Arturo. Continuaremos, como siempre, hacia adelante obteniendo cada uno de nosotros éxitos como este, porque así somos nosotros y porque aun hay mucho por hacer.

A la UNAM.

Por haberme dado una amplia visión del mundo, la sabiduría y las herramientas para poder elegir la vida que yo quiera, por haberme dado grandes amigos, grandes satisfacciones y muchas experiencias buenas y malas de vida que me han permitido pasar de ser un niño ceceachero a ser un ingeniero titulado el día de hoy. Por esto y más siempre estaré agradecido con la máxima casa de estudios.

César B.V.

Índice

1. Introducción.	7
1.1. Objetivos	8
1.2. Descripción del trabajo.	8
2. Fundamentos teóricos.	9
2.1. Diseño de sistemas de control.	9
2.1.1. Control de sistemas dinámicos con retroalimentación.	9
2.2. Función de Transferencia.	11
2.3. Sistemas con más de una entrada	14
2.4. Realimentación.	15
2.4.1. Ventajas	15
2.4.2. Desventajas	15
2.5. Respuesta estacionaria	15
2.5.1. Características de controladores P, I, D	15
2.5.2. Teorema del valor final	16
2.5.3. Sistemas de segundo orden.	18
2.6. Estabilidad de Sistemas de Control	23
2.6.1. Concepto BIBO de estabilidad	23
2.6.2. Diagrama de polos y ceros.	24
2.7. Criterio de Estabilidad de Nyquist	27
2.7.1. Respuesta en Frecuencia.	27
2.7.2. Gráficas Polares o Diagrama de Nyquist.	27
3. Descripción de sistemas físicos	30
3.1. Módulo de posición-velocidad	30
3.1.1. Módulo <i>G36A/EV</i>	30
3.1.2. Unidad Exterior de velocidad y posición <i>TY36A/EV</i>	31
3.2. Módulo de presión.	32
3.2.1. Módulo <i>G35/EV</i>	32
3.2.2. Unidad Exterior de generación de la magnitud física <i>TY35/EV</i>	32
4. Herramientas de programación.	34
4.1. Preliminares.	34
4.2. Scilab.	34
4.2.1. Instalación.	34
4.2.2. Conectando LabVIEW con Scilab.	34
4.2.3. Comandos en Scilab.	38
4.2.4. Constantes matemáticas.	38
4.2.5. Creación de un vector.	39
4.2.6. Creación de una matriz.	40
4.2.7. Creación de polinomios.	41
4.2.8. Creación de gráficos.	42
4.2.9. Cálculo de la función de transferencia.	43
4.2.10. Respuesta a escalón.	45
4.2.11. Trabajando en espacio de estados.	47
4.2.12. Toolboxes.	48
4.3. LabVIEW	51
4.4. Principales características	51
4.4.1. Programación LabVIEW	52
4.4.2. Partes de un VI.	52
4.4.3. Panel Frontal (Front Panel).	54

4.4.4.	Diagrama de Bloques (Block Diagram).	54
4.4.5.	Paleta de herramientas (Tools palette).	54
5.	Diseño de prácticas	56
5.1.	Prácticas propuestas	56
5.2.	Práctica 1 Módulo de presión	57
5.2.1.	Objetivos.	57
5.2.2.	Material a utilizar	57
5.2.3.	Desarrollo.	62
5.2.4.	Actividad 1 <i>Análisis de un Sistema Amortiguado.</i>	68
5.2.5.	Actividad 2 <i>Sistema Subamortiguado.</i>	71
5.2.6.	Actividad 3 <i>Compensador.</i>	75
5.2.7.	Informe.	76
5.3.	Práctica 2 <i>Módulo de Posición-Velocidad.</i>	81
5.3.1.	Objetivos.	81
5.3.2.	Material a utilizar.	81
5.3.3.	Desarrollo.	86
5.3.4.	Actividad 1 <i>Lazo abierto</i>	91
5.3.5.	Actividad 2 <i>Análisis de un Sistema Sobreamortiguado.</i>	97
5.3.6.	Actividad 3 <i>Análisis de un Sistema Subamortiguado.</i>	100
5.3.7.	Informe.	104
6.	Apéndices.	110
6.1.	Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.	110
6.1.1.	Diferencias entre las tarjetas de adquisición de datos NI USB-6008 y NI USB-6009.	110
6.1.2.	Diagrama de bloques de la tarjeta NI USB-6008/6009.	111
6.1.3.	Puertos digital y analógico de la tarjeta NI USB-6008/6009.	112
6.2.	Acondicionamiento de señal.	115
6.2.1.	Acondicionamiento de señal para el módulo de presión.	115
6.2.2.	Acondicionamiento de señal para el módulo de posición-velocidad.	116
7.	Prácticas.	119
7.1.	Práctica 1 Módulo de presión.	119
7.1.1.	Objetivos.	119
7.1.2.	Material a utilizar	119
7.1.3.	Desarrollo.	124
7.1.4.	Actividad 1 <i>Análisis de un Sistema Amortiguado</i>	130
7.1.5.	Actividad 2 <i>Sistema Subamortiguado.</i>	130
7.1.6.	Actividad 3 <i>Compensador.</i>	131
7.1.7.	Informe.	132
7.2.	Práctica 2 <i>Módulo de Posición-Velocidad.</i>	133
7.2.1.	Objetivos.	133
7.2.2.	Material a utilizar.	133
7.2.3.	Desarrollo.	138
7.2.4.	Actividad 1 <i>Lazo abierto</i>	143
7.2.5.	Actividad 2 <i>Análisis de un Sistema Sobreamortiguado.</i>	144
7.2.6.	Actividad 3 <i>Análisis de un Sistema Subamortiguado.</i>	144
7.2.7.	Informe.	145
8.	Bibliografía	146

1. Introducción.

En la materia de Fundamentos de Control de la carrera de Ingeniería Eléctrica-Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la UNAM actualmente se abordan los temas de acciones de control, estabilidad de sistemas de control, lugar geométrico de las raíces y diseño por medio de la respuesta en frecuencia; se utiliza como apoyo el Laboratorio de Fundamentos de Control que, utilizando equipo analógico, ayuda al alumno a la comprensión de los temas vistos en teoría al desarrollar experimentos sencillos, los cuales incluyen la aplicación o ausencia de controles en plantas conocidas y el análisis de la naturaleza de sus respuestas.

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño de las nuevas prácticas del laboratorio de la asignatura Fundamentos de Control, para hacer más ágil la enseñanza y el aprendizaje de temas tales como los efectos de la retroalimentación, las respuestas transitoria y permanente, respuesta en frecuencia y la estabilidad tomando en cuenta los compensadores PI, PD, PID, redes de adelanto y atraso, y lugar geométrico de las raíces.

En las actuales prácticas de laboratorio de esta asignatura se utilizan los módulos Venetta de velocidad, temperatura y presión, a los cuales se les aplican controles analógicos para ver su respuesta a diferentes entradas conocidas (rampa, escalón y senoidal), la cual es dibujada con un graficador que usa un plumón para pintar la respuesta transitoria sobre papel. La idea es reemplazar los controles analógicos y el graficador por controles y graficadores digitales creados en la PC, los cuales permitan capturar la información y guardar los datos que puedan ser analizados más fácilmente por el alumno y el profesor usando el software matemático Scilab, que es un software de distribución libre.

De esta manera, se empieza a introducir al alumno al uso del software libre, el cual presenta ventajas frente al software comercial tales como ser gratuito y tener la posibilidad de ser modificado y adaptado a las necesidades del usuario, gracias a lo cual hay muchas herramientas en la red hechas por investigadores, ingenieros, programadores, científicos y cualquier persona de cualquier parte del mundo que hacen uso de este tipo de software.

1.1. Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son varios:

- Crear nuevas series de prácticas de laboratorio de la asignatura de Fundamentos de Control.
- Ayudar al alumno a comprender mejor el comportamiento y control de una planta (motor y compresor).
- Introducir al alumno en el uso de software libre (Scilab).
- Evitar que la Universidad compre licencias costosas de software como MatLab fomentando el uso del software libre Scilab.

Se utilizarán los módulos de posición-velocidad y de presión que usan circuitos analógicos para hacer algún control para aplicarlo a una planta (motor o compresor). El estudiante se limitará a alambrar sus diferentes terminales. Otro de los objetivos de este trabajo es hacer el control mediante una computadora y poder visualizar mejor la respuesta de la planta en un graficador de la misma computadora, para poder guardar datos y hacer más ágil la parte técnica de las prácticas.

1.2. Descripción del trabajo.

Se pretende reemplazar los controles analógicos por controles digitales, por lo tanto se revisará qué entradas y salidas se necesitan para leer la respuesta de una planta (motor o compresor), para enviar las señales de control a esta y enviar al control digital las señales de realimentación captadas por los sensores.

Se ha decidido usar el software LabVIEW para realizar los controles digitales ya que nos permite de manera sencilla la creación de instrumentos virtuales en una PC o computadora portátil. Usando una tarjeta de adquisición de datos, se puede obtener información de algún sistema físico (mecánico, eléctrico, hidráulico, etc.) para procesarla y posteriormente enviarla a través de esta hacia el sistema físico que se está trabajando.

El uso de LabVIEW también permite leer la respuesta de un sistema físico, mostrar la gráfica de la historia de su comportamiento y guardar los datos leídos para ser utilizados posteriormente.

La realización de las prácticas se hizo con base en el temario de la asignatura de Fundamentos de Control de la Facultad de Ingeniería de la UNAM usando los antiguos módulos de posición-velocidad y de presión. La función de estos módulos es acondicionar la señal de control que sale de la tarjeta de adquisición de datos conectada a la computadora para que la planta (motor o compresor) reaccione como se requiere. Así mismo, tienen la función de enviar, desde sus sensores, una señal de realimentación a la tarjeta de adquisición de datos para que la computadora la pueda leer y el control reaccione debidamente.

El trabajo se encuentra organizado en cinco capítulos y un apéndice. En el capítulo uno se da una breve descripción de este trabajo y en el capítulo dos se da toda la teoría necesaria para la realización de las prácticas del laboratorio de Fundamentos de Control en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En los capítulos tres y cuatro se da la descripción de las plantas que se usarán en las prácticas y la descripción del software (LabVIEW y Scilab) respectivamente. En el capítulo cinco se dan ejemplos resueltos de las prácticas que se proponen y finalmente, en el apéndice, se anexan las características generales de la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments usada para la realización de las prácticas de laboratorio así como las prácticas que los alumnos resolverán.

2. Fundamentos teóricos.

2.1. Diseño de sistemas de control.

2.1.1. Control de sistemas dinámicos con retroalimentación.

Para diseñar un sistema de control se requiere primordialmente conocer la planta, esto es saber que hace, cuáles son sus principales variables, especificaciones, limitaciones, capacidad, condiciones para su manejo seguro y confiable, es decir, conocer su dinámica. Se puede establecer el objetivo de control como regulación o seguimiento de trayectoria. En regulación, el objetivo es hacer que las variables a ser controladas lleguen hasta un valor deseado y permanezcan en ese valor, mientras que en el seguimiento de trayectorias, las variables controladas deben seguir un determinado comportamiento previamente establecido sin importar algún tipo de perturbación.

La respuesta del sistema a una entrada conocida se divide en dos partes; la respuesta transitoria que ocurre cuando el sistema cambia desde una condición inicial hasta la deseada y la respuesta de estado estable que se tiene después de que la respuesta a la señal de entrada logra estabilizarse. Si la respuesta del sistema a una señal de entrada se encuentra en estado estable pero no tiene el valor deseado, se dice que existe un error en estado estable.

Los sistemas de control se clasifican básicamente en sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado.

- **En los sistemas de lazo abierto** la señal de salida no tiene influencia sobre la entrada tal como puede observarse en la figura 1. El proceso se ejecuta estableciendo las condiciones iniciales necesarias para obtener un resultado determinado. Si por acción de la variación de las condiciones externas al sistema no se logra el resultado deseado, no hay posibilidad de poder corregir la respuesta del sistema durante el proceso. Utilizar este control tiene la ventaja de que es relativamente económico y fácil de implementar, sin embargo, presenta las desventajas de no rechazar perturbaciones que modificarían la respuesta final sin tener la posibilidad de corregirla durante el proceso y de que su efectividad dependa de la calibración de sus componentes. Esto implica la necesidad de componentes precisos, lo cual puede elevar su costo.



Figura 1: Sistema sin realimentación.

- **Los sistemas de lazo cerrado** son como el mostrado en la figura 2, se puede observar que la señal de salida tiene influencia sobre la entrada, es decir, si existe una desviación entre la salida real y la deseada, el controlador realiza los ajustes necesarios para aproximarlas entre sí lo más posible. Las ventajas de utilizar este control se presentan cuando existe error en la salida o bien hay perturbaciones, entonces el control los compensará. Además, existe la posibilidad de utilizar componentes imprecisos y por lo tanto más baratos. La desventaja es que es más complicado de implementar pues tiene más componentes que un control a lazo abierto y por lo tanto requiere más potencia.

La realimentación no solo reduce la diferencia entre el valor deseado y el valor real, también tiene efectos en las características del desempeño del sistema, como la ganancia, la estabilidad, la sensibilidad y el rechazo a perturbaciones. Lo anterior se puede mostrar partiendo de la figura 3.

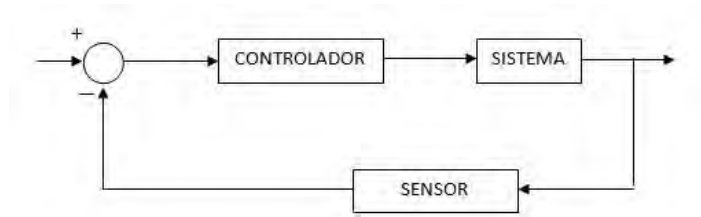


Figura 2: Sistema con realimentación.

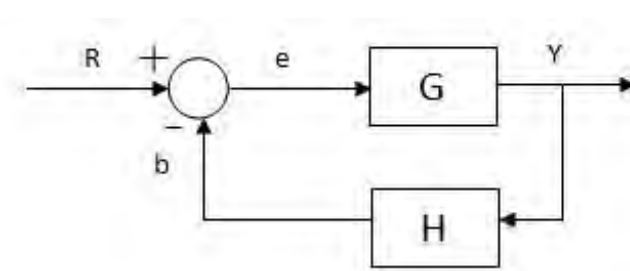


Figura 3: Sistema con realimentación negativa.

De la figura 3 se puede ver que para tener un sistema no realimentado se necesita quitar la realimentación, esto significa que la referencia es igual al error $R = e$, por lo tanto la relación salida-entrada en sistemas de lazo abierto queda dada por la siguiente expresión:

$$G = \frac{Y}{R}$$

La relación salida-entrada en sistemas de lazo cerrado con realimentación negativa queda dada por la siguiente expresión:

$$Y = eG = (R - b)G = RG - YGH$$

$$Y(1 + GH) = RG$$

$$\frac{Y}{R} = \frac{G}{(1 + GH)}$$

Sin embargo, cualquier sistema, por más sencillo que sea, es de naturaleza dinámica y consecuentemente para su representación es necesario el uso de ecuaciones diferenciales. Para caracterizar el comportamiento de los sistemas dinámicos frecuentemente se usa la transformada de Laplace. Cualquier sistema que pueda describirse por ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo puede ser analizado en el método operacional de Laplace.

La transformada de Laplace es un operador lineal perteneciente a la familia de las integrales de transformación, es especialmente útil para resolver ecuaciones diferenciales lineales ordinarias. Se puede decir que es la segunda transformación más utilizada para resolver problemas físicos, después de la transformación de Fourier.

La transformada de Laplace unilateral se define como:

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Donde:

$f(t)$: función en el tiempo

$F(s)$: transformada de Laplace de $f(t)$

s : es una variable compleja

\mathcal{L} : es el operador lineal de Laplace

2.2. Función de Transferencia.

La función de transferencia de un sistema se define como el cociente de la transformada de Laplace de la variable de salida entre la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo condiciones iniciales nulas. Tanto la entrada como la salida están representadas por polinomios, los cuales tienen raíces complejas, reales o imaginarias; a las raíces del polinomio que representa la salida se les llama polos mientras que a las raíces complejas, reales o imaginarias del polinomio que representa a la entrada se les llama ceros.

La construcción de los modelos de función de transferencia sigue las mismas etapas que la construcción de los modelos univariantes de series temporales: Identificación, Estimación, Verificación y Predicción. Sus características más importantes son:

- Sólo es aplicable a sistemas de elementos discretos modelados por ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo.
- Es una descripción de entrada-salida del comportamiento del sistema.
- Depende de las características del sistema y no de la magnitud y tipo de entrada.
- No proporciona información acerca de la estructura interna del sistema.

Los modelos de función de transferencia son muy utilizados en todos los campos científicos para evaluar respuestas dinámicas como lo muestra el siguiente ejemplo:

■ **Ejemplo 1** Sea el sistema masa, amortiguador, resorte de la figura 4.

Utilizando las leyes de Newton, se obtiene:

$$M \frac{d^2}{dt} x(t) + c \frac{d}{dt} x(t) + kx(t) = f(t)$$

Donde M es la masa, b es el coeficiente de fricción viscosa, k es la constante del resorte, $x(t)$ es el desplazamiento y $f(t)$ es la fuerza aplicada.

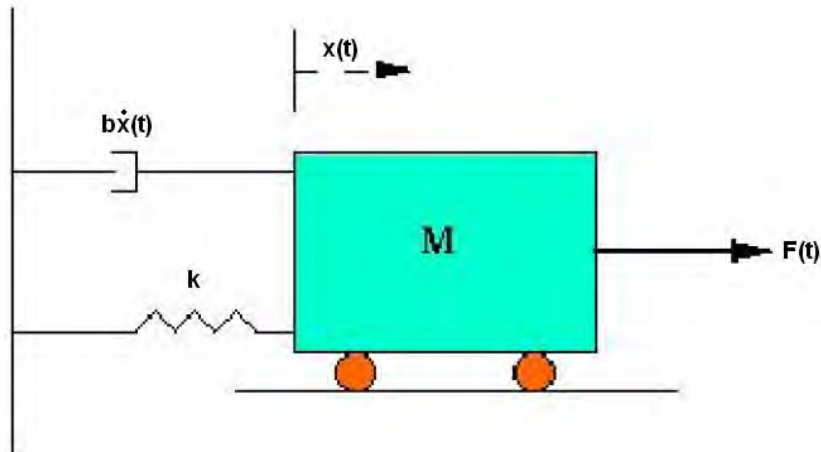


Figura 4: Sistema masa, amortiguador, resorte.

Obteniendo su transformada de Laplace.

Se consideran las condiciones iniciales como:

$$\begin{aligned}x'(0) &= 0 \\x(0) &= 0\end{aligned}$$

Al obtener la transformada de Laplace se tiene:

$$\begin{aligned}M(s^2X(s) - sx(0) - x'(0)) + b(sX(s) - x(0)) + kX(s) &= F(s) \\Ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) &= F(s)\end{aligned}$$

Finalmente la función de transferencia del sistema anterior es:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + bs + k}$$

La relación causa y efecto de la función de transferencia, permite representar las relaciones de un sistema por diagramas, a estos se les conoce como diagrama de bloques. La representación general se muestra en la figura 6.

Los diagramas de bloques de un sistema son relaciones operacionales y unidireccionales que representan la función de transferencia de las variables de interés y tienen la ventaja de representar en forma más gráfica el flujo de señales de un sistema. Con ellos es posible evaluar la contribución de cada componente al desempeño del sistema. El sistema determinado no será único.

Los elementos que contiene un diagrama de bloques son:

Flecha Representa una y solo una variable, la punta de la flecha indica la dirección del flujo de señales.

Bloque Representa la operación matemática que sufre la señal de entrada para producir la señal de salida. Las funciones de transferencia se introducen en los bloques, a estos también se les conoce como ganancia.

Para un sistema en lazo abierto el diagrama de bloques se representa como se muestra en la figura 5.

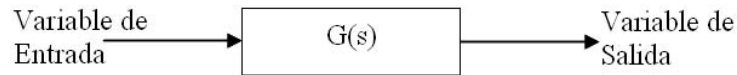


Figura 5: Representación en diagrama de bloques de un sistema sin realimentación.

Para un sistema en lazo cerrado el diagrama de bloques se representa como en la figura 6.

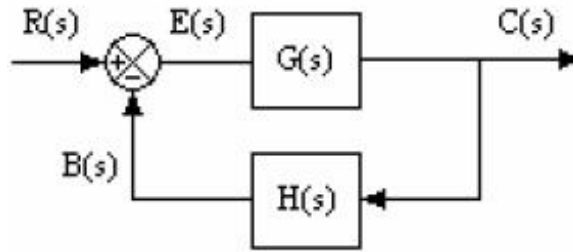


Figura 6: Representación en diagrama de bloques de un sistema realimentado.

Función de Transferencia en lazo abierto (de la figura 6 se consideran inexistentes $H(s)$ y la realimentación, $E(s) = R(s)$)

$$\frac{C(s)}{R(s)} = G(s)$$

Función de Transferencia trayectoria directa

$$\frac{C(s)}{E(s)} = G(s)$$

Función de Transferencia lazo cerrado

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Se puede utilizar LabVIEW como herramienta gráfica interactiva para diseñar y analizar sistemas de control. Estos se pueden representar como funciones de transferencia, polos y ceros y espacio de estados de los modelos. Además, con las paletas incorporadas se pueden construir sistemas de control de retroalimentación, analizar su funcionamiento y modificar parámetros. En la figura 7 se muestran las paletas incorporadas con herramientas para diseño de control e identificación del sistema. Se integran los modelos de control construyendo modelos de plantas, esto se localiza en la paleta de “diseño de control y

simulación” (*Control Design & Simulation*) que se encuentra disponible en la paleta de “Funciones en el Diagrama de Bloques”.

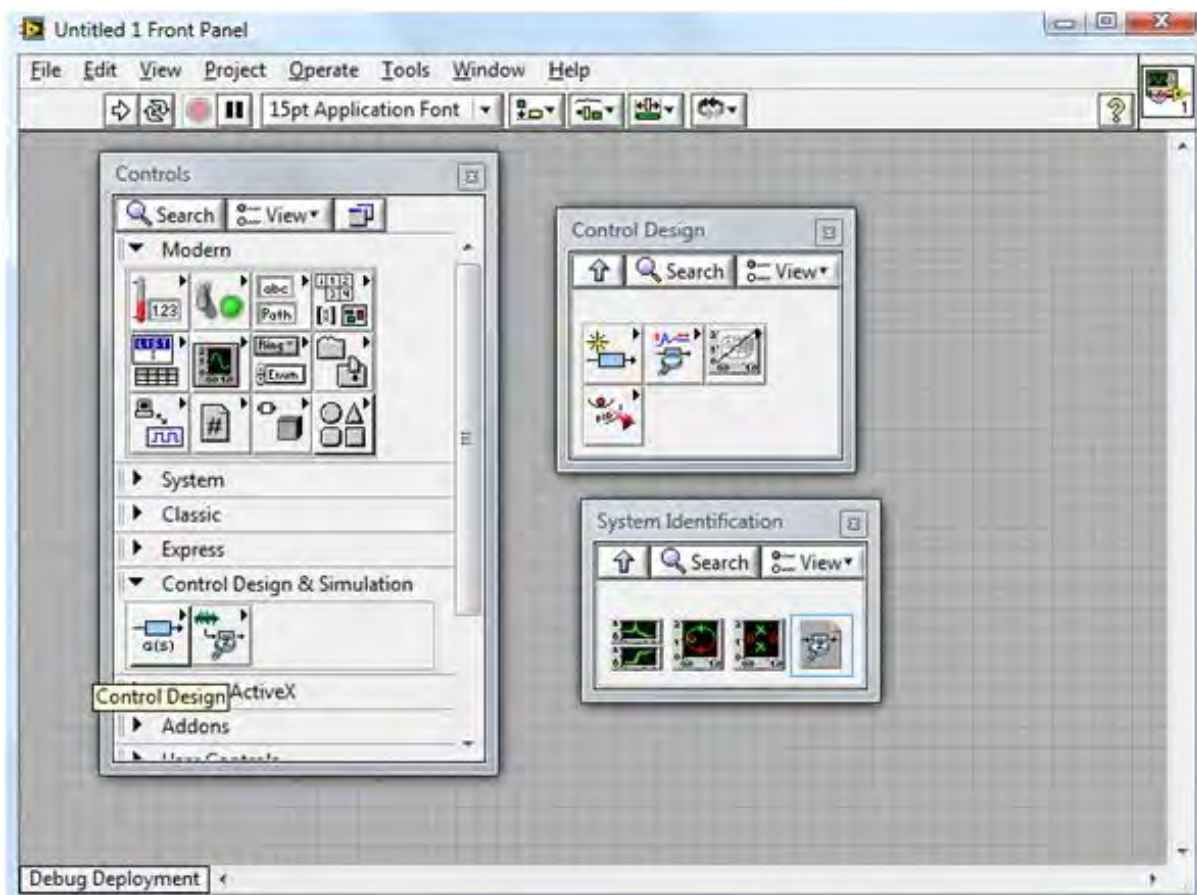


Figura 7: Diseño de control e identificación del sistema

2.3. Sistemas con más de una entrada

Para sistemas con más de una entrada como el que se muestra en la figura 8 se recurre al principio de superposición, así se puede calcular:

$$\frac{Y(s)}{r(s)} \Big|_{n(s)=0} = T_1(s)$$

$$\frac{Y(s)}{n(s)} \Big|_{r(s)=0} = T_2(s)$$

$u(s)$ Por el principio de superposición se tiene:

$$Y(s) = T_1(s)r(s) + T_2(s)n(s)$$

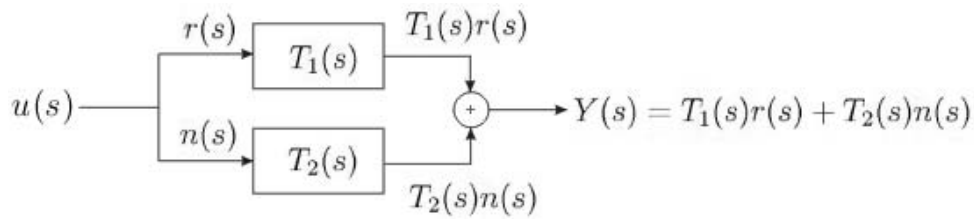


Figura 8: Sistema con más de una entrada.

2.4. Realimentación.

2.4.1. Ventajas

1. Mejor seguimiento de la referencia con incertidumbres en el modelo.
2. Rechazo a perturbaciones.

2.4.2. Desventajas

1. Aumento en complejidad.
2. Posible inestabilidad.
3. Pérdida de ganancia.

2.5. Respuesta estacionaria

2.5.1. Características de controladores P, I, D

Controlador proporcional k_p tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida, pero nunca elimina el error de estado estacionario.

Controlador integral k_i , tendrá el efecto de eliminar el error de estado estacionario pero puede que la respuesta transitoria empeore.

Control derivativo k_d , Tendrá el efecto de incrementar la estabilidad de un sistema, reduciendo el sobrepaso y mejorando la respuesta transitoria.

La respuesta estacionaria depende fundamentalmente de la señal de excitación al sistema y, si el sistema es estable, es la respuesta que perdura cuando el tiempo crece infinitamente. Funciones de prueba

1. Escalón (constante)

$$R(s) = \frac{1}{s}$$

2. Rampa

$$R(s) = \frac{1}{s^2}$$

3. Parábola

$$R(s) = \frac{1}{s^3}$$

2.5.2. Teorema del valor final

El teorema del valor final es muy útil para el análisis y el diseño de sistemas de control, ya que proporciona el valor final de una función de tiempo mediante el conocimiento del comportamiento de su transformada de Laplace en $s = 0$. El teorema del valor final no es válido si $sF(s)$ contiene algún polo cuya parte real es cero o positiva, lo que equivale al requisito de que $sF(s)$ sea analítica en el semiplano derecho.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} se(s)$$

- Escalón

$$\begin{aligned} r(s) &= \frac{1}{s} \\ e_\infty &= \lim_{s \rightarrow \infty} s \frac{1}{1 + G(s)} \frac{1}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{1 + G(s)} \\ &= \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow \infty} G(s)} \end{aligned}$$

Ahora se define la constante

$$\begin{aligned} k_p &= \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \\ e_\infty &= \frac{1}{1 + k_p} \end{aligned}$$

para que $e_\infty = 0$ entonces.

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{c \sum_{i=1}^m (s + z_i)}{\sum_{i=1}^n (s + p_i)} \\ \lim_{s \rightarrow 0} G(s) &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{c \sum_{i=1}^m (s + z_i)}{\sum_{i=1}^n (s + p_i)} \\ \lim_{s \rightarrow 0} G(s) &= \frac{c \sum_{i=1}^m (z_i)}{\sum_{i=1}^n (p_i)} \end{aligned}$$

Se requiere que al menos una raíz p_i sea nula para que el error sea cero.

$$e_\infty = 0$$

$$G(s) = c \frac{\sum_{i=1}^m (s + zi)}{\sum_{i=1}^n (s + pi)}$$

$$G(s) = \frac{1}{s} c \frac{\sum_{i=1}^m (s + zi)}{\sum_{i=1}^n (s + pi)}$$

Lazo cerrado Si se requiere garantizar en estado final con una referencia $R(s)$ y una salida $Y(s)$ es necesario un integrador en el lazo de control.

Lazo abierto Se pone un integrador para garantizar que en el lazo cerrado produzca un seguimiento deseable.

- Rampa

$$r(s) = \frac{1}{s^2}$$

$$e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} se(s)r(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} \frac{1}{s^2}$$

$$e_\infty = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1 + G(s)} \frac{1}{s} = \frac{1}{\lim_{s \rightarrow 0} sG(s)}$$

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)$$

$$\Rightarrow e_\infty = \frac{1}{k_v}$$

para que $e_\infty = 0$

$$\Rightarrow k_v = \infty$$

$$sG(s) = sc \frac{\prod_{i=1}^m (s + zi)}{\prod_{i=1}^n (s + pi)}$$

Para $k_v = \infty$ se requiere al menos dos polos o raíces pi iguales a cero para que $e_\infty = 0$.

$$G(s) = \frac{c \prod_{i=1}^m (s + zi)}{s^2 \prod_{i=1}^n (s + pi)}$$

$$G(s) = \frac{1}{s^2} \frac{c \prod_{i=1}^m (s + zi)}{\prod_{i=1}^n (s + pi)}$$

- Parábola $r(s) = \frac{1}{s^3}$

Se define otra constante k_a

$$k_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)$$

$$e_\infty = \frac{1}{k_a}$$

Para $e_\infty \Rightarrow k_a = 0$

Resumen de constantes:

Para $k_p = \infty$ Se requiere al menos un polo de lazo abierto p_i igual a cero.

Para $k_v = \infty$ Se requiere al menos dos polos de lazo abierto p_i iguales a cero.

Para $k_a = \infty$ Se requiere al menos tres polos de lazo abierto p_i iguales a cero.

2.5.3. Sistemas de segundo orden.

Estos sistemas continuos responden a una ecuación diferencial lineal de segundo orden de la forma:

$$a_0 \frac{d^2 c(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_2 c(t) = b_0 \frac{d^2 r(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_2 r(t)$$

Para el cual se tomarán las siguientes consideraciones:

$$a_0 = 1, a_1 = p, a_2 = k, b_0 = b_1 = 0$$

La función de transferencia en lazo cerrado será:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{s^2 + ps + k}$$

Se realizará el cambio de variable para k y p como se muestra:

$$k = \omega_n^2$$

$$p = 2\zeta\omega_n = 2\sigma$$

Sustituyendo en la función de transferencia tenemos lo siguiente:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde:

- ω_n : Frecuencia natural no amortiguada del sistema.
- ζ : Factor de amortiguamiento.
- σ : Atenuación.

A lo cual podemos decir que el sistema de segundo orden se describe en términos de los parámetros ζ y ω_n .

La naturaleza de sus raíces depende del factor de amortiguamiento, lo que determina el tipo de respuesta que se obtiene para el comportamiento del sistema, de la siguiente manera:

- Si $\zeta = 0$, las raíces son cantidades imaginarias de igual magnitud pero de signo contrario y la respuesta del sistema a una entrada conocida es oscilatoria o bien no amortiguada. La gráfica de la respuesta transitoria se muestra en la figura 9.

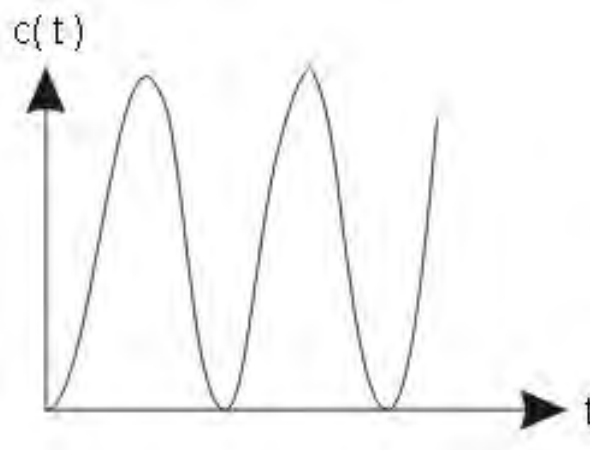


Figura 9: Respuesta no amortiguada del sistema a una entrada escalón.

- Si $0 < \zeta < 1$, las raíces son complejas conjugadas con parte real negativa y la respuesta del sistema a una entrada conocida es subamortiguada, ya que tiene oscilaciones en su respuesta transitoria. La gráfica de la respuesta transitoria se muestra en la figura 10.

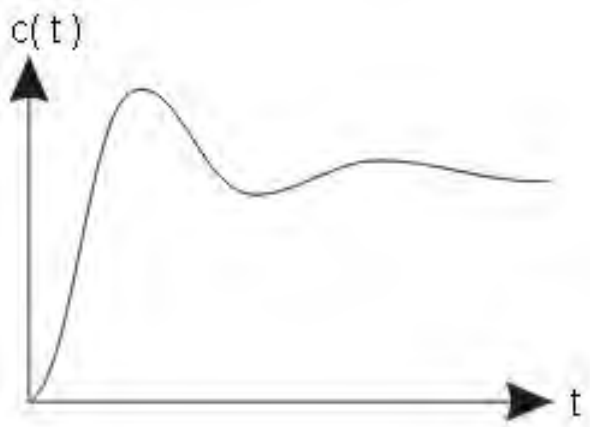


Figura 10: Respuesta subamortiguada del sistema a una entrada escalón.

- Si $\zeta = 1$, las raíces son reales iguales y negativas por lo que la respuesta del sistema a una entrada conocida es críticamente amortiguada. La gráfica de la respuesta transitoria se muestra en la figura 11.

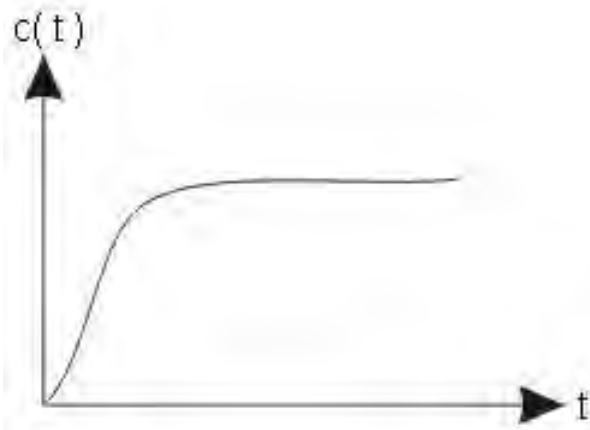


Figura 11: Respuesta críticamente amortiguada del sistema a una entrada escalón.

- Si $\zeta > 1$, las raíces son reales diferentes y negativas por lo que la respuesta del sistema a una entrada conocida es sobreamortiguada. La gráfica de la respuesta transitoria se muestra en la figura 12.

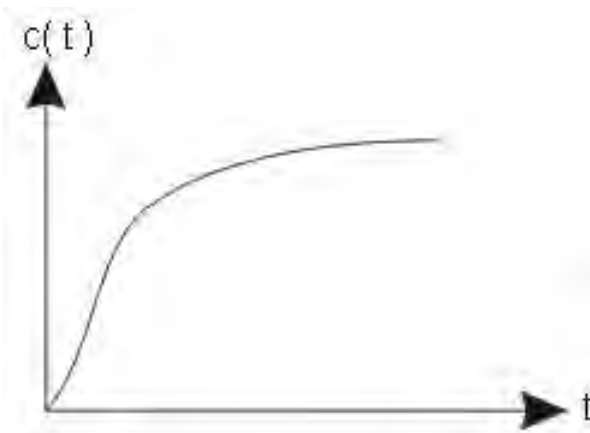


Figura 12: Respuesta sobre amortiguada del sistema a una entrada escalón.

Se estudia la respuesta de un sistema de segundo orden ante una entrada escalón unitario ya que este tipo de entrada es lo bastante drástica como para probar la bondad del sistema en régimen transitorio, además si se conoce la respuesta ante este tipo de entrada se puede calcular en forma analítica la respuesta ante cualquier tipo de entrada.

Al especificar las características de la respuesta transitoria de un sistema de control es común definir lo siguiente:

1. Tiempo de retardo t_d : Es el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar la mitad del valor final por primera vez.

2. Tiempo de levantamiento t_r : Es el tiempo requerido para que la respuesta aumente del 10% al 90%, del 5% al 95%, o del 0% al 100% de su valor final. Para sistemas de segundo orden subamortiguados se utiliza normalmente el tiempo de levantamiento de 0% a 100%. Para sistemas sobreamortiguados se acostumbra usar el tiempo de levantamiento del 10% a 90%.

El tiempo de levantamiento se obtiene dando el valor de uno en la ecuación de respuesta de un sistema de segundo orden ante una entrada escalón.

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t_r} \left(\cos\omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}\omega_d t_r \right) = 1$$

$$\cos\omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \operatorname{sen}\omega_d t_r = 0$$

o bien:

$$\cos\omega_d t_r + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\omega_d t_r \tan\omega_d t_r = \cos\omega_d t_r \left[1 + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \tan\omega_d t_r \right] = 0$$

$$\tan\omega_d t_r = -\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} = \frac{\omega_d}{\sigma}$$

El tiempo de levantamiento es:

$$t_r = \frac{1}{\omega_n} \tan^{-1} \left(\frac{\omega_d}{-\sigma} \right) = \frac{\pi - \beta}{\omega_d}; \beta = \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma}$$

3. Tiempo de pico t_p : Es el requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobrepaso. El tiempo pico se obtiene derivando la ecuación de respuesta $c(t)$ e igualándola a cero, con lo que se obtiene

$$(\operatorname{sen}\omega_d t_p) \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t_p} = 0$$

$$\operatorname{sen}\omega_d t_p = 0$$

los valores que satisfacen esta ecuación son:

$$0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots,$$

donde se elige el primer sobrepaso, entonces queda:

$$\omega_d t_p = \pi \quad \Rightarrow \quad t_p = \frac{\pi}{\omega_d}$$

4. Sobrepaso máximo (porcentual) M_p : El sobrepaso máximo es el valor pico máximo de la curva de respuesta. Generalmente se usa medido respecto al valor final. Si el valor final estabilizado de la respuesta difiere de la unidad, se suele utilizar el sobrepaso porcentual máximo. El sobrepaso máximo se obtiene de la respuesta evaluada en el tiempo pico.

$$M_p = c(t_p) - 1$$

$$M_p = -e^{-\zeta\omega_n(\pi/\omega_d)} \left(\cos\omega_d \frac{\pi}{\omega_d} + \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \text{sen}\omega_d \frac{\pi}{\omega_d} \right)$$

$$M_p = e^{-\zeta(\omega_n/\omega_d)\pi} = e^{-(\sigma/\omega_d)\pi}$$

$$M_p = e^{-(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})\pi} * 100$$

La magnitud del sobrepaso (porcentual) máximo indica la estabilidad relativa del sistema.

5. Tiempo de asentamiento t_s : Es el que la curva de respuesta requiere para alcanzar y mantenerse en un rango alrededor del valor final con una magnitud especificada por el porcentaje absoluto del valor final habitualmente es de 2% o 5%, el rango más común es del 2%. El tiempo de asentamiento está relacionado con la constante de tiempo mayor del sistema de control. El criterio para fijar el porcentaje de error a utilizar depende de los objetivos de diseño del sistema en cuestión.

$$t_s = 4T = \frac{4}{\zeta\omega_n} = \frac{4}{\sigma}$$

La figura 13 explica de manera gráfica los tiempos antes mencionados usando la respuesta de un sistema de segundo orden a una entrada escalón unitario.

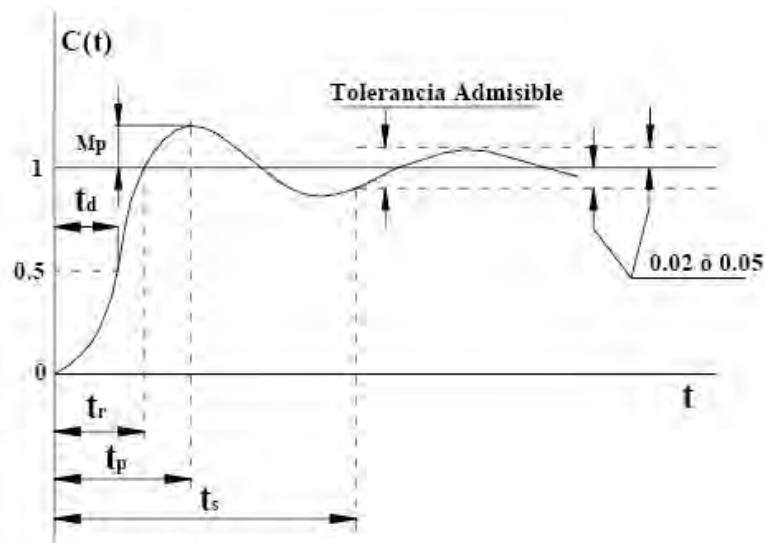


Figura 13: Curva de respuesta al escalón unitario

■ **Ejemplo 2** Dada la siguiente función de transferencia, definir los parámetros de respuesta transitoria del sistema.

Desarrollo: La función de transferencia de lazo cerrado es

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{75}{s^2 + 34s + 75}$$

Realizando la siguiente igualdad

$$\frac{75}{s^2 + 34s + 75} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned}\omega_n^2 &= 375 \rightarrow \omega_n = \sqrt{375} \\ 2\zeta\omega_n &= 34 \rightarrow \zeta = \frac{34}{2\sqrt{375}} = 0,877876 \\ \sigma &= 17 \\ \omega_d &= \sqrt{86}\end{aligned}$$

A partir de aquí se obtendrán los parámetros de respuesta transitoria

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\omega_d}{\sigma} = 0,499 \text{ rad.}$$

1. *Tiempo de levantamiento*

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} = 0,2849 \text{ segundos}$$

2. *Tiempo de pico*

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = 0,33876 \text{ segundos}$$

3. *Sobrepaso máximo*

$$M_p = e^{-(\sigma/\omega_d)\pi} = 0,00315 = 0,315 \%$$

4. *Tiempo de asentamiento*

$$t_s = \frac{4}{\sigma} = 0,23529 \text{ segundos}$$

2.6. Estabilidad de Sistemas de Control

2.6.1. Concepto BIBO de estabilidad

Entre las muchas formas de especificaciones de desempeño utilizadas en el diseño, el requerimiento más importante es que el sistema sea estable, por lo que desde el punto de vista de control, esta es la característica más importante de los sistemas dinámicos. La estabilidad es una propiedad cualitativa de los sistemas dinámicos a la que cabe considerar como la más importante de todas. Ello es debido a que, en la práctica, todo sistema debe ser estable ya que si el sistema no lo es, normalmente carece de todo interés y utilidad. Existen criterios que permiten discernir si un determinado sistema dinámico dado en una cierta forma de representación matemática, es o no estable.

La estabilidad se puede clasificar de la siguiente manera:

- **Estabilidad absoluta.** Se refiere directamente a la estabilidad o inestabilidad del sistema.
- **Estabilidad relativa.** Indica que tan estable es el sistema en relación a otro o en relación a algún cambio dentro del mismo.

Un sistema lineal, inicialmente en reposo, se dice estable si ante cualquier señal de entrada acotada (no alcanza valores infinitos) responde con una señal de salida acotada. Formalmente se dice de una señal $x(t)$ definida en cierto intervalo (t_0, t_1) que está acotada en dicho intervalo, si para todo $t \in (t_0, t_1)$ existe un valor $k < \infty$ tal que $|x(t)| < k$. Lo anterior significa que un sistema es estable si la señal de entrada acotada le corresponde una señal de salida acotada. Explicado de manera diferente, en el caso de sistemas lineales, el sistema es BIBO estable si lo es en el sentido de Lyapunov, esto es si cuando para todo $\epsilon > 0$ existe $\delta > 0$ tal que, si la condición inicial $|x(0) < \delta|$, entonces $|x(t)| < \epsilon \forall t \geq 0$.

Entonces se dice que la estabilidad en un sistema lineal, causal e invariante en el tiempo es BIBO (Bounded Input-Bounded Output), es decir que es estable si y sólo si a toda función de entrada acotada le corresponde una función de salida acotada. Donde la condición de estabilidad se analiza sobre puntos de equilibrio, ya que un sistema de control se encuentra en un punto de equilibrio si la salida permanece en el mismo estado en ausencia de cualquier perturbación o entrada. Estos sistemas tendrán puntos de equilibrio estables e inestables, la estabilidad es una característica propia de cada sistema y no depende de las entradas.

2.6.2. Diagrama de polos y ceros.

La estabilidad de un sistema se puede determinar por la ubicación de los polos de lazo cerrado en el plano complejo “s”. Si alguno de los polos de lazo cerrado de un sistema se encuentra en el semiplano derecho el sistema es inestable donde los ceros se destacan con un símbolo “o” y los polos con un símbolo “x”.

Para obtener los polos y ceros de nuestro sistema solo bastará con calcular las raíces del numerador y denominador ya que el numerador nos mostrará los ceros mientras el denominador nos mostrará los polos del sistema, cuando se obtengan las raíces se colocarán en el plano complejo.

Entonces decimos que un sistema realimentado lineal invariante en el tiempo es estable si todos los polos de lazo cerrado tienen parte real negativa. Por lo que si la ecuación característica del sistema tiene al menos un polo con parte real positiva, dicho sistema se designará inestable. El sistema será marginalmente estable si tiene polos simples con parte real nula, es decir que estén sobre el eje imaginario. Si los polos con parte real nula son múltiplos, el sistema también será inestable. En la figura 14 podemos observar un ejemplo de diagrama de polos y ceros en LabVIEW. La figura 15 muestra el diagrama de bloques del diagrama de polos y ceros mostrado en la figura 14.

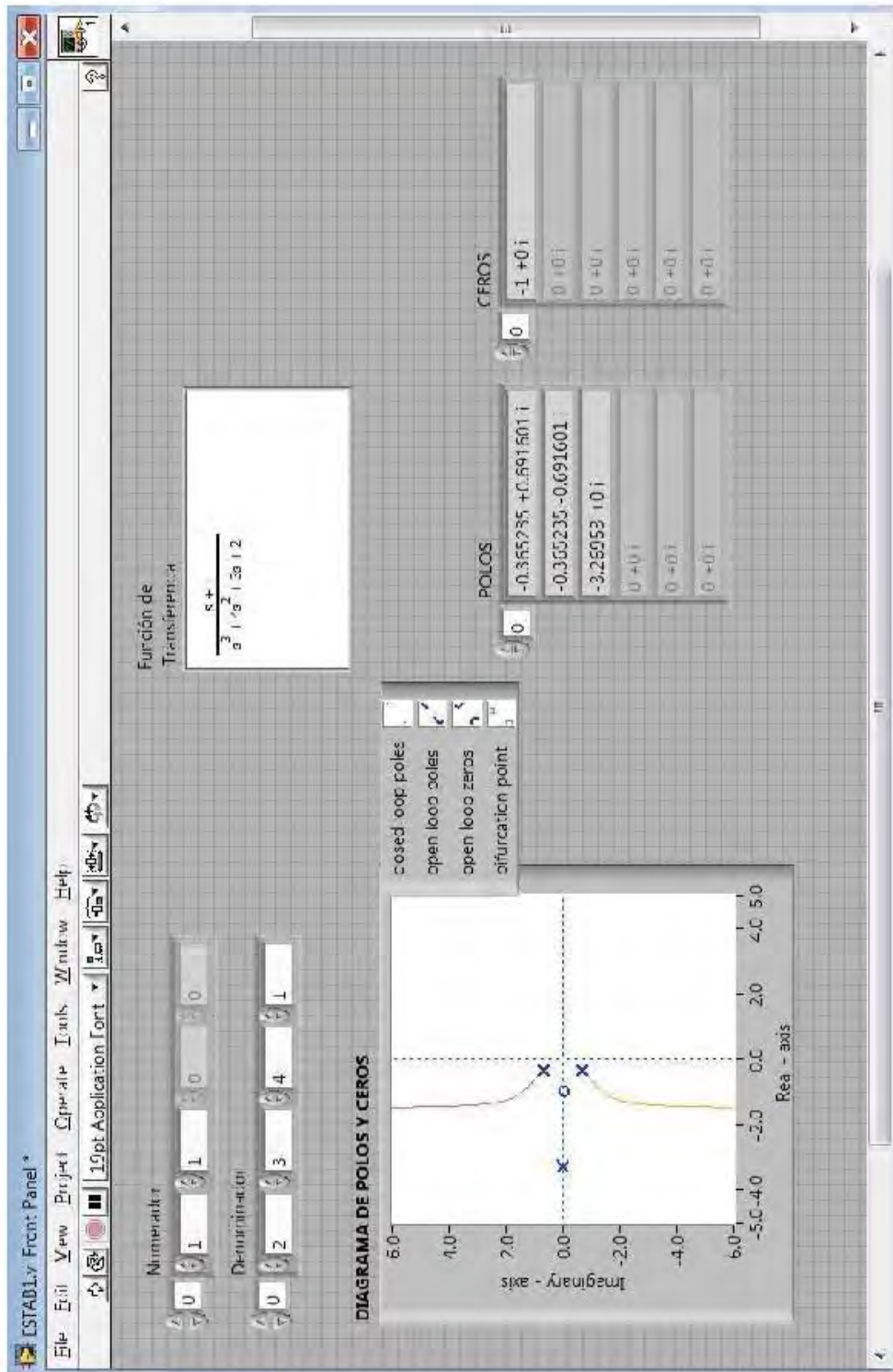


Figura 14: Diagrama de polos y ceros. Panel frontal.

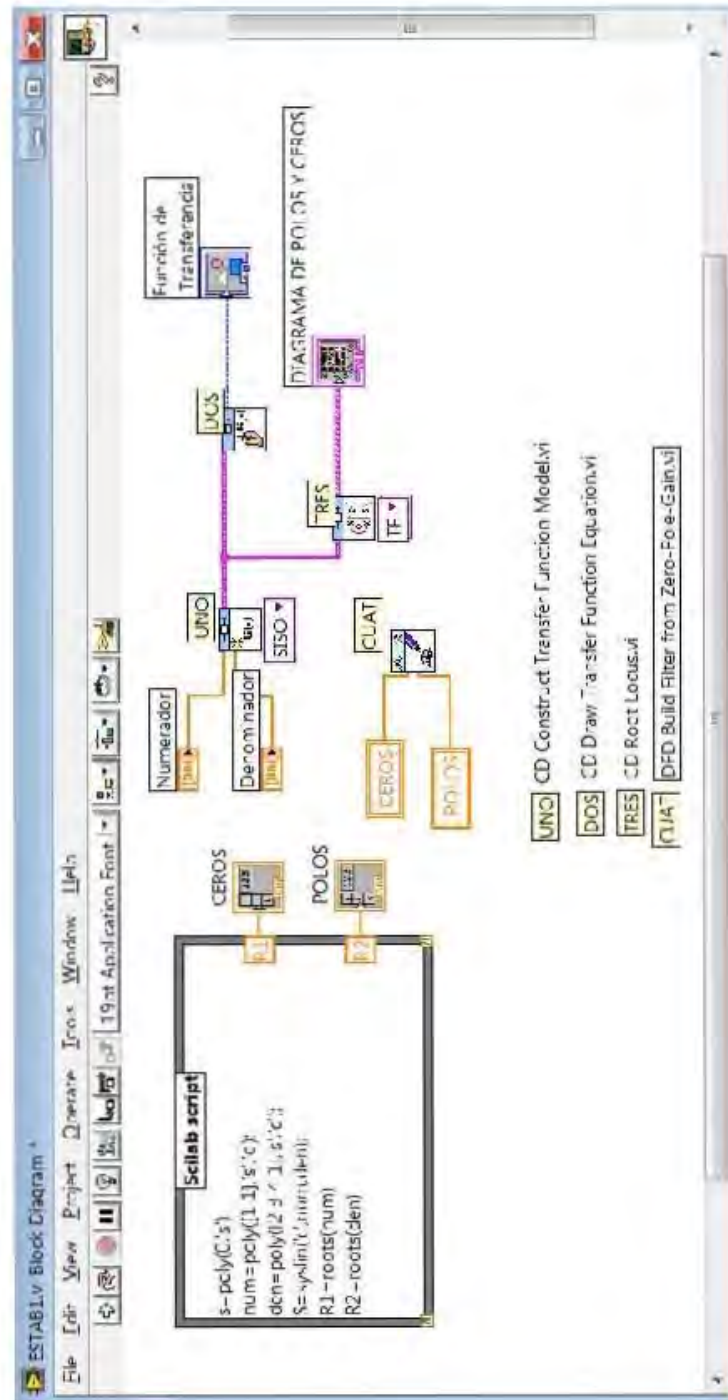


Figura 15: Diagrama de polos y ceros. Diagrama de bloques.

2.7. Criterio de Estabilidad de Nyquist

2.7.1. Respuesta en Frecuencia.

A la respuesta lineal de un sistema ante una entrada sinusoidal se le conoce como respuesta en frecuencia.

■ **Ejemplo 3** Sea la siguiente entrada sinusoidal y su correspondiente transformada de Laplace:

$$x(t) = X * \text{sen}(\omega * t) \rightarrow \frac{\omega * X}{s^2 + \omega^2} = X(s)$$

ω = frecuencia de la señal de excitación.

La salida tendrá la forma siguiente:

$$y(t) = Y * \text{sen}(\omega * t + \varphi)$$

φ = ángulo de fase

La transformada de Laplace de la salida del sistema es:

$$Y(s) = G(s)X(s)$$

Como tenemos un análisis sinusoidal, se cambia la variable compleja s por $(j\omega)$.

$$Y(j\omega) = G(j\omega)X(j\omega)$$

Analizando, vemos que cada componente es un número complejo y como tal posee módulo y argumento de la forma:

$$Y(j\omega) = |Y(j\omega)| \angle Y(j\omega)$$

La relación de la salida $Y(j\omega)$ entre la entrada $X(j\omega)$ en el régimen sinusoidal se llama respuesta en frecuencia.

$$G(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)}$$

La respuesta en frecuencia nos brinda información indirecta acerca de la respuesta transitoria, se puede utilizar en funciones con alto grado de incertidumbre y también en sistemas con retardo que no tienen funciones racionales. Las pruebas de respuesta en frecuencia son fáciles de realizar, se pueden determinar fácilmente funciones de transferencia complejas, etc. Por lo tanto, conociendo la transferencia sinusoidal del sistema, se puede saber como será la amplitud de la salida y el ángulo de desfase.

Los métodos de respuesta en frecuencia en los sistemas de control proveen un conjunto de análisis y herramientas gráficas que no están limitadas por el orden del sistema o por otras complejidades.

2.7.2. Gráficas Polares o Diagrama de Nyquist.

En análisis dinámico de sistemas en el dominio de la frecuencia, se utilizan las representaciones de las funciones de transferencia sinusoidales en coordenadas polares que sirven de base para otros criterios de estabilidad como son el de Nyquist y el de Nichols.

El procedimiento para trazar un diagrama polar es el siguiente:

- Escribir la función en términos de $j\omega$.
- Descomponer la función en sus partes real e imaginaria.

$$G(j\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] + \text{Im}[G(j\omega)]$$

- Escribir la función en su forma fasorial.

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| \angle G(j\omega)$$

- Determinar magnitud y fase cuando $\omega \rightarrow 0$.
- Determinar magnitud y fase cuando $\omega \rightarrow \infty$.

Una ventaja de utilizar un diagrama polar es que representa, en una sola gráfica, las características de la respuesta, en el dominio de la frecuencia, de un sistema en el rango de frecuencia completo. Una desventaja es que el diagrama no indica en forma clara la contribución de todos los factores individuales de la función de transferencia en lazo abierto.

■ **Ejemplo 4** Obtener la gráfica polar de la siguiente función.

$$G(s) = \frac{1}{2s + 5}$$

Solución: se tiene que separar la función en sus partes real e imaginaria.

$$G(j\omega) = \frac{1}{2j\omega + 5} = \frac{1}{5 + 2j\omega}$$

$$G(j\omega) = \frac{1}{5 + 2j\omega} \cdot \frac{5 - 2j\omega}{5 - 2j\omega} = \frac{5 - j2\omega}{25 + 4\omega^2}$$

$$G(j\omega) = \text{Re}[G(j\omega)] + \text{Im}[G(j\omega)] = \frac{5}{25 + 4\omega^2} - j \frac{2\omega}{25 + 4\omega^2}$$

Para trazar el resultado en la gráfica polar, se valúa en $G(j\omega)$ en diferentes frecuencias desde $\omega = 0$ hasta $\omega \rightarrow \infty$.

- $\omega = 0$ tenemos:

$$G(j0) = \text{Re}[G(j0)] + \text{Im}[G(j0)] = \frac{5}{25 + 4(0)^2} - j \frac{2(0)}{25 + 4(0)^2} = \frac{1}{5}$$

- $\omega \rightarrow \infty$ tenemos:

$$G(j\infty) = \text{Re}[G(j\infty)] + \text{Im}[G(j\infty)] = \frac{5}{25 + 4(\infty)^2} - j \frac{2(\infty)}{25 + 4(\infty)^2} = 0 - j0$$

- $\omega = 2$ tenemos:

$$G(j2) = \text{Re}[G(j2)] + \text{Im}[G(j2)] = \frac{5}{25 + 2(2)^2} - j \frac{2(5)}{25 + 2(2)^2} = \frac{5}{33} - j \frac{10}{33}$$

En la figura 16 se muestra una gráfica de la respuesta en frecuencia de la función de transferencia obtenida en Scilab.

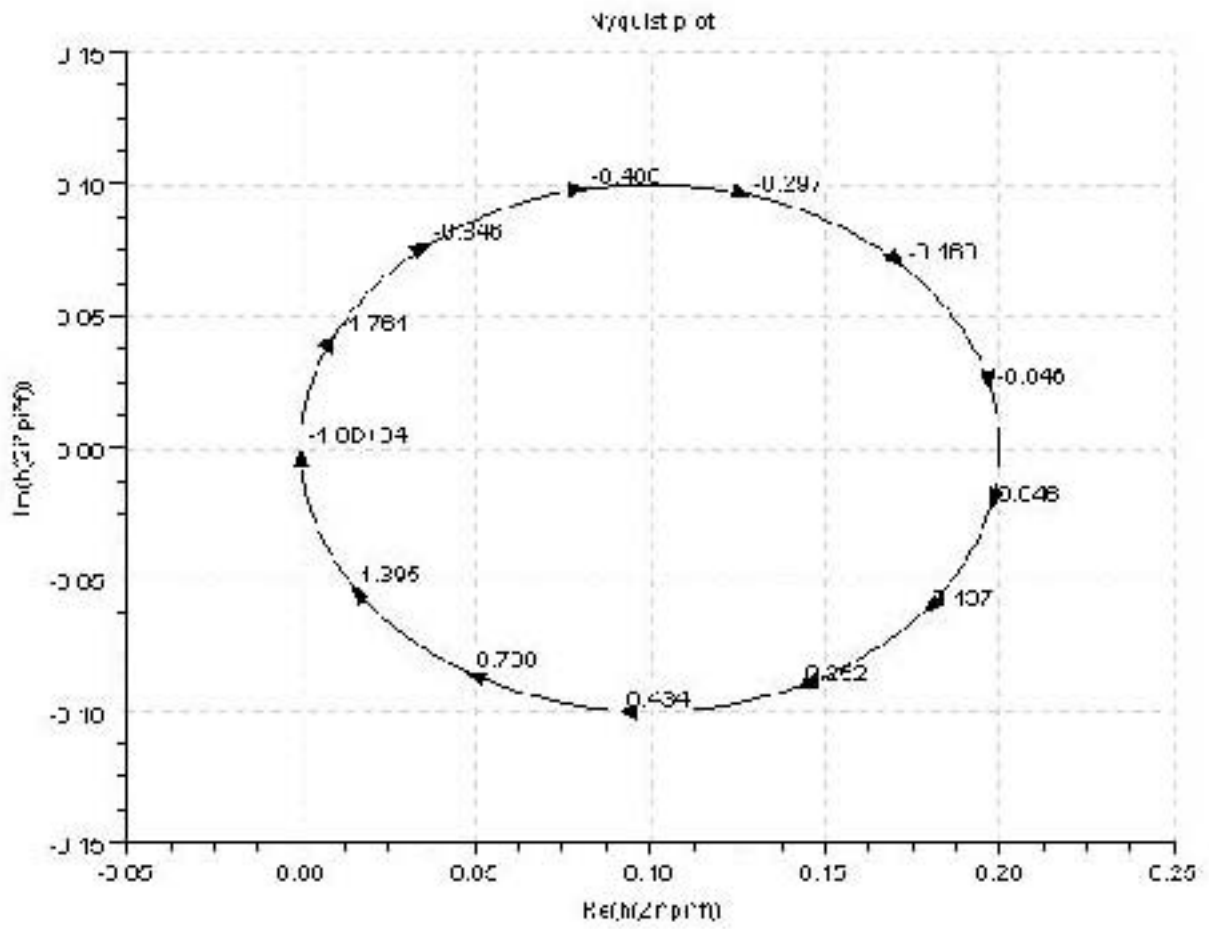


Figura 16: Gráfica de la respuesta en frecuencia de la función de transferencia dada hecha con Scilab.

3. Descripción de sistemas físicos

3.1. Módulo de posición-velocidad

3.1.1. Módulo *G36A/EV*

Se utilizará para estudiar de modo teórico y experimental los transductores de velocidad, posición angular y las técnicas de control automático de dichas magnitudes. Está compuesto de un panel con el esquema electrónico que consta de diez bloques en el que se integran circuitos eléctricos, además tiene una sección para las conexiones entre el módulo y el motor de la unidad externa *TY36A/EV*. En la figura 17 se muestra el módulo *G36A/EV*.

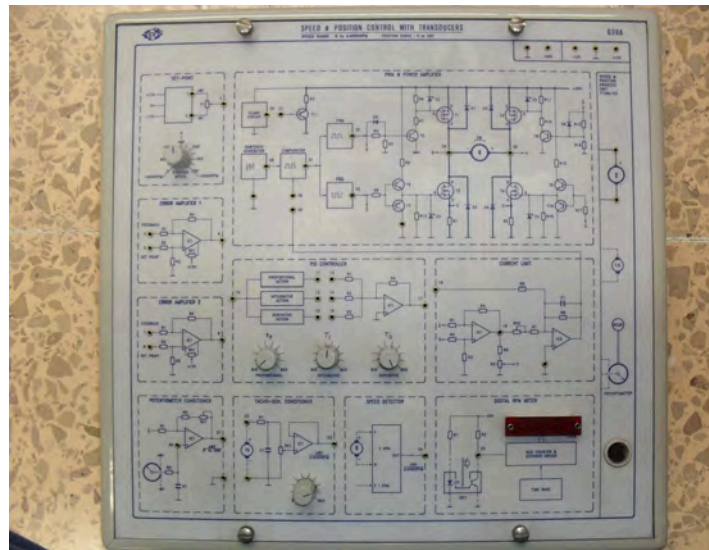


Figura 17: Módulo *G36A/EV* de Posición-Velocidad.

Los principales circuitos del módulo son:

- Set-point.
- Amplificadores de error.
- Acondicionadores de señal para transductor.
- Controlador PID con acciones independientes.

La predisposición del set-point (velocidad o posición) se realiza a través de un potenciómetro rotativo y una referencia de tensión interna. Los tres potenciómetros rotativos permiten la predisposición, de forma independiente, de los valores de los parámetros P, I y D para la calibración del controlador PID.

En la parte superior derecha se hallan ubicados los bornes de conexión con las diferentes fuentes de alimentación. De estas fuentes serán necesarias las tensiones de $\pm 12V$ que debe suministrar una corriente de la menos $0,5A$ para la parte del control y una tensión de $+30V$ con una corriente mínima de $1,5A$ para la de potencia.

La conexión entre el módulo y la unidad exterior *TY36A/EV* se realiza por medio de dos terminales y un conector DIN con 8 polos. El motor se gobierna mediante los dos terminales, mientras que el conector DIN permite enviar al módulo las señales procedentes de los transductores de velocidad y posición.

3.1.2. Unidad Exterior de velocidad y posición *TY36A/EV*.

La unidad exterior está constituida por:

- Motor de corriente directa de imán permanente.
- Transductor de posición potenciométrico.
- Transductores de velocidad tacométrico y optoelectrónico.
- Dispositivos para la variación de la carga.

Esta unidad, mostrada en la figura 18, permite la generación de las magnitudes físicas de velocidad y posición a través de la rotación del motor de corriente directa de imán permanente. Las señales de los transductores llegan al módulo *G36A/EV* por medio del cable DIN con 8 polos, donde son debidamente procesadas por los circuitos de acondicionamiento y filtrado; en cambio, el control del motor se lleva a cabo a través de los dos terminales presentes en la unidad misma. La indicación de la posición instantánea del rotor puede leerse con precisión entre 0° y 360° utilizando un indicador goniométrico (círculo graduado). Por razones de seguridad, todas las partes en rotación del motor están protegidas por un contenedor de metal y plexiglás.

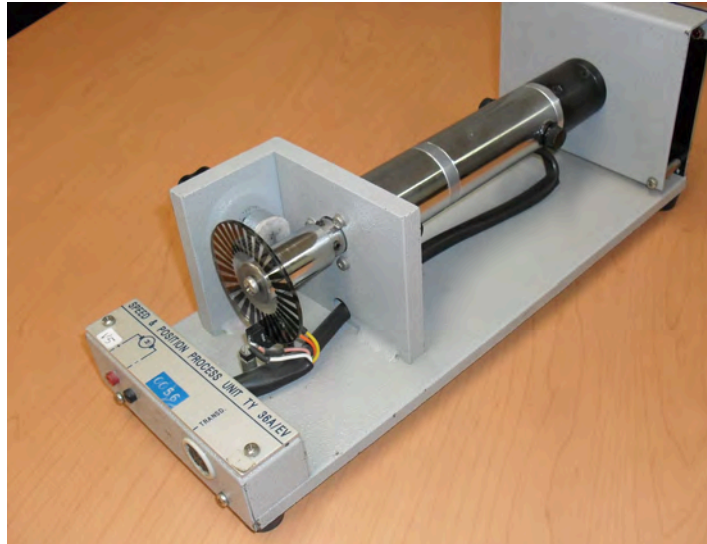


Figura 18: Unidad exterior de velocidad y posición *TY36A/EV*..

3.2. Módulo de presión.

3.2.1. Módulo *G35/EV*

Está constituido de cinco circuitos, cada uno de ellos delimitado por una línea segmentada que encierra el diagrama eléctrico del circuito mismo, del cual resultan aseguibles las entradas y las salidas para medidas con osciloscopio o multímetro, la alimentación para este módulo será de $\pm 12V$ que debe suministrar una corriente de la menos $0,5A$ para la parte del control y una tensión de $+30V$ con una corriente mínima de $1A$ para la de potencia. La figura 19 muestra el módulo de presión *G35/EV*.

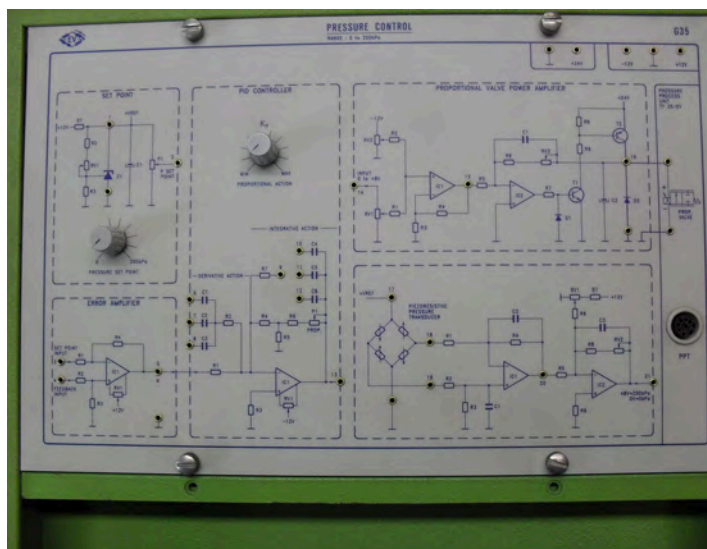


Figura 19: Módulo de Presión *G35/EV*.

Los circuitos presentes son:

- Set-point.
- Amplificadores de error.
- Acondicionadores de señal del transductor.
- Controlador PID.
- Amplificador de potencia para válvula proporcional.

Los dos potenciómetros rotativos permiten la predisposición de la referencia de presión y la variación de la ganancia proporcional del controlador PID. La conexión entre el módulo y la unidad exterior *TY35/EV* se realiza por medio de dos terminales y un conector DIN con 8 polos. La bomba del aire de la unidad exterior se alimenta desde los dos terminales y el conector DIN permite enviar al módulo la señal procedente del transductor.

3.2.2. Unidad Exterior de generación de la magnitud física *TY35/EV*

El proceso de presión está constituido por la unidad *TY35/EV*, que contiene:

- Compresor con depósito de aire.
- Válvula proporcional.
- Transductor piezorresistivo.

- Manómetro.
- Dispositivo para la variación de la carga.

Esta unidad, mostrada en la figura 20, constituye la fuente de presión para el trazado de la curva característica del sensor y el análisis del acondicionador de señal. El transductor industrial de presión es de tipo piezorresistivo y como elemento básico incorpora la celda extensométrica. La señal del transductor, vía cable DIN de 8 polos, llega al módulo *G35/EV* donde es acondicionada y filtrada. La unidad *TY35/EV* incorpora también dos terminales para el mando de la electroválvula proporcional. La sólida estructura de la unidad exterior *TY35/EV* es de tipo metálico e incluye, además de los referidos componentes, el filtro para el aire del compresor.



Figura 20: Unidad exterior *TY35/EV*.

4. Herramientas de programación.

4.1. Preliminares.

En la presente sección se da una introducción al software que será utilizado para la realización de las prácticas de control ya citadas anteriormente. Se describe que es y que hace cada software, se indica también la manera de instalar y configurar correctamente los programas Scilab y LabVIEW. En el caso de LabVIEW se describe donde se encuentran las herramientas de trabajo y que se se puede encontrar en cada una de ellas, así como los espacios de trabajo con los que cuenta. En el caso de Scilab se exponen los comandos necesarios para trabajar con álgebra lineal, gráficos e ingeniería de control, así como la manera de incorporarlo a LabVIEW.

4.2. Scilab.

Scilab es un software libre para cálculo científico y numérico que trabaja principalmente con el uso de matrices aunque también se pueden hacer cálculos simbólicos. Está disponible en versiones para 32 y 64 bits y para varios sistemas operativos tales como Unix, Linux (Mandriva, Ubuntu), Windows(2000/XP/VISTA), Solaris, Alpha, MacOSX 10.5 entre otros.

Se puede integrar programas desarrollados en lenguajes de alto nivel como FORTRAN, Java, C y C++ mediante instrucciones propias de Scilab, y mediante una interfaz hecha por National Instruments puede trabajar en conjunto con LabVIEW.

Tiene herramientas para álgebra lineal, polinomios, ingeniería de control, gráficos 2D y 3D, además de tener un simulador por diagrama de bloques “Scicos”.

Fue desarrollado por INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) y la ENPC (École Nationale des Ponts et Chaussées) desde 1990, aunque desde mayo del 2003, es mantenido y desarrollado por Scilab Consortium.

Los requerimientos mínimos para poder usar la version 5.1 (que es la que usaremos en este trabajo) son 247.5MB de espacio en disco duro y alguno de los sistemas operativos antes mencionados.

Existen herramientas llamadas “toolboxes” que son programas hechos por los usuarios como Rtool que es una herramienta para control en el que se pueden analizar las respuestas en el tiempo y en frecuencia de alguna planta con o sin controlador.

4.2.1. Instalación.

Para instalar Scilab en la plataforma windows hay que descargar la última versión del programa de la dirección

<http://www.scilab.org/>

ejecutarlo y seguir las instrucciones que proporciona el programa de instalación.

4.2.2. Conectando LabVIEW con Scilab.

Como se mencionó anteriormente, Scilab puede trabajar en conjunto con LabVIEW a través de un nodo de Scilab en LabVIEW, mediante el cual se puede incluir código matemático en instrumentos virtuales creados con LabVIEW como se muestra en la figura 21. Scilab LabVIEW Gateway es un archivo que crea este nodo y se encuentra en la página de National Instruments en la dirección:

<http://zone.ni.com/devzone/cda/epd/p/id/657>.

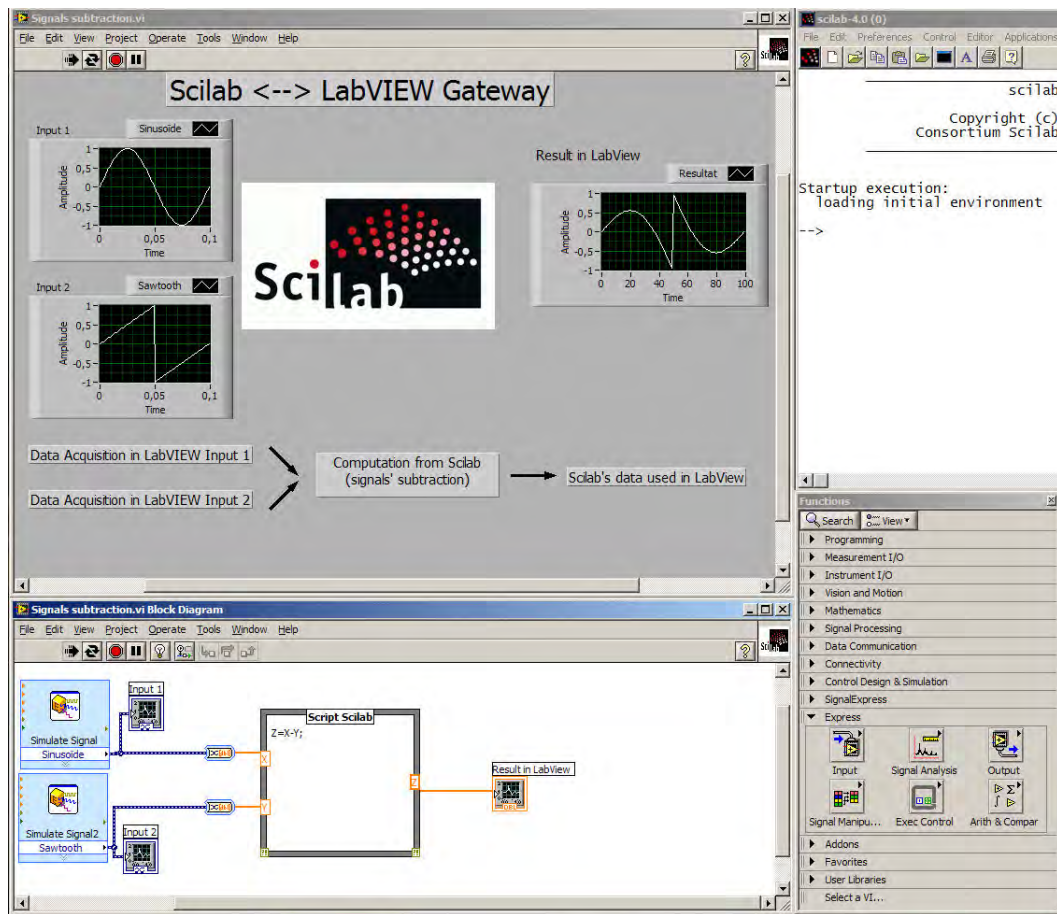


Figura 21: Scilab puede ser usado en instrumentos virtuales mediante LabVIEW Gateway

Los requerimientos de sistema para poder usar este archivo son los siguientes:

- Microsoft Windows Vista/XP/2000
- National Instruments LabVIEW (8.0, 8.2.x, or 8.5) completo, profesional, estudiantil, o ediciones de evaluación.
- INRIA Scilab (4.1.1 o posterior).

Para lograr el vínculo entre LabVIEW y Scilab se debe descargar de la dirección antes mencionada el archivo

"labview_scilab_script_node"

de extensión zip. Una vez descargado debe hacerse lo siguiente:

- Ir a la carpeta de LabVIEW.

- Descomprimir.

"labview_scilab_script_node"

en la carpeta raíz:

C:\Archivos de programa\National Instruments\LabVIEW 8.5

- Si se dispone de la versión 8.5 de LabVIEW, que es nuestro caso, se debe cambiar

C:\Archivos de programa\National Instruments\LabVIEW 8.5
 \menus\categories\Mathematics_scriptsAndFormulas
 _More Script Nodes

por

C:\Archivos de programa\National Instruments\LabVIEW 8.5
 \menus\categories\Mathematics_scriptsAndFormulas
 _More Script Nodes

- reiniciar LabVIEW.

Una vez hecho esto, podemos comprobar que Scilab ahora forma parte de los script Nodes de LabVIEW como se muestra en la figura 22, siguiendo la dirección:

Functions/Mathematics/Scripts & Formulas/Script Nodes/

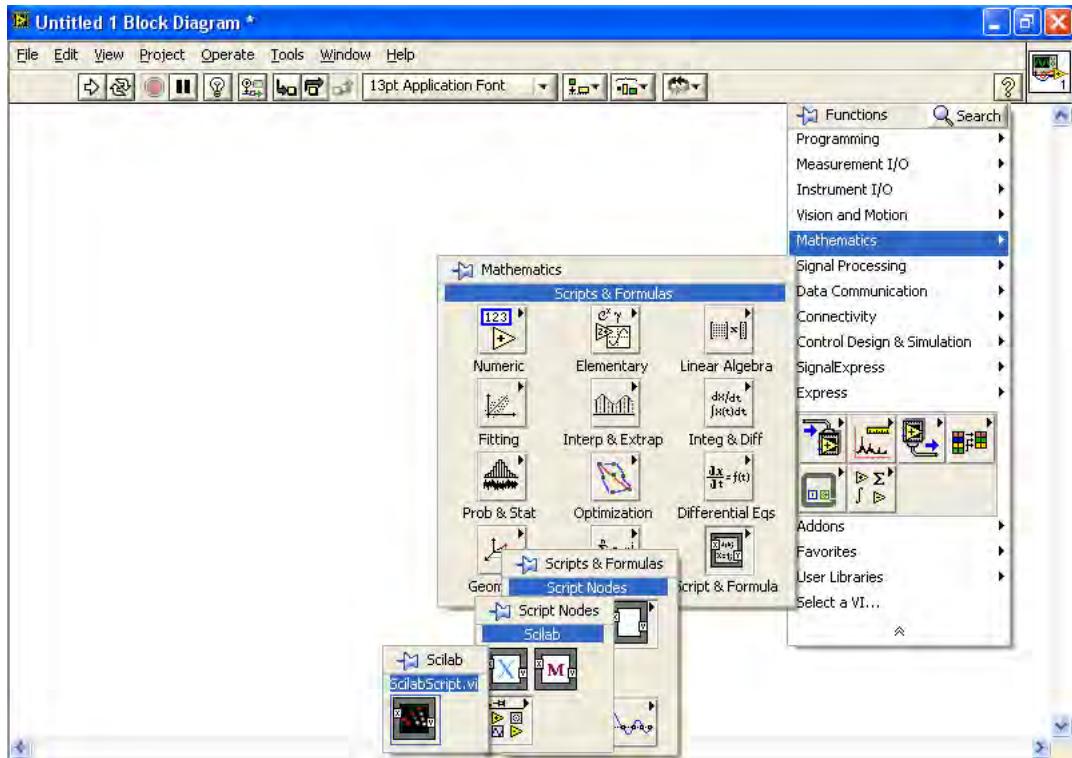


Figura 22: Ubicación del script node de Scilab.

Podemos arrastrar Script Node de Scilab hasta la ventana diagrama de bloques para trabajar con él. Se puede observar que aparece el cuadro de texto Scilab Script como se muestra en la figura 23, el cual sirve para escribir nuestro código matemático.

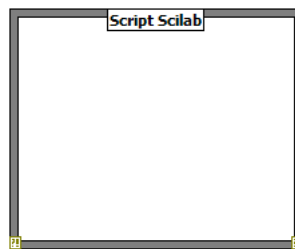


Figura 23: Cuadro de texto.

En la figura 24, se muestra como se pueden operar las entradas de nuestro instrumento virtual con el código matemático en Scilab al alambrear el nodo con estas.

Haciendo click derecho en el borde del nodo y haciendo una selección en el menú emergente se puede crear una variable de entrada o de salida (figura 24,1). Después, se escribe el nombre de la variable que se desea asociar a la nueva entrada (o salida) (figura 24, 2). Entonces se puede alambrear la variable de entrada o salida al nodo (figura 24, 3). Finalmente, en el cuadro de texto, se puede hacer uso de la variable alambrada al nodo escribiendo su nombre (figura 24, 4).

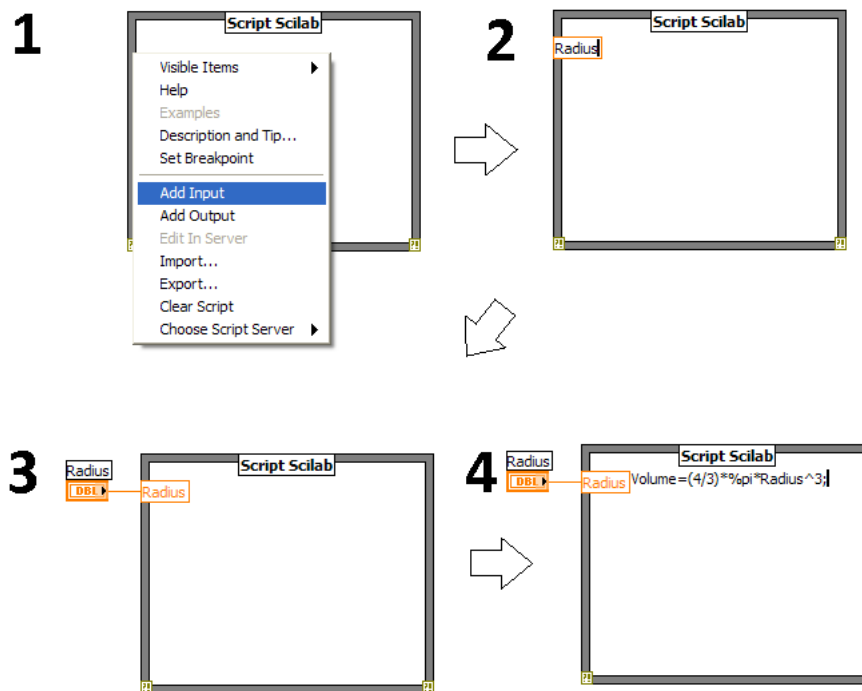


Figura 24: Conexión de variables de entrada o de salida de LabVIEW con el cuadro de texto de Scilab. Se puede trabajar estas variables con texto matemático de Scilab como se muestra en 4.

De esta manera es como podemos usar en LabVIEW el código matemático de Scilab.

4.2.3. Comandos en Scilab.

Scilab trabaja con comandos y una sintaxis muy parecidos a los que usa Matlab, gracias a esto, el aprendizaje de Scilab resulta muy sencillo y rápido. A continuación se presentarán varios comandos y sus aplicaciones en los temas que nos interesan en Fundamentos de Control, siendo estos álgebra lineal, manejo de polinomios, matrices, funciones de transferencia, análisis de respuesta en frecuencia, análisis en el tiempo y gráficos 2D.

Para invocar la ayuda de Scilab basta con escribir por ejemplo `help plot`, damos `<enter>` y se desplegará la ayuda del comando `plot`.

4.2.4. Constantes matemáticas.

Las constantes tales como π , e , i , etcétera se definen escribiendo el símbolo `%` antes de la variable.

■ Ejemplo 5 Constantes matemáticas en Scilab de uso común:

```
-->%pi //constante pi
%pi =
```

3.1415927

```
-->%e //constante e  
e =
```

2.7182818

```
-->%i //constante i (raiz cuadrada de -1)  
i =
```

i

4.2.5. Creación de un vector.

Para crear un vector basta con poner entre corchetes los elementos del vector, las columnas se separan con una coma o con un espacio en blanco y los renglones se separan con un punto y coma, tal como se hace en Matlab.

■ **Ejemplo 6** *Para crear un vector se escribe:*

Si se quiere crear un vector renglón

$a = [1\ 2\ 3]$ ó bien $a = [1, 2, 3]$

Si se quiere crear un vector columna

$b = [1; 2; 3]$

Scilab nos arroja el siguiente resultado:

Vector renglón

a = 1. 2. 3.

vector columna

b =

1.
2.
3.

Si queremos crear un vector teniendo como datos el valor inicial, el valor final y el espaciamiento entre cada valor utilizamos la siguiente sintaxis:

$a = \text{valor inicial} : \text{espaciamiento} : \text{valor final}$

■ Ejemplo 7 Crear un vector t que inicie en 0 y termine en 1 con un espaciamento de 0.1 entre cada dato.

```
t=0:0.1:1
t =
    0.    0.1    0.2    0.3    0.4    0.5    0.6    0.7    0.8
0.9    1.
```

Si se quiere ocultar el resultado basta con escribir un punto y coma al final de la instrucción.

Para crear un vector columna con un valor inicial, un valor final y un espaciamento se usa la misma instrucción pero encerrada entre paréntesis y con un apóstrofe al final de éste, el apóstrofe indica la transposición de un vector o una matriz.

■ Ejemplo 8 Crear un vector transpuesto vector transpuesto t que inicie en 0 y termine en 1 con un espaciamento de 0.1 entre cada dato.

```
t=(0:0.1:1)´
t =
    0.
    0.1
    0.2
    0.3
    0.4
    0.5
    0.6
    0.7
    0.8
    0.9
    1.
```

4.2.6. Creación de una matriz.

Para crear una matriz se definen los renglones de esta entre corchetes separados por punto y coma. Los elementos de cada renglón se separan por un espacio en blanco o por una coma como se muestra en el ejemplo siguiente:

■ Ejemplo 9 Crear la matriz $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$

La matriz anterior se puede crear de dos maneras, escribiendo $A=[1\ 2\ 3;4\ 5\ 6;7\ 8\ 9]$ o bien $A=[1,2,3;4,5,6;7,8,9]$, el resultado que nos arroja Scilab es:

```
A =
    1.    2.    3.
    4.    5.    6.
    7.    8.    9.
```

Definidas las matrices se pueden realizar las siguientes operaciones entre matrices:

```
A+B    A*B    A-B
```

Para seleccionar una submatriz o algunos elementos de una matriz o columna existen las siguientes operaciones:

- $a(2,5)$ denota el elemento de a en la fila 2 y en la columna 5.
- $a(3,:)$ denota la tercera fila de la matriz a .
- $a(:,4)$ denota la cuarta columna de la matriz a .
- $a(1:2,2:5)$ denota la submatriz de tamaño $2*4$, formado por los elementos que están en las filas 1, 2 y en las columnas 2 a 5.

4.2.7. Creación de polinomios.

Se pueden definir de dos formas:

- especificando sus raíces:
--> $p = \text{poly}([1,2], 'x')$

$$p =$$
$$2 - 3x + x^2$$

- especificando sus coeficientes:
--> $p = \text{poly}([1,2,3,4,5], 'x', 'c')$

$$p =$$
$$1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + 5x^4$$

Para encontrar las raíces del polinomio basta con usar el comando **roots()**.

■ **Ejemplo 10** *Encontrar las raíces de un polinomio que tiene por coeficientes 1, 2, 3, 4, 5.*

Calculamos el polinomio cuyos coeficientes son 1, 2, 3, 4 y 5.

```
-->p=poly([1,2,3,4,5], 'x', 'c')  
p =
```

$$1 + 2x + 3x^2 + 4x^3 + 5x^4$$

*Obtenemos sus raíces con el comando **roots()**.*

```
-->roots(p)  
ans =  
  
0.1378323 + 0.6781544i  
0.1378323 - 0.6781544i  
- 0.5378323 + 0.3582847i  
- 0.5378323 - 0.3582847i
```

4.2.8. Creación de gráficos.

Para dibujar gráficos en 2D de alguna función $y = f(t)$ se usa el comando `plot()` o bien `plot2d()`.

■ **Ejemplo 11** Dibujar la función seno con una amplitud de 31, una frecuencia de 1 Hz y un offset de 30.

```
-- > t=(0:0.01:1); // Definición del rango de t.  
-- > ft = 21*sin(2*%pi*t)+30; // Definición de f(t).  
-- > plot2d( t, ft); // Ejecución del gráfico del tipo y = f(t).
```

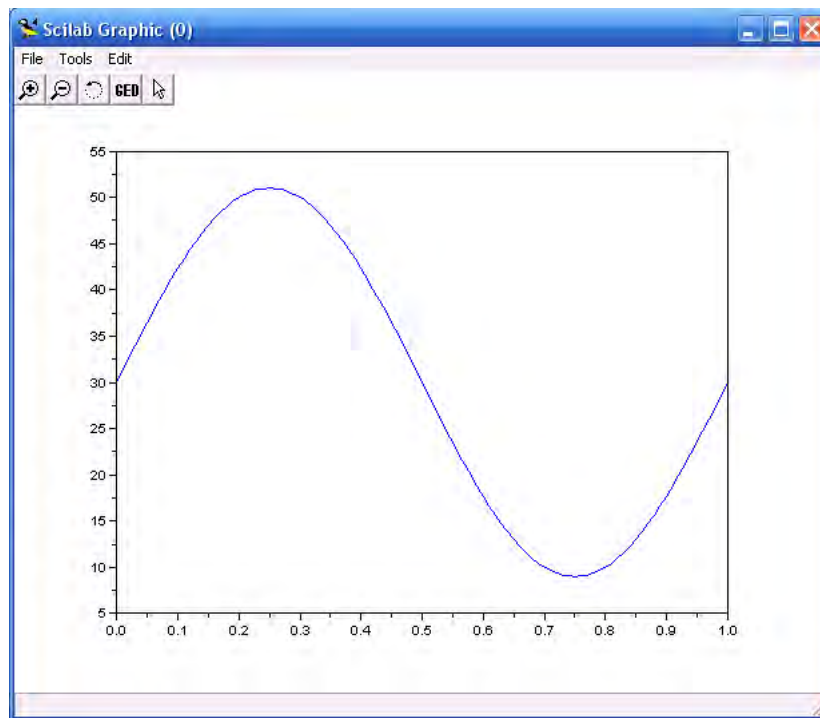


Figura 25: Uso del comando `plot2d`, el cual nos grafica una función.

La figura 25 muestra un ciclo de la función seno que se produjo con el código anterior.

Para dibujar gráficos paramétricos $x = x(t)$, $y = y(t)$ se usa el mismo comando **plot()**.

■ **Ejemplo 12** Dibujar un gráfico paramétrico de ecuaciones $x(t) = (2 * \cos(t) + 1) * \cos(t)$ y $y(t) = (2 * \cos(t) + 1) * \sin(t)$.

```
-- > t=(-4:0.01:4); // Definición del rango de t.  
-- > xt = (2 * cos(t) + 1) .* cos(t); // Definición de la función x(t).  
-- > yt = (2 * cos(t) + 1) .* sin(t); // Definición de la función y(t).  
-- > plot2d( xt, yt ); // Ejecución del gráfico (x(t), y(t) ).
```

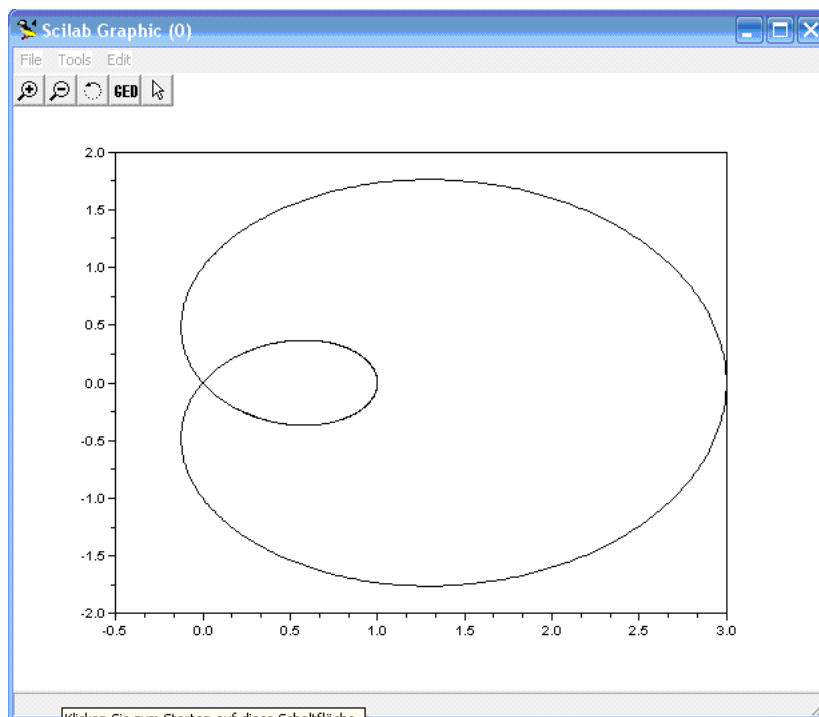


Figura 26: Uso del comando plot(), el cual nos grafica una función paramétrica.

En la figura 26 se muestra el resultado del código anterior, en el cual se grafica una función paramétrica conocida como cardioide.

4.2.9. Cálculo de la función de transferencia.

Para calcular una función de transferencia en Scilab, debemos crear un sistema de ecuaciones lineales y para eso ocupamos el comando **syslin**. Con este comando podemos convertir los polinomios del numerador y denominador en una función de transferencia.

■ **Ejemplo 13** Crear la función de transferencia:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + 0,25s + 1}$$

Procedemos a declarar la variable compleja **s**, luego creamos los polinomios del numerador y el denominador usando la variable **s** y después creamos un sistema lineal:

```

-->s=poly(0,'s') //definimos la variable compleja s

s =

s

-->num=poly([1],'s','c')//creamos el polinomio del numerador
//a partir de sus coeficientes
num =

1

-->den=poly([1 0.25 1],'s','c')//creamos el polinomio del
//denominador a partir de sus
//coeficientes
den =

          2
1 + 0.25s + s

-->FT=syslin('c',num,den) //creamos la función de transferencia,
//la 'c' significa
//que trabajamos en el dominio del
//tiempo continuo

FT =

          1
-----
          2
1 + 0.25s + s

```

Si queremos poner una realimentación negativa usamos el operador `/[-1]`.

■ **Ejemplo 14** *Aplicar una realimentación positiva a la función de transferencia en lazo abierto definida por $\frac{1}{20 + 10s + s^2}$.*

```

-->s=poly(0,'s') //definimos la variable compleja s

s =

s

-->num=poly([1],'s','c')//creamos el polinomio del numerador
//a partir de sus coeficientes
num =

1

-->den=poly([1 0.25 1],'s','c')//creamos el polinomio del
//denominador a partir de sus
//coeficientes
den =

          2
20 + 10s + s

-->g=syslin('c',num,den) //funcion de transferencia

```

```

g =                                     //en lazo abierto

      1
      -----
      2
20 + 10s + s

-->ft=g/. [1]                           //aplicando la realimentacion
ft =                                     //positiva

      1
      -----
      2
21 + 10s + s                           //funcion de transferencia
                                       //en lazo cerrado con
                                       //realimentación positiva

```

Si queremos multiplicar dos funciones de transferencia usamos el operador `*`.

■ **Ejemplo 15** Multiplicar las funciones de transferencia $G_1 = \frac{1}{10 + s}$ y $G_2 = \frac{1}{1 + s}$.

```

-->s=poly(0,'s');

-->G1=syslin('c',poly([1],'s','c'),poly([10 1],'s','c'))
G1 =

      1
      -----
      2
10 + s

-->G2=syslin('c',poly([1],'s','c'),poly([1 1],'s','c'))
G2 =

      1
      -----
      1 + s

-->w1=G1*G2
w1 =

      1
      -----
      2
10 + 11s + s

```

4.2.10. Respuesta a escalón.

Para calcular la respuesta en el tiempo de un sistema usamos el comando `csim(función, vector de tiempo, sistema lineal)`.

■ **Ejemplo 16** Calcular la respuesta a una entrada escalón del sistema definido por la función de transferencia $\frac{1}{1 + 0,25s + s^2}$.

```

-->s=poly(0,'s');

```

```

-->num=poly([1],'s','c')
num =

    1

-->den=poly([1 0.25 1],'s','c')
den =

    2
    1 + 0.25s + s

-->sistema6=syslin('c',num,den) //función de transferencia
sistema6 =

    1
    -----
    2
    1 + 0.25s + s

-->instante=0:0.05:45; //vector de tiempo

-->y=csim('step',instante,sistema6);

-->plot2d(instante',y')

```

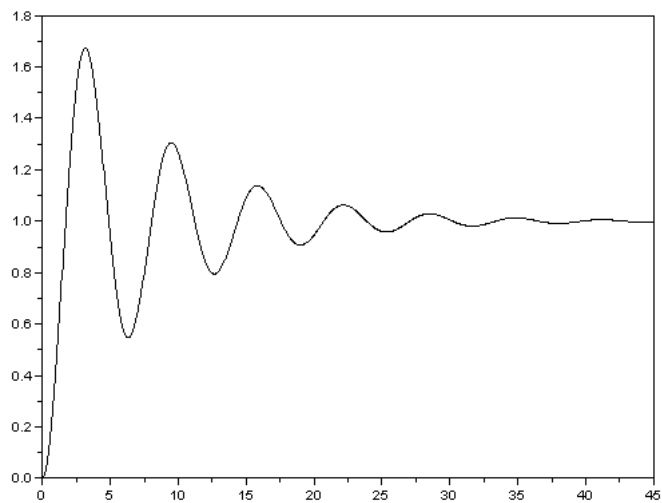


Figura 27: Respuesta a una entrada escalón.

La figura 27 muestra la respuesta de la función de transferencia anterior con una entrada escalón.

4.2.11. Trabajando en espacio de estados.

Para crear el espacio de estados a partir de sus matrices se utiliza el comando **Sss**, creamos las matrices A (matriz de estado), B (matriz de entrada), C (matriz de salida) y D (matriz de transmisión directa) y las ponemos como argumentos del comando.

■ **Ejemplo 17** *Crear un sistema de ecuaciones de estado a partir de las matrices de estado, de entrada, de salida y de transmisión directa:*

```
-->A = [-5 -1;6 0];
-->B = [-1; 1];
-->C = [-1 0];
-->D =0;
-->Sss = syslin('c',A,B,C,D) //la 'c' indica que se trabaja en
                             //el dominio del tiempo continuo.
Sss =

      Sss(1)   (state-space system:)

!lss A B C D X0 dt !

      Sss(2) = A matrix =           //matriz de estado

- 5.   - 1.
  6.    0.

      Sss(3) = B matrix =           //matriz de entrada

- 1.
  1.

      Sss(4) = C matrix =           //matriz de salida

- 1.    0.

      Sss(5) = D matrix =           //matriz de transmisión directa

0.

      Sss(6) = X0 (initial state) = //estado inicial del sistema

0.
0.

      Sss(7) = Time domain =         //se trabaja en el dominio
                                     //del tiempo

c
```

Para extraer las matrices de un espacio de estados se utiliza el comando **[A,B,C,D]=abcd(Sss)**.

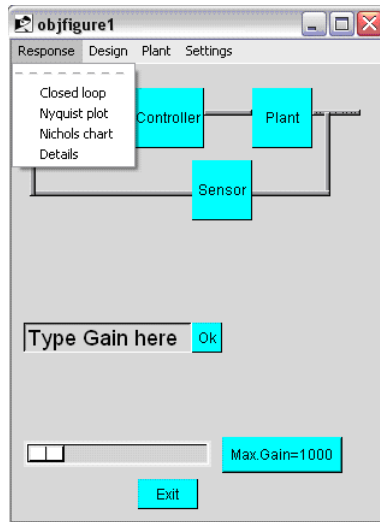


Figura 29: Pantalla principal.

La figura 29 muestra un diagrama de cómo queda el control realimentado con su ganancia, controlador y sensor. Por default muestra el diagrama de polos y ceros, en la opción **Response** del menú principal se pueden encontrar varias opciones según lo que queramos ver.

Cuando elegimos lazo cerrado nos aparecen las opciones que se muestran en la figura 30 las cuales brindan la respuesta a escalón, impulso, rampa etcétera del sistema.

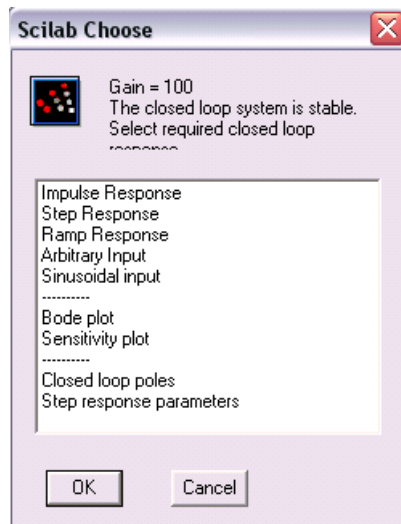


Figura 30: Diferentes opciones para el análisis de la función de transferencia.

También podemos usar únicamente el panel de control y proporcionarle una ganancia para ver su respuesta en el tiempo como lo muestra la figura 31.

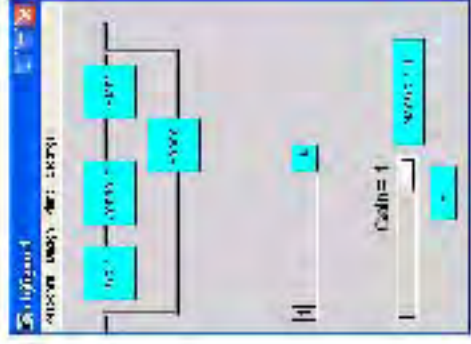


Figura 31: Panel de control, al proporcionar una ganancia nos mostrará su respuesta a escalón y diagramas de bode.

Al proporcionar una ganancia y dar click en OK nos muestra el diagrama de Bode, la respuesta al escalón unitario y la gráfica de sensibilidad, tal como se muestra en la figura 32.

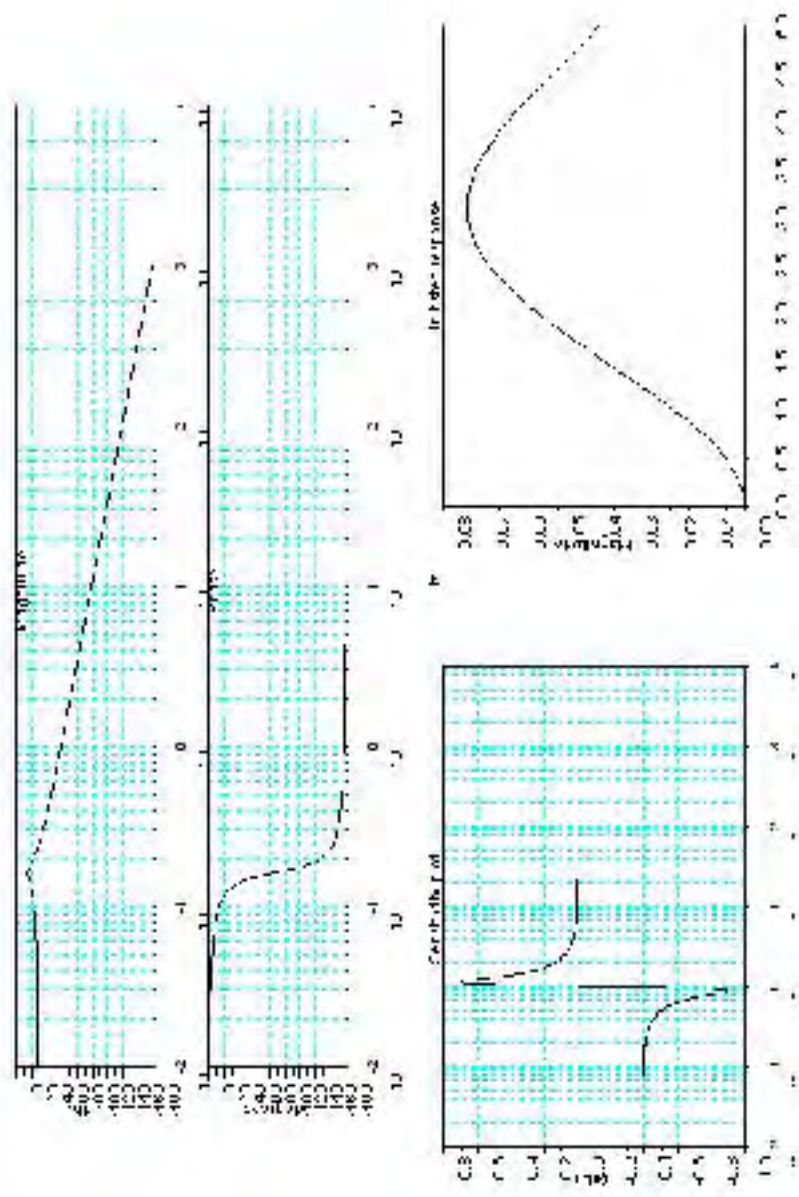


Figura 32: Diferentes gráficas que proporciona la herramienta rtfcool.

4.3. LabVIEW

LabVIEW tuvo inicio en 1986, cuando la compañía National Instruments empezó la instrumentación virtual, que permite a usuarios definir su propia solución usando software integrado a una computadora y una amplia variedad de hardware. Con las aplicaciones de medición y automatización de LabVIEW, se puede adquirir información de algún fenómeno o sistema físico, para procesarla y generar una respuesta deseada teniendo la posibilidad de presentar la información leída y la respuesta generada por medio de una interfaz gráfica, páginas Web o bien almacenarla para su uso posterior.

El software LabVIEW tiene funciones específicas para acelerar el desarrollo de aplicaciones de medida, control y automatización, nos proporciona herramientas poderosas para que el usuario pueda crear aplicaciones sin líneas de código (lenguaje C) por lo que en LabVIEW se crean programas basados en diagramas de bloques en un entorno de desarrollo gráfico con funciones integradas para realizar la adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de medida y presentaciones de datos.

No se puede dejar de mencionar que LabVIEW se puede conectar con todo tipo de hardware incluyendo instrumentos de escritorio, tarjetas insertables, controladores de movimiento y controladores lógicos programables (PLCs).

Otra de las razones que explican las ventajas de este software es que como las necesidades de las aplicaciones van cambiando con el tiempo, los sistemas definidos y creados por el usuario de LabVIEW tienen la movilidad y la flexibilidad necesaria para adecuarse sin la necesidad de incorporar equipos nuevos.

4.4. Principales características

Hoy en día, científicos, ingenieros, técnicos y estudiantes utilizan LabVIEW para desarrollar soluciones que respondan a sus interrogantes más exigentes, es por ello que su principal característica es la facilidad de uso que posee. También es útil para personas con pocos conocimientos en programación, ya que pueden construir aplicaciones relativamente complejas, imposibles para ellos con los lenguajes tradicionales. LabVIEW posee facilidad de manejo para las siguientes interfaces de comunicación:

- Puerto Serie.
- Puerto Paralelo.
- GPIB.
- USB.
- Bluetooth.

entre otros.

LabVIEW posee la capacidad de interactuar con lenguajes y aplicaciones:

- DLL (Librerías de funciones), NET, ActiveX, MultiSim, Matlab/Simulink, Scilab, AutoCAD, entre otros.
- Herramientas gráficas y textuales para el proceso digital de señales.
- Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos.
- Adquisición y tratamiento de imágenes.
- Control de movimiento.
- Tiempo real.

- Programación de FPGA's (Field Programmable Gate Array) para control o validación.
- Sincronización entre dispositivos.

Se pueden realizar tareas como:

- Adquisición de datos.
- Automatización industrial.
- Diseño embebido.
- Control de instrumentos.
- Diseño de control.

entre otros.

4.4.1. Programación LabVIEW

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

El software puede iniciarse a través del acceso directo o del menú inicio con la siguiente ruta:

Inicio – > Programas – > National Instruments – > LabVIEW 8.5

4.4.2. Partes de un VI

Se da inicio en *Blank VI* = VI en blanco. Al hacer click en *Blank VI*, automáticamente se abren 2 ventanas, una llamada Panel Frontal (Front Panel, figura 33) y la otra llamada Diagrama de Bloques (Block Diagram), figura 34).

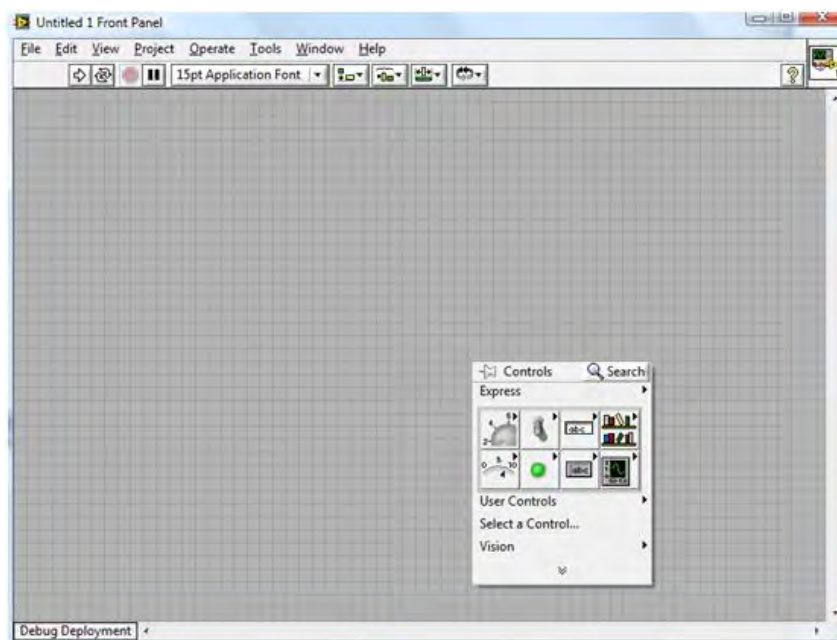


Figura 33: Panel frontal

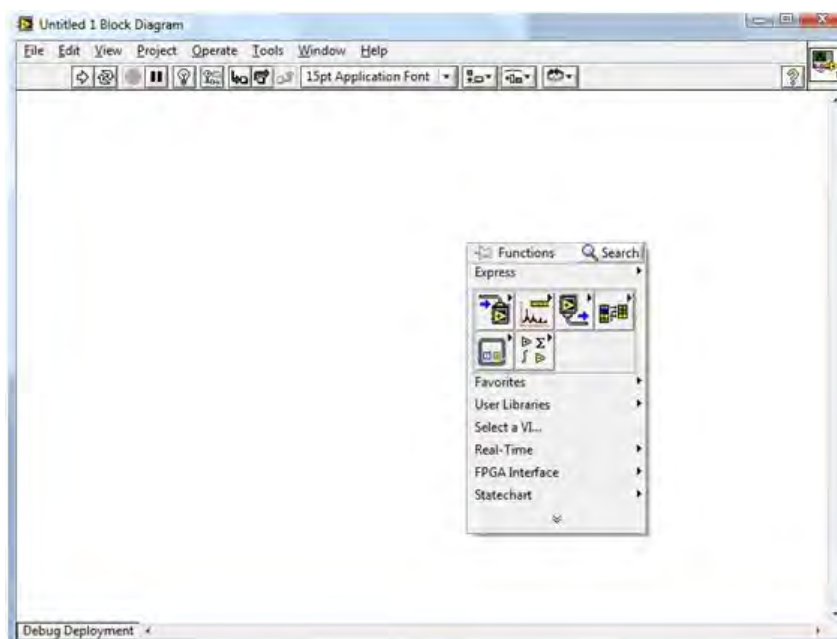


Figura 34: Diagrama de Bloques (Block Diagram)

Las opciones que presenta esta paleta son las siguientes:

- Operating tool - Cambia el valor de los controles.
- Positioning tool - Desplaza, cambia de tamaño y selecciona los objetos.
- Labeling tool - Edita texto y crea etiquetas.
- Wiring tool - Une los objetos en el diagrama de bloques.
- Object Pop-up Menu tool - Abre el menú desplegable de un objeto.
- Scroll tool - Desplaza la pantalla sin necesidad de emplear las barras de desplazamiento.
- Breakpoint tool - Fija puntos de interrupción de la ejecución del programa en VIs, funciones y estructuras.
- Probe tool - Crea puntos de prueba en los cables, en los que se puede visualizar el valor del dato que fluya por dicho cable en cada instante.
- Color Copy tool - Copia el color para después establecerlo mediante la siguiente herramienta.
- Color tool - Establece el color de fondo y el de los objetos

Para la identificación de las herramientas que contienen el Panel Frontal (front panel) y el Diagrama de Bloques (Block Diagram) se identifican las variables comunes de acuerdo al color de línea que tiene, ver figura 36.

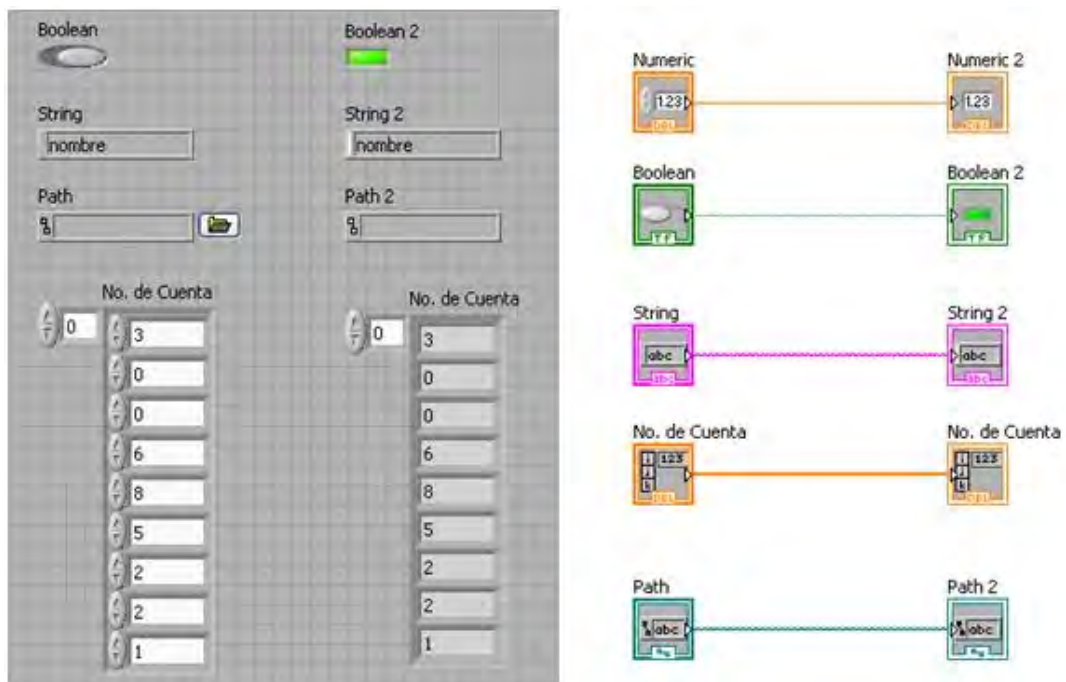


Figura 36: Dentro del Panel Frontal (front panel) y el Diagrama de Bloques (Block Diagram)s se encuentra la identificación de parámetros

El color naranja de los iconos indica que es un valor numérico, el color verde indica que es un valor booleano y el color rosa indica que es un texto.

5. Diseño de prácticas

5.1. Prácticas propuestas

En el presente trabajo se incluyen dos prácticas para que el alumno las desarrolle usando el software de LabVIEW. La primera usa el módulo de presión y la segunda usa módulo de posición-velocidad.

En la práctica 1 “Módulo de presión” se busca que el alumno comprenda que, la mayoría de las veces en el mundo real, no se conoce la función de transferencia de la planta a controlar y que esto no es un obstáculo para la aplicación de algún tipo de controlador. Se pretende que el alumno aplique un controlador *PID* a una planta (compresor) cuya función de transferencia se desconoce, observando la respuesta de la planta a una entrada escalón y variando las ganancias del controlador *PID* hasta obtener la respuesta deseada. Así mismo, se busca que el alumno pueda apreciar el efecto que tiene el controlador *PID* en la salida de la planta cuando existen perturbaciones externas que afectan el funcionamiento de esta.

En la práctica 2 “Módulo de posición-velocidad” se busca que el alumno obtenga la función de transferencia de la planta en lazo abierto y lazo cerrado de manera experimental sin conocer todos los datos técnicos de la planta (motor). Se pretende que el alumno comprenda que se pueden calcular de manera experimental los datos de fábrica necesarios para calcular la función de transferencia de la planta a controlar y así poder aplicar algún tipo de controlador. También se le pide sintonice el controlador *PID* para que observe los efectos de este a la salida de la planta, tanto en lazo abierto como en lazo cerrado.

5.2. Práctica 1 Módulo de presión

5.2.1. Objetivos.

1. Conocer cada elemento del módulo *G35A/EV*, así mismo, la unidad exterior de generación de la magnitud física *TY35/EV*.
2. Utilizar los transductores de presión.
3. Entender los conceptos: lazo abierto, realimentación o *feedback*, estabilidad y los tipos de respuesta del sistema.
4. Conocer el funcionamiento de un *PID*.
5. Realizar la función de transferencia a partir de la respuesta transitoria.
6. Manejar la tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

5.2.2. Material a utilizar

- Fuente *PS1/EV*, figura 37.



Figura 37: Fuente de 24V y $\pm 12V$.

- Módulo de Presión *G36/EV*, figura 38.

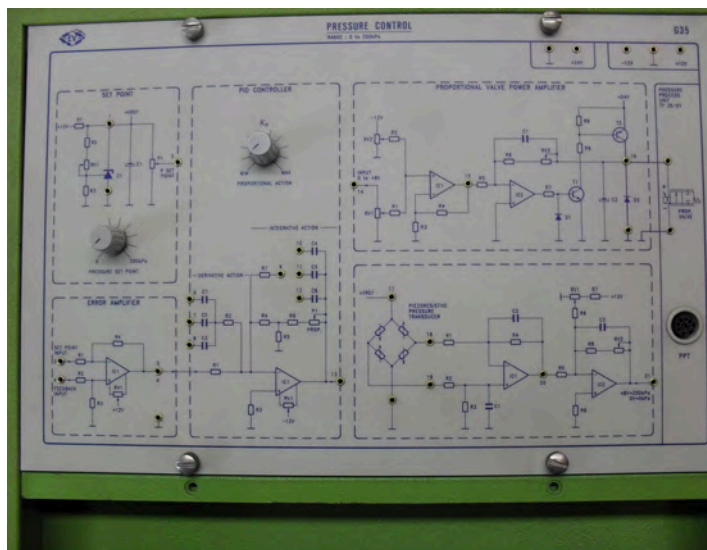


Figura 38: Módulo de Presión.

- Unidad Exterior de Generación de la magnitud física *TY36/EV*, figura 39.



Figura 39: Unidad exterior.

- Acondicionamiento de señal, figura 40.



Figura 40: Acondicionamiento de señal.

- Multímetro, figura 41.



Figura 41: Multímetro digital

- Juego de cables, figura 42.

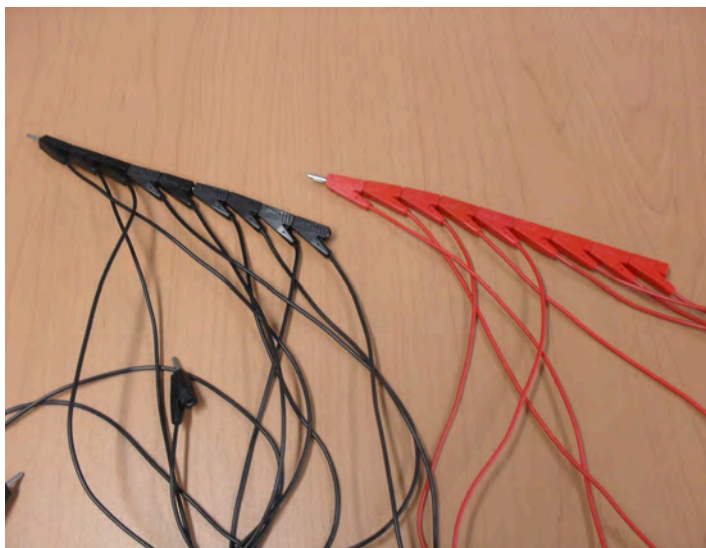


Figura 42: Cables

- Cable conexión DIN 8, figura 43.



Figura 43: Cable DIN 8.

- Cables de alimentación, figura 44.



Figura 44: Cable de alimentación

- Tarjeta USB-6009, figura 45.



Figura 45: Tarjeta de adquisición de datos.

5.2.3. Desarrollo.

Ajuste del equipo.

Conectar y encender la fuente, ajustar a cero el valor de la corriente, girar hasta que se encienda en indicador CV. Ajustar el voltaje a 24V. APAGAR LA FUENTE.

Conectar la tarjeta *USB – 6009* a la PC. Para verificar que está en perfectas condiciones, abrir el programa *National Instruments, Measurement* del escritorio, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 46.



Figura 46: My System-Measurement & Automation Explorer.

En la caja *Configuration*, elegir *My System/Devices and Interfaces/NI-DAQmx Devices*, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 47.

Dar click derecho sobre el dispositivo coloreado en verde de la pantalla para desplegar el menú y elegir *Test Panels* como se muestra en la figura 48.

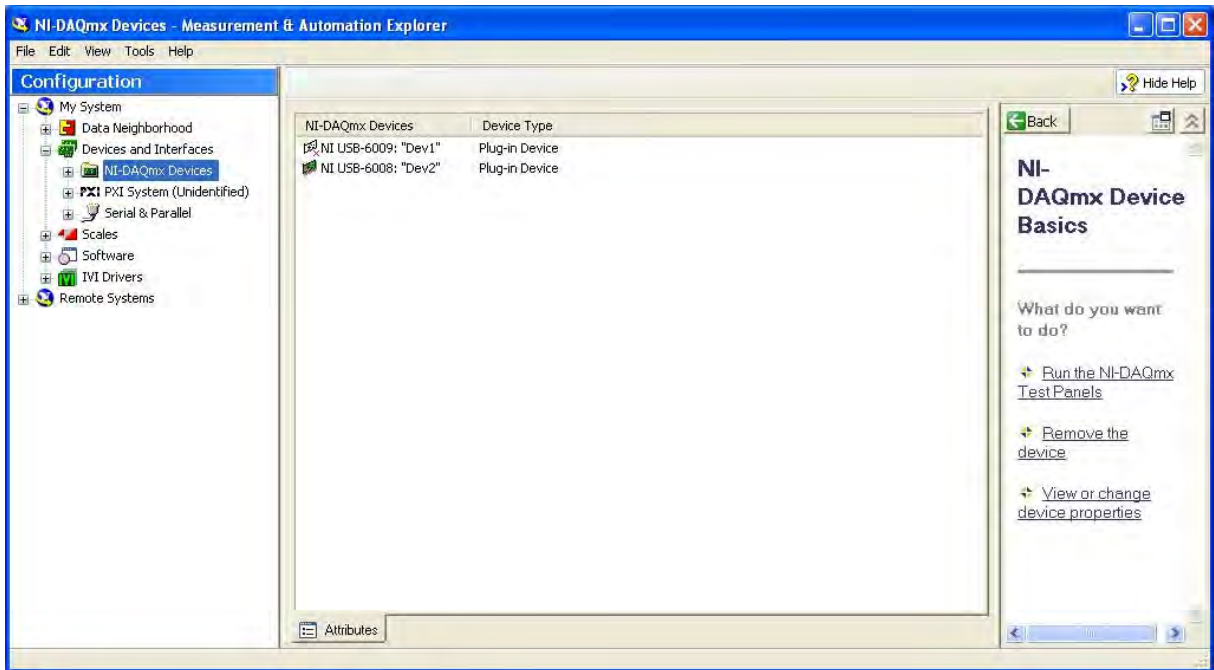


Figura 47: Configuración del sistema.

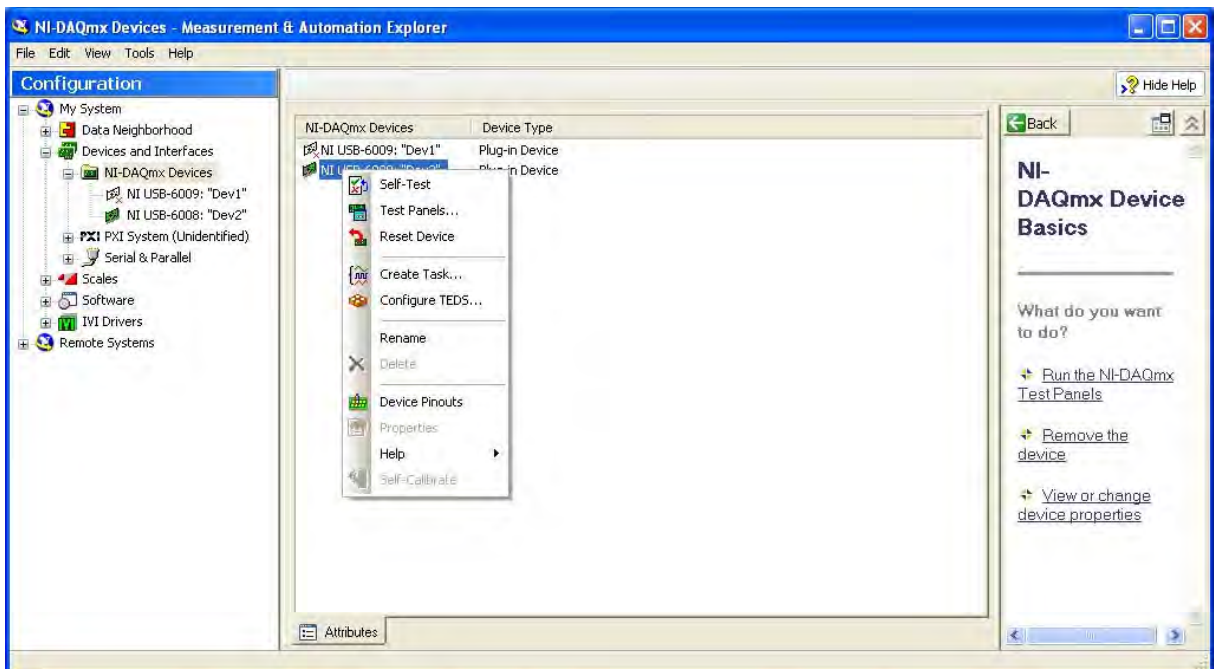


Figura 48: Menú del dispositivo NI USB-6009.

Se desplegará un menú con varias pestañas, pero sólo se utilizarán las pestañas *Analog Input*, *Analog Output*.

En *Analog Input* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como entrada.
- *Mode*, donde se establece la manera en que se adquirirán los datos.
- *Input Configuration* donde se establece cómo operará la entrada. En modo diferencial se usa como referencia un nivel bajo distinto de la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-20V, 20V]$, en modo *RSE* se usa como referencia a la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-10V, 10V]$.
- *Max Input Limit* y *Min Input Limit* establecen los límites máximo y mínimo de tensión de entrada respectivamente.

Lo anterior se puede observar en la figura 49.

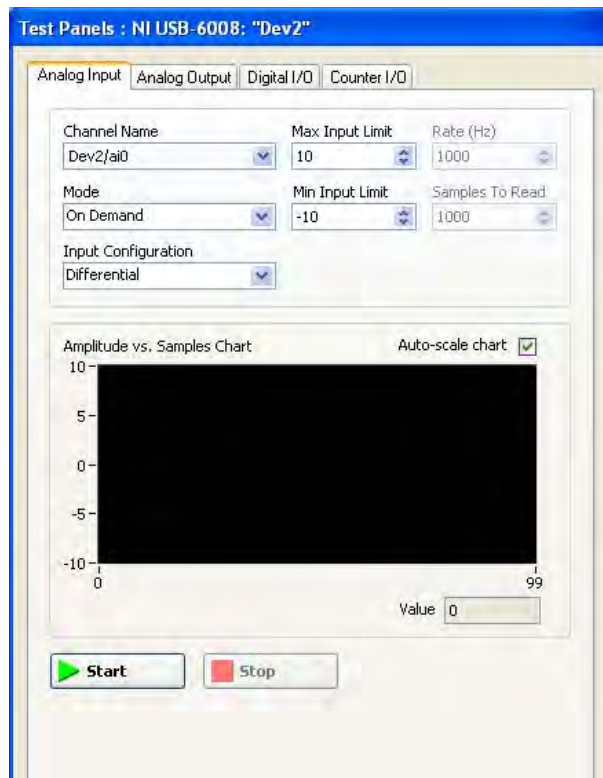


Figura 49: Pestaña Analog Input del menú Test Panels.

En *Analog Output* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como salida.
- *Mode* que establece la manera en que se enviarán los datos.
- *Max Output Limit* y *Min Output Limit* que establecen los límites máximo y mínimo de tensión de salida respectivamente.
- *Output Value* que es el valor que el *Test Panels* enviará a la salida escogida por el usuario.

Lo anterior se puede observar en la figura 50.

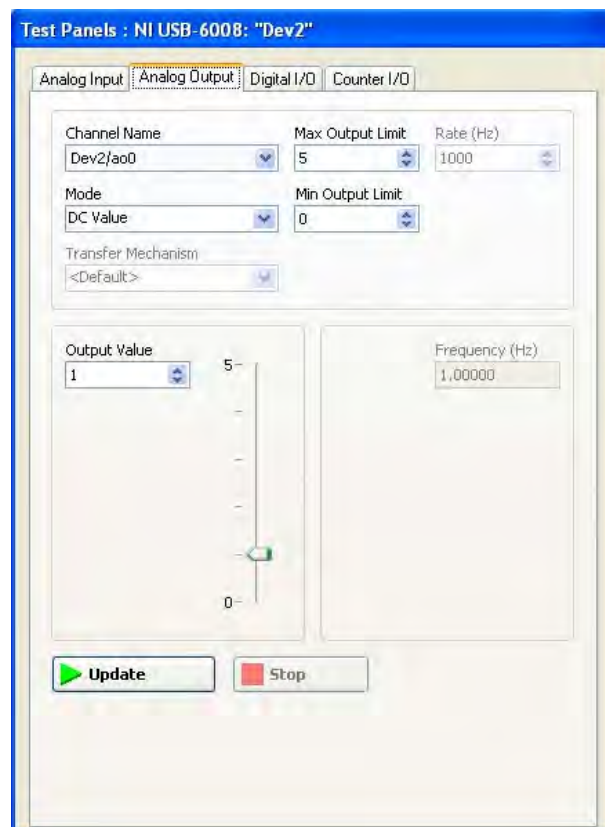


Figura 50: Pestaña Analog Output del menú Test Panels.

En la pestaña *Analog Input*, se usan los valores predeterminados y se da click en <Start>. Se observará una gráfica en la que el voltaje será 0V o tendrá un valor muy cercano a él. Si es así, significa que la tarjeta funciona bien, si da una lectura muy distinta de cero, significa que la entrada está dañada y habrá que elegir otra entrada y probarla de la misma manera.

En la pestaña *Analog Output* usar los valores predeterminados y en el campo *Analog Value* establecer un valor entre 0V y 5V de salida y medir el valor con el multímetro en el canal de salida seleccionado por el usuario. Si el valor medido con el multímetro corresponde al valor que el usuario estableció en el campo *Analog Value*, significa que el canal de salida funciona bien, si los valores son distintos por un valor muy grande, significa que ese canal de salida está dañado, habrá que elegir otro y probar de nuevo.

Conectar el equipo de la siguiente manera:

- Conectar los voltajes de polarización que se encuentran en la parte superior derecha del Módulo *G36/EV*.
- Conectar una entrada de la tarjeta *USB-6009* al borne 23 del módulo *G36/EV*.
- Conectar la salida del acondicionamiento al borne 18.
- Conectar los bornes 26 con 27 y 29 con el borne 30.
- Conectar el módulo *G36/EV* con la unidad exterior *TY36/EV* mediante el cable DIN 8.

Una vez comprobada la tarjeta de adquisición de datos, abrir LabVIEW 8.5 y buscar el programa en el escritorio de la PC *Presión*, la figura 51 muestra el panel frontal del programa. En la pantalla se observan los siguientes elementos:

- Set Point en *kP*
- Interruptor *ON – OFF*, que acciona el *PID*.
- Cuadro de ganancias del *PID*

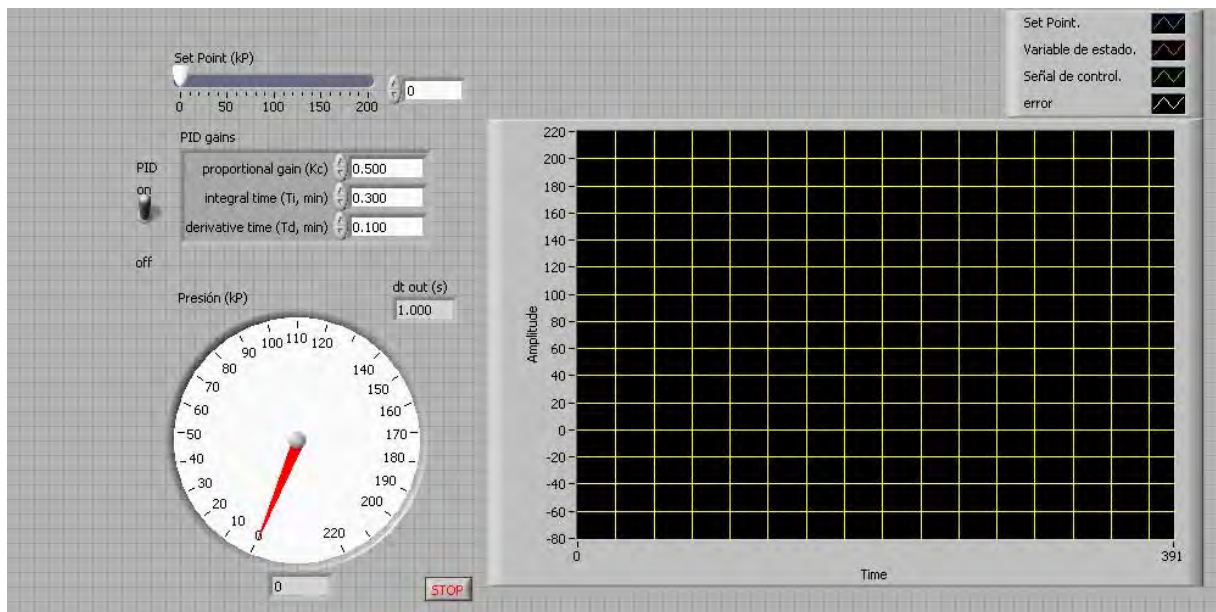


Figura 51: Panel Frontal del programa Posición- velocidad.

En la Unidad exterior de generación de la magnitud física *TY36/EV* se encuentra la válvula auxiliar 5b mostrada en la figura 52, que moveremos cuidadosamente en sentido antihorario, verificar que ésta sólo rota media vuelta.



Figura 52: Válvula manual 5b.

En el programa de *Presión* colocaremos el set point en $100kP$ como referencia. El interruptor en *ON*. Verificar que la válvula auxiliar 5b este cerrada.

5.2.4. Actividad 1 *Análisis de un Sistema Amortiguado.*

Para diseñar un control *PID* se utiliza el método manual de sintonización mediante ensayo y error, en los siguientes rangos:

$$0,047 \leq K_C \leq 0,052$$

$$0,295 \leq T_i \leq 0,305$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

El método consiste en:

- Aumentar la ganancia hasta que la respuesta a los cambios de consigna sea rápida, pero sin oscilación.
- Introducir el término integral, comenzando por un valor de T_i igual al tiempo de estabilización.
- Disminuir T_i para aumentar la rapidez de la respuesta, siempre y cuando no aparezca oscilación.
- Si se desea acción derivativa, comenzar con un valor de T_d igual a la tercera parte del retraso puro del sistema.
- Aumentar T_d hasta el valor máximo para el cual la respuesta no es oscilante. Intentar aumentar la ganancia.

Para obtener una respuesta lenta sin sobrepaso y utilizando el método manual, se obtienen las siguientes constantes:

$$K_C = 0,500$$

$$T_i = 0,300$$

$$T_d = 0$$

Por lo que la respuesta transitoria se comporta como se muestra en figura 53.

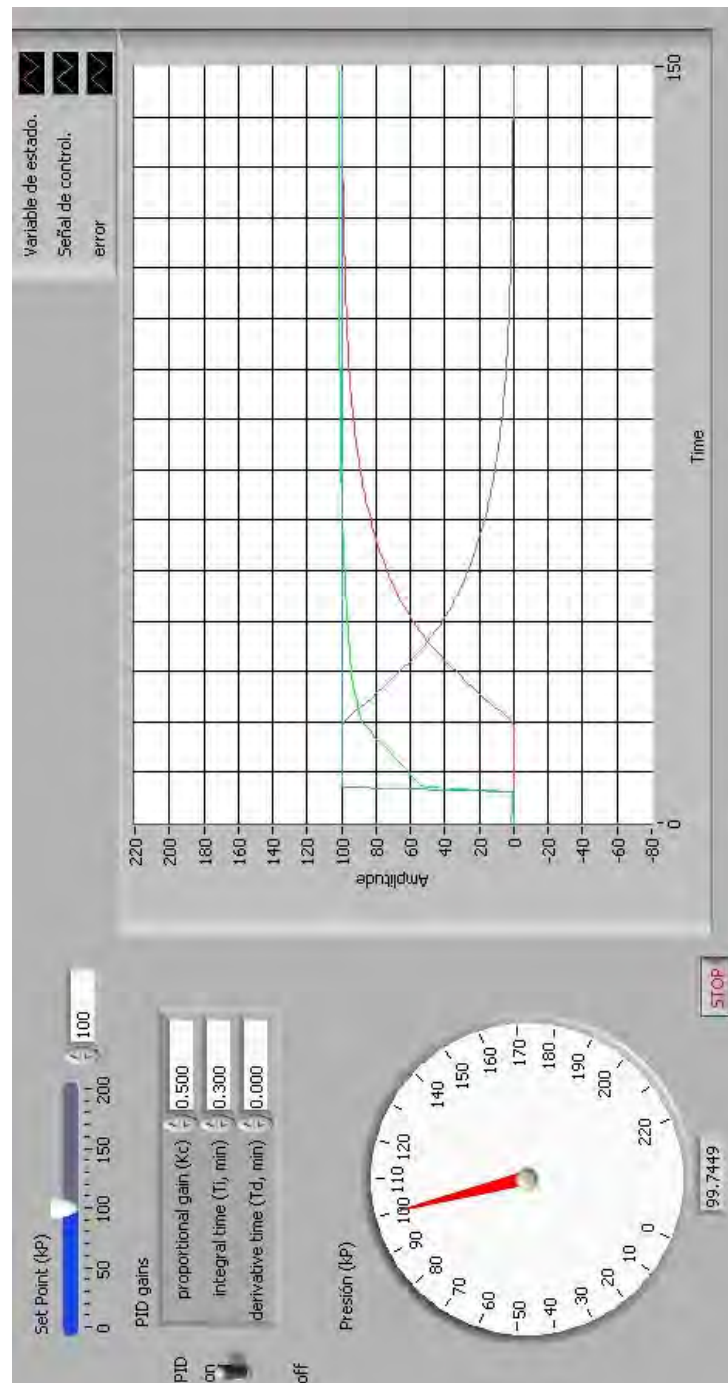


Figura 53: Sistema amortiguado

Con la gráfica podemos obtener su función de transferencia que tiene la forma

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \dots (1)$$

De la gráfica se observa que el voltaje de entrada es de 4V entonces la ganancia vendrá dada por el valor final en régimen permanente ponderado por la amplitud del escalón.

$$k = \frac{100}{4} = 25$$

La constante de tiempo τ es igual al tiempo que tarda la salida en alcanzar un 63,212% del valor final, matemáticamente la salida alcanza su valor final en un tiempo infinito pero en el sistema lo hace en tiempo finito, por lo cual se utilizan dos criterios: 98%(4 τ) y el de 95%(5 τ), entonces el sistema tarda 9s en alcanzar el 98% de su valor final y la constante es:

$$\begin{aligned} 4\tau &= 9s \\ \tau &= \frac{9}{4} = 2,25s \end{aligned}$$

Sustituyendo τ en la ecuación (1) tenemos:

$$G(s) = \frac{25}{2,25s + 1}$$

Normalizando la expresión anterior obtenemos la función de transferencia.

$$G(s) = \frac{11,111}{s + 0,444} \dots (2)$$

5.2.5. Actividad 2 *Sistema Subamortiguado.*

Aplicar el método de la actividad anterior para obtener las constantes que satisfagan una respuesta rápida con sobrepaso, utilizando el rango:

$$0,995 \leq K_C \leq 1,005$$

$$0,045 \leq T_i \leq 0,055$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

Ya aplicado el método se obtuvieron las constantes que satisfacen un sistema subamortiguado:

$$K_C = 1,000$$

$$T_i = 0,050$$

$$T_d = 0$$

La gráfica del sistema subamortiguado es la que se muestra en la figura 54.

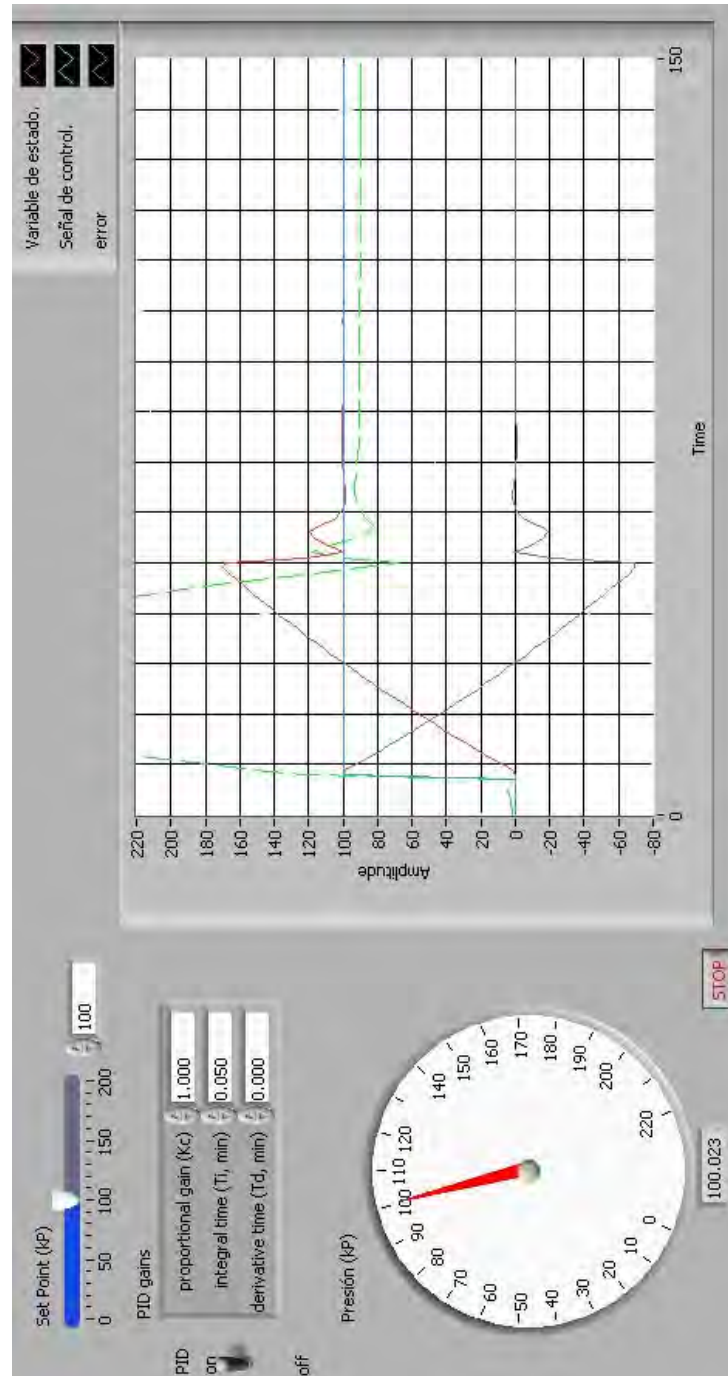


Figura 54: Sistema Subamortiguado

Ahora se calcula su función que satisface la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots (3)$$

De la gráfica se puede obtener el valor del sobrepaso:

$$M_p = \frac{170 - 100}{100} = 0,7$$

El tiempo de asentamiento t_s se puede obtener de la gráfica:

$$t_s = 10s$$

$$t_s = 4T = \frac{4}{\zeta\omega_n} = \frac{4}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{4}{10} = 0,4$$

Conociendo el factor de amortiguamiento σ y conociendo que el valor del sobrepaso se obtiene la frecuencia natural amortiguada ω_d .

$$M_p = e^{-\frac{(\zeta\omega_n)\pi}{\omega_d}} = e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi} \Rightarrow \ln M_p = \ln e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi}$$

$$\omega_d = \frac{-\sigma\pi}{\ln M_p} = \frac{-(0,4)\pi}{\ln(0,7)}$$

$$\omega_d = 0,3523$$

Ya teniendo el valor de ω_d obtenemos la frecuencia natural no amortiguada del sistema ω_n

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2} = \sqrt{0,4^2 + 0,3638^2}$$

$$\omega_n = 0,5406$$

Sustituyendo los valores del factor de amortiguamiento σ y de la frecuencia natural amortiguada ω_d en la expresión $\sigma = \zeta\omega_n$ se obtiene el coeficiente de amortiguamiento.

$$\zeta = \frac{\sigma}{\omega_n} = \frac{0,4}{0,5406}$$

$$\zeta = 0,7399$$

Sustituimos los valores del coeficiente de amortiguamiento ζ y de la frecuencia de natural no amortiguada en la expresión (3).

$$G(s) = \frac{0,5406^2}{s^2 + 2(0,7399)(0,5406)s + 0,5406^2}$$

Finalmente se obtiene la función de transferencia.

$$G(s) = \frac{0,2922}{s^2 + 0,7999s + 0,2922}$$

5.2.6. Actividad 3 Compensador.

Utilizaremos la válvula 5b mostrada en la figura 52 con el sistema subamortiguado. Abrir o cerrar esta válvula crea perturbaciones que el compensador debe eliminar. La válvula es muy sensible, por lo que debe accionarse sólo parcialmente. A este sistema se aplicará el controlador *PID* con las constantes obtenidas en la actividad anterior, mover la válvula 5b ligeramente y observar en la gráfica que el control será capaz de compensar la señal. Así mismo cerrar la válvula y también ver como lo compensa.

Lo anterior se observa en la figura 55.

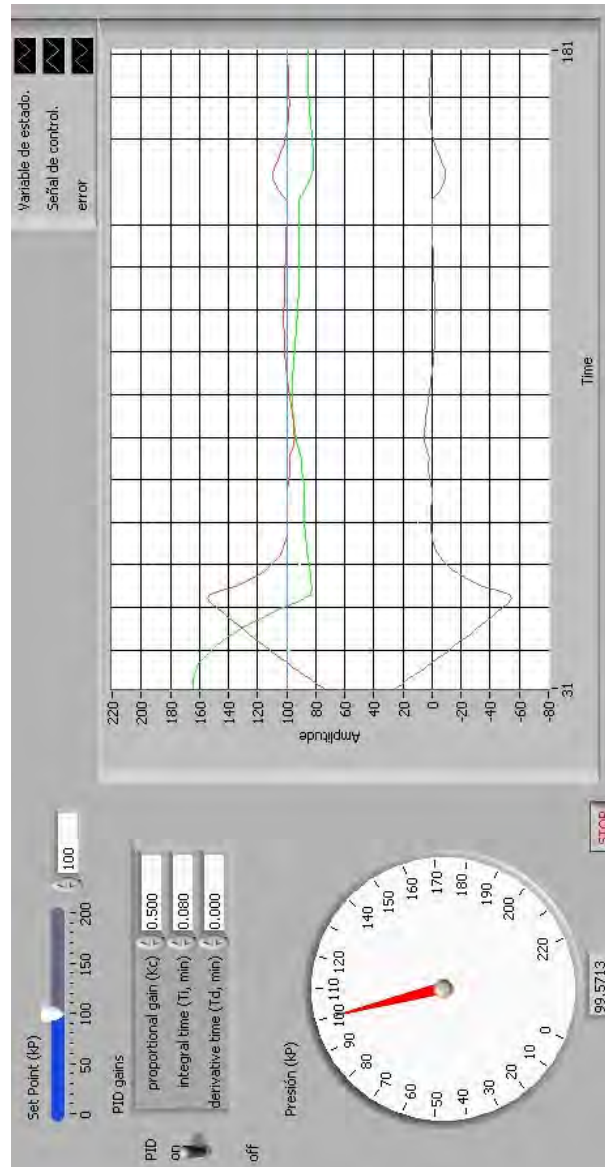


Figura 55: Sistema con perturbaciones.

5.2.7. Informe.

Llena la siguiente tabla

Ganancia	Sistema Sobreamortiguado	Sistema Subamortiguado
K_C	0,500	1
t_i	0,300	0,050
t_d	0	0

Para todos los casos realizados en el trabajo hacer la Función de Transferencia y presentar la gráfica correspondiente indicando los parámetros necesarios.

- Gráfica del sistema amortiguado

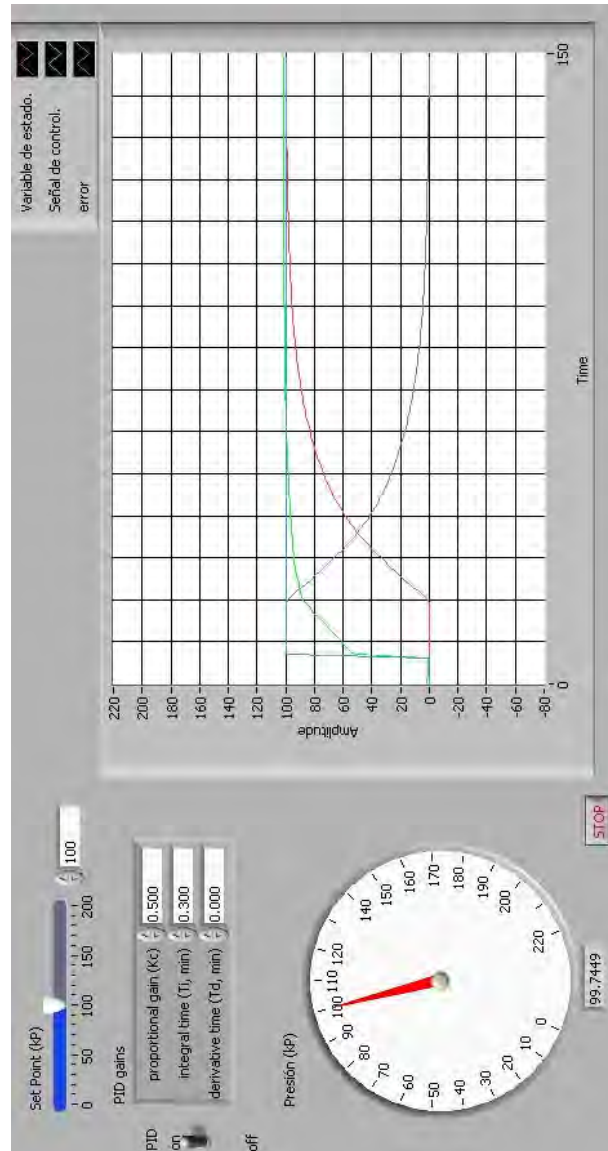


Figura 56: Sistema amortiguado

La función de transferencia corresponde a:

$$G(s) = \frac{11,111}{s + 0,444} \dots (1)$$

- Gráfica del sistema subamortiguado

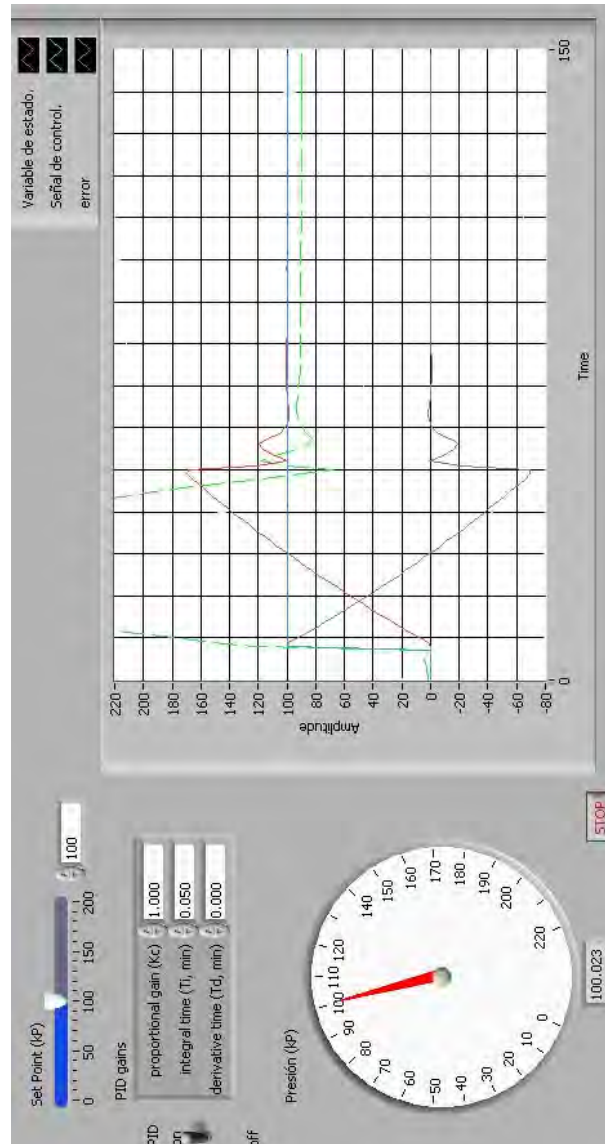


Figura 57: Sistema Subamortiguado

La función de transferencia corresponde a:

$$G(s) = \frac{0,2922}{s^2 + 0,7999s + 0,2922}$$

- Al girar la válvula observamos que nuestro control *PID* obtenido en la actividad 2 compensa las perturbaciones y se comporta de la siguiente manera.

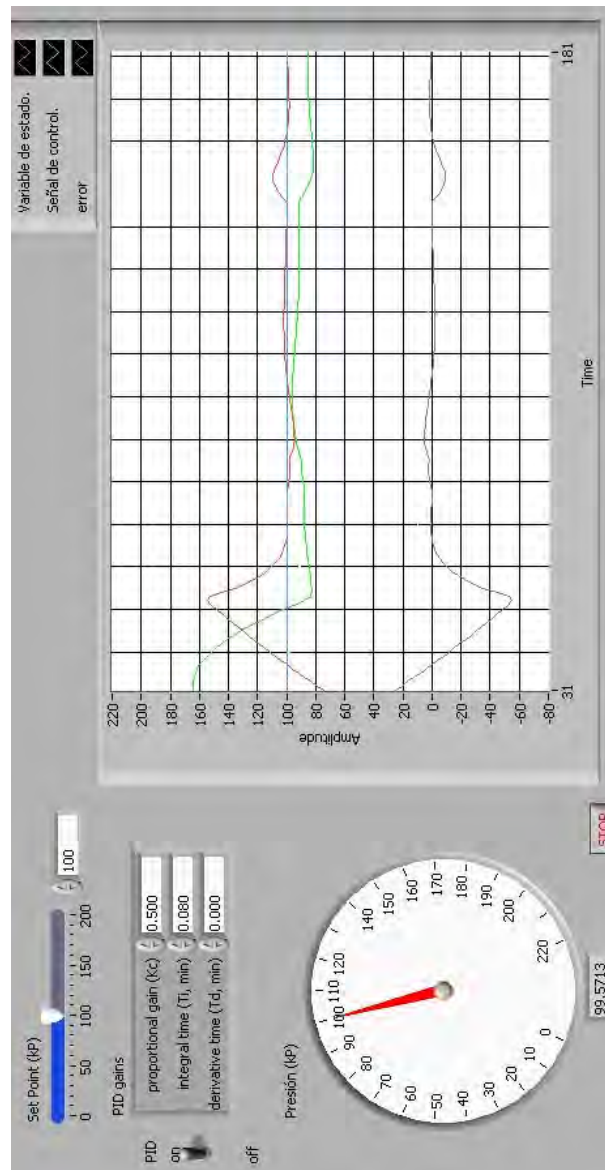


Figura 58: Sistema con perturbaciones

Explique los diferentes efectos que tienen cada una de las acciones de control K_C , t_i , t_d , en la respuesta del sistema.

- K_C : Es la ganancia, ésta no puede tomar un valor muy grande ya que el sistema se hará inestable y comenzará a oscilar, entonces se aumenta hasta que la respuesta sea rápida sin oscilaciones.
- t_i : El tiempo integral es el que ajusta la acción integral, mejora la respuesta permanente.
- t_d : El tiempo derivativo tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, pero amplifica las señales de ruido.

Presentar otra forma de sintonización de controladores PID, además de la manual.

Para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental Ziegler y Nichols definieron:

Reglas de Ziegler-Nichols.

De la planta se obtiene la respuesta experimental a una entrada escalón, si la respuesta posee un retardo tal que se forma una *s*, como se muestra en la figura 59.

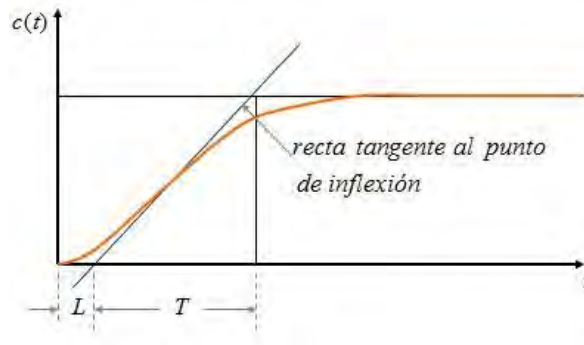


Figura 59: Curva experimental

Se pueden obtener los parámetros del controlador PID, la característica de esta respuesta con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T , puede aproximarse a un sistema de primer orden.

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

Se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta del sistema, la intersección con el eje del tiempo y el valor final de la amplitud forman las distancias L y T , con estos se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la siguiente tabla figura 60.

Tipo de controlador	K_p	τ_i	τ_d
<i>P</i>	$\frac{T}{L}$	∞	0
<i>PI</i>	$0.9\frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<i>PID</i>	$1.2\frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Figura 60: Tabla de ganancias.

Explicar ¿Por qué un control PID es capaz de compensar cualquier perturbación constante?

Porque al tener una acción derivativa mejora la respuesta transitoria y al tener una acción integral mejora el error en estado estable.

5.3. Práctica 2 Módulo de Posición-Velocidad.

5.3.1. Objetivos.

1. Conocer cada elemento del módulo *G36A/EV*, así mismo, conocer la unidad exterior de generación de la magnitud física *TY36/EV*.
2. Utilizar los transductores de velocidad.
3. Entender los conceptos: lazo abierto, realimentación o *feedback*, estabilidad y tipos de respuesta del sistema.
4. Conocer el funcionamiento de un *PID*.
5. Calcular la función de transferencia a partir de la respuesta transitoria.
6. Manejar la tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

5.3.2. Material a utilizar.

- Fuente *PS1/EV*, ver figura 61.



Figura 61: Fuente de 24V y $\pm 12V$.

- Módulo de Posición-Velocidad *G36/EV*, ver figura 62.

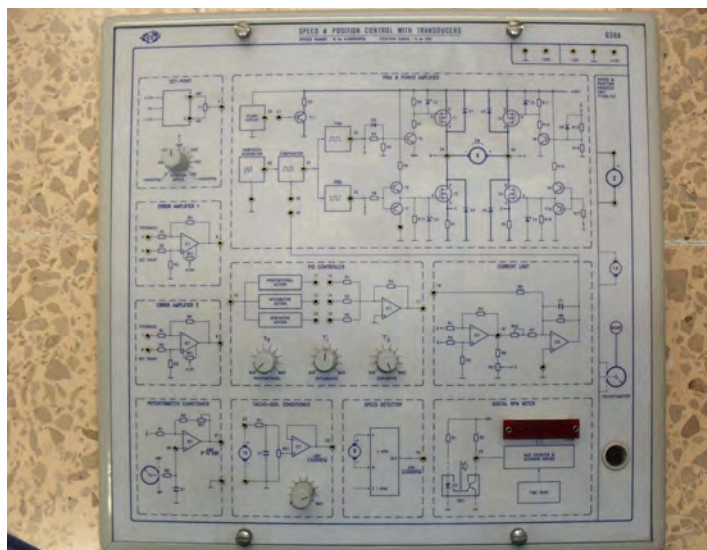


Figura 62: Módulo de Posición-Velocidad

- Unidad Exterior de Generación de la magnitud física *TY36/EV*, ver figura 63.

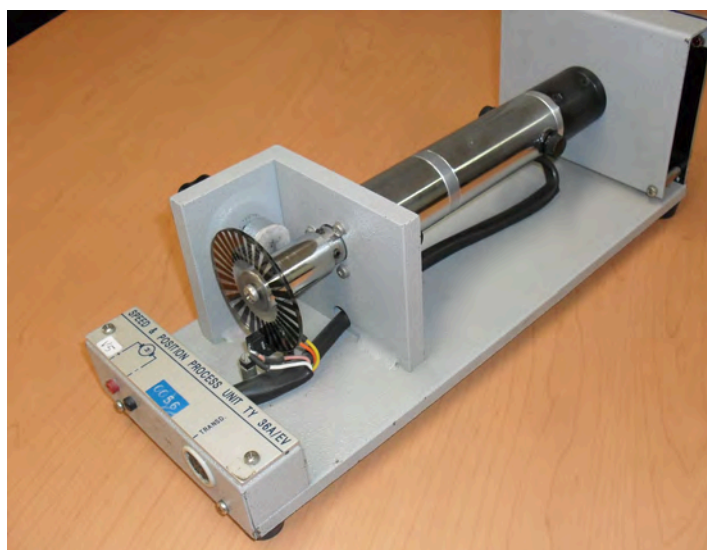


Figura 63: Unidad Exterior.

- Acondicionamiento de señal, figura 64. .



Figura 64: Acondicionamiento de señal.

- Multímetro, ver figura 65.



Figura 65: Multímetro digital

- Juego de cables, ver figura 66.

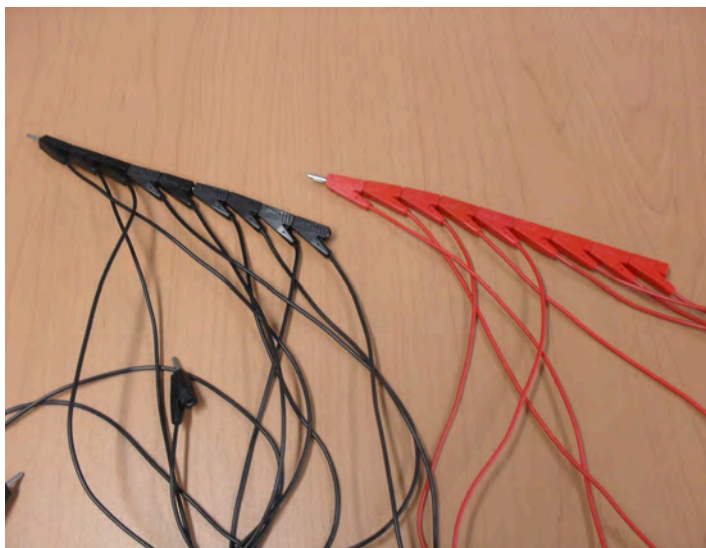


Figura 66: Cables

- Cable conexión DIN 8, ver figura 67.



Figura 67: Cable DIN 8.

- Cables de alimentación, ver figura 68.



Figura 68: Cable de alimentación.

- Tarjeta USB-6009, ver figura 69.



Figura 69: Tarjeta de adquisición de datos.

5.3.3. Desarrollo.

Ajuste del equipo.

Conectar y encender la fuente, ajustar a cero el valor de la corriente, girar hasta que se encienda en indicador CV. Ajustar el voltaje a 24V. APAGAR LA FUENTE.

Conectar la tarjeta *USB – 6009* a la PC. Para verificar que está en perfectas condiciones, abrir el programa *National Instruments, Measurement* del escritorio, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 70.



Figura 70: My System-Measurement & Automation Explorer.

En la caja *Configuration*, elegir *My System/Devices and Interfaces/NI-DAQmx Devices*, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 71.

Dar click derecho sobre el dispositivo coloreado en verde de la pantalla para desplegar el menú y elegir *Test Panels* como se muestra en la figura 72.

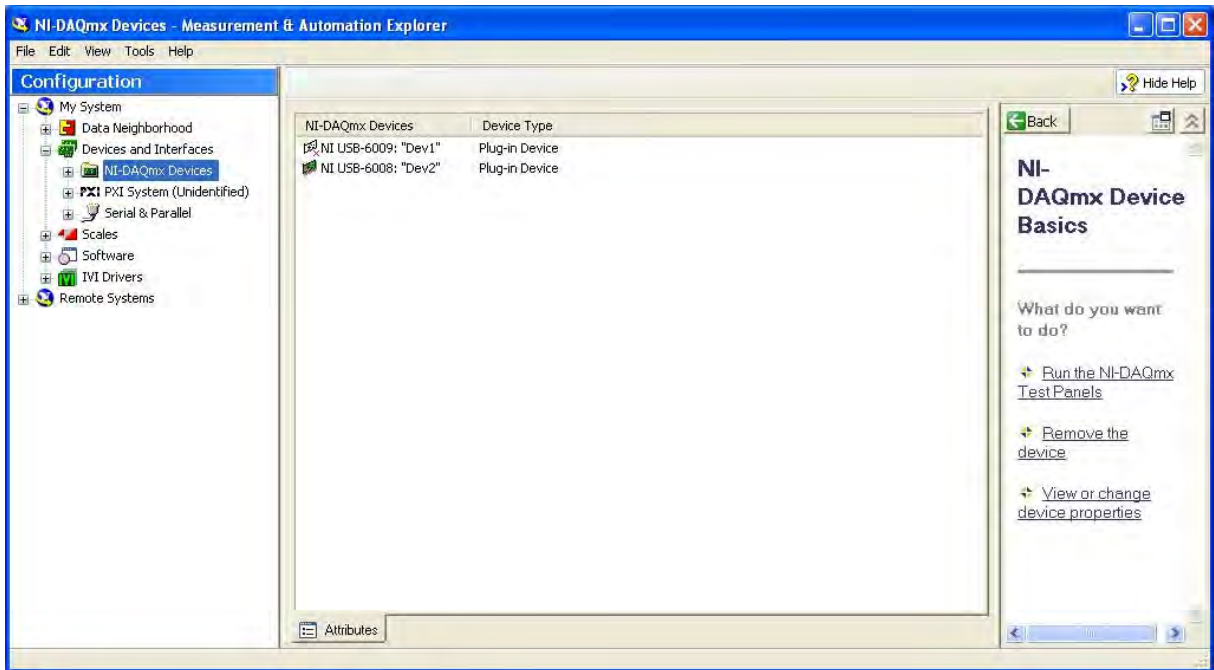


Figura 71: Configuración del sistema.

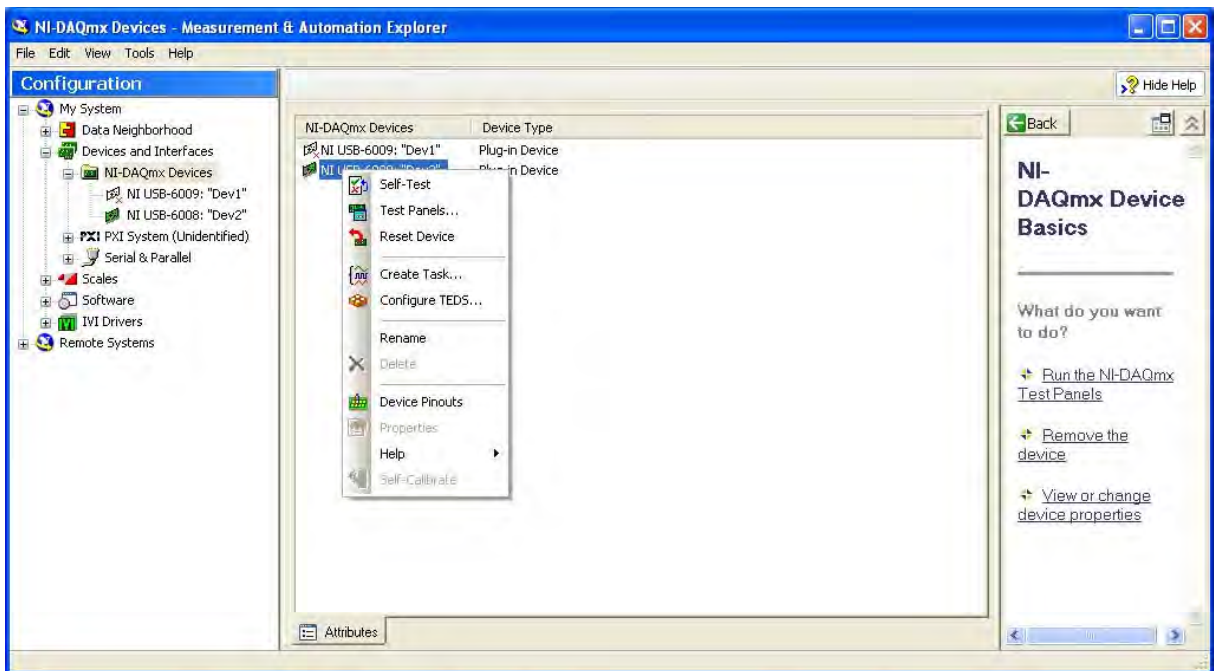


Figura 72: Menú del dispositivo NI USB-6009.

Se desplegará un menú con varias pestañas, pero sólo se utilizarán las pestañas *Analog Input*, *Analog Output*.

En *Analog Input* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como entrada.
- *Mode*, donde se establece la manera en que se adquirirán los datos
- *Input Configuration* donde se establece cómo operará la entrada. En modo diferencial se usa como referencia un nivel bajo distinto de la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-20V, 20V]$, en modo *RSE* se usa como referencia a la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-10V, 10V]$.
- *Max Input Limit* y *Min Input Limit* establecen los límites máximo y mínimo de tensión de entrada respectivamente.

Lo anterior se puede observar en la figura 73.



Figura 73: Pestaña Analog Input del menú Test Panels.

En *Analog Output* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como salida.
- *Mode* que establece la manera en que se enviarán los datos.
- *Max Output Limit* y *Min Output Limit* que establecen los límites máximo y mínimo de tensión de salida respectivamente.
- *Output Value* que es el valor que el *Test Panels* enviará a la salida escogida por el usuario.

Lo anterior se puede observar en la figura 74.

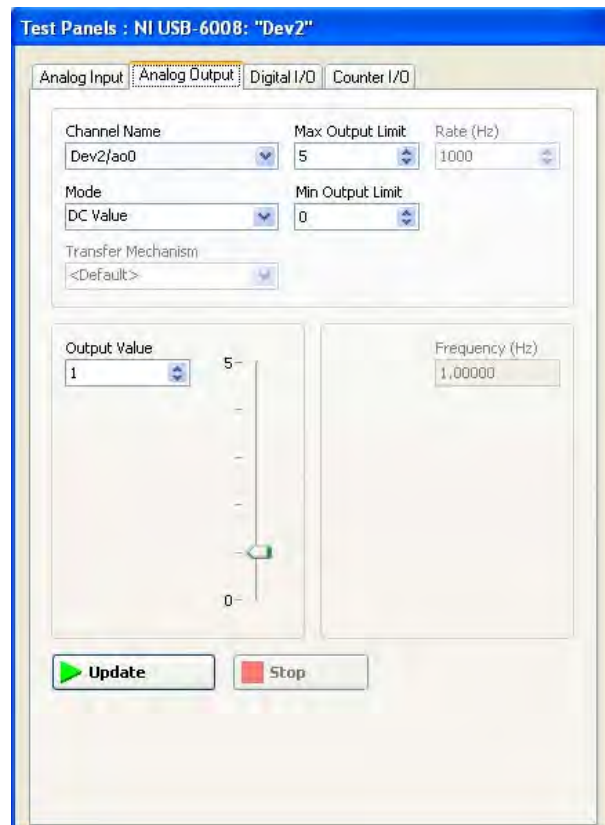


Figura 74: Pestaña Analog Output del menú Test Panels.

En la pestaña *Analog Input*, se usan los valores predeterminados y se da click en <Start>. Se observará una gráfica en la que el voltaje será 0V o tendrá un valor muy cercano a él. Si es así, significa que la tarjeta funciona bien, si da una lectura muy distinta de cero, significa que la entrada está dañada y habrá que elegir otra entrada y probarla de la misma manera.

En la pestaña *Analog Output* usar los valores predeterminados y en el campo *Analog Value* establecer un valor entre 0V y 5V de salida y medir el valor con el multímetro en el canal de salida seleccionado por el usuario. Si el valor medido con el multímetro corresponde al valor que el usuario estableció en el campo *Analog Value*, significa que el canal de salida funciona bien, si los valores son distintos por un valor muy grande, significa que ese canal de salida está dañado, habrá que elegir otro y probar de nuevo.

Conectar el equipo de la siguiente manera:

- Conectar los voltajes de polarización que se encuentran en la parte superior derecha del Módulo *G36/EV*.
- Conectar una entrada de la tarjeta *USB-2009* al borne 23 del módulo *G36/EV*.
- Conectar la salida del acondicionamiento al borne 18.
- Conectar los bornes 26 con 27 y 29 con el borne 30.
- Conectar el módulo *G36/EV* con la unidad exterior *TY36/EV* mediante el cable DIN 8.

Una vez comprobada la tarjeta de adquisición de datos, abrir LabVIEW 8.5 y buscar el programa en el escritorio de la PC *Posición-Velocidad*, la figura 75 muestra el panel frontal del programa. En la pantalla se observan los siguientes elementos:

- Set Point en *RPM*
- Interruptor *ON – OFF*, que acciona el *PID*.
- Cuadro de ganancias del *PID*

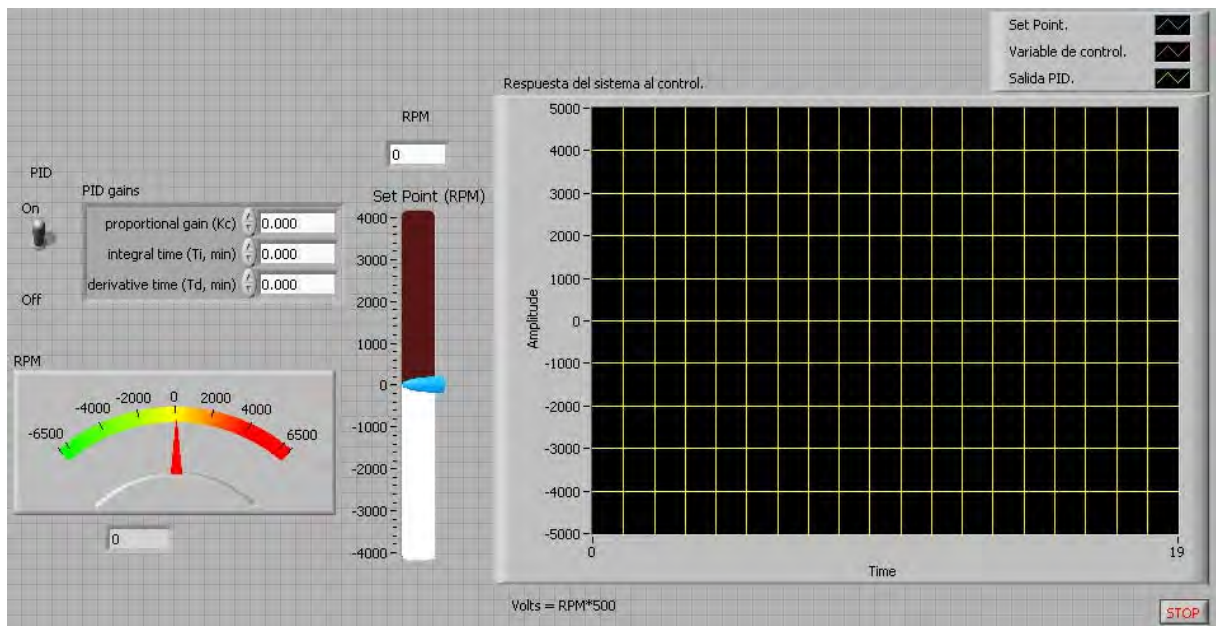


Figura 75: Panel Frontal del programa Posición- velocidad.

5.3.4. Actividad 1 *Lazo abierto*

Colocar el interruptor *PID* en <OFF> implica desconectar el control *PID* y dejar el sistema en lazo abierto. Aplicar una entrada escalón de 1200 *RPM* con el set point, y observar la gráfica que se obtiene.

Para obtener la función de transferencia relacionamos la velocidad angular del eje del motor ω con la tensión de entrada v .

Si la velocidad angular ω , esta dada por:

$$e = K_e \cdot \omega \dots (1)$$

$$v = e + i \cdot R + L \frac{di}{dt} \dots (2)$$

$$\tau = K_T \cdot i \dots (3)$$

$$\tau = J \cdot a + b \cdot \omega \Rightarrow K_T \cdot i = J \frac{d\omega}{dt} + b \cdot \omega \dots (4)$$

Las transformadas de Laplace de la velocidad $\omega(t)$ su derivada son:

$$L[\omega(t)] = \Omega(s) \dots (5)$$

$$L\left[\frac{d\omega(t)}{dt}\right] = s \cdot \Omega(s) - \omega(0) = s \cdot \Omega(s) \dots (6)$$

Con lo cual nos quedan las siguientes ecuaciones:

$$E(s) = K_e \cdot \Omega(s) \dots (7)$$

$$V(s) = (L \cdot s + R) \cdot I(s) + E(s) \dots (8)$$

$$T(s) = K_T \cdot I(s) = (J \cdot s + b) \cdot \Omega(s) \dots (9)$$

Operando algebraicamente, para obtener la función de transferencia de la velocidad angular, donde la variable dependiente sea la tensión y la independiente sea la velocidad angular:

$$V(s) = (L \cdot s + R) \cdot I(s) + K_e \cdot \Omega(s) = \frac{\Omega(s)(J \cdot s + b)}{K_T} \cdot (L \cdot s + R) + K_e \cdot \Omega(s) \dots (10)$$

$$V(s) = \Omega(s) \cdot \left[K_e + \frac{(J \cdot s + b)(L \cdot s + R)}{K_T} \right] \dots (11)$$

$$\frac{V(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_e \cdot K_T + (J \cdot s + b)(L \cdot s + R)}{K_T} \dots (12)$$

$$\frac{V(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_T}{K_e \cdot K_T + (J \cdot s + b)(L \cdot s + R)} \dots (13)$$

$$\frac{V(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_T}{K_e \cdot K_T + (J \cdot s + b)(L \cdot s + R)} \dots (14)$$

$$\frac{V(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_T}{s^2(J \cdot L) + s(J \cdot R + b \cdot L) + b \cdot R + K_e \cdot K_T} \dots (15)$$

***Parámetros del motor.**

Se obtienen los parámetros J, L, R, b, K_e, K_T . Algunos de estos son proporcionados por el fabricante y los encontramos en el manual de usuario de la unidad TY36A, en las especificaciones del motor, de los cuales se utilizarán los siguientes:

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión Nominal	v	24	V
Velocidad Nominal	ω	4000	RPM
Constante de Par	K_T	0,046	Nm/A
Resistencia	R	5,5	Ω
Momento de inercia rotórico	J	$5,18E^{-6}$	Kgm^2
Inductancia	L	2,8	mH

Cuadro 1: 1

Para hallar el valor de K_e , según la Ley de Faraday, si hay una espira de alambre en una campo variable, se inducirá una diferencia de potencial en las terminales de la espira.

$$v_b(t) = -\frac{d\phi}{dt} \dots (16)$$

Donde $v_b(t)$ es la tensión inducida y ϕ el flujo magnético que pasa a través de la espira. Como sabemos el flujo se define como:

$$\phi = BA \dots (17)$$

Aquí B es el campo magnético (que se considera constante) y A el área del medio cilindro encerrado por la espira. Sustituyendo el valor del flujo en (16) tenemos:

$$v_b(t) = -B \frac{dA}{dt} \dots (18)$$

El área a través de la cual pasa el flujo del centro a la superficie es el producto de la longitud de la circunferencia, si dividimos el área en dos partes nos queda como muestra la figura 76.

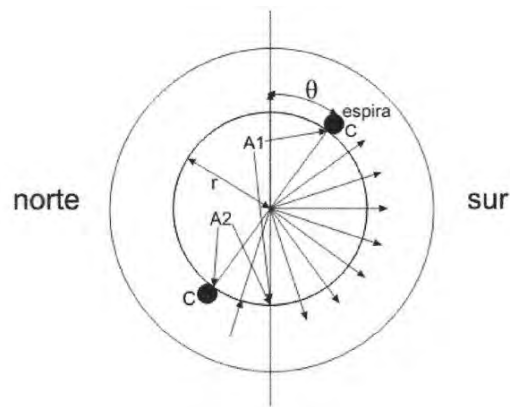


Figura 76:

$$A = A_1 - A_2 \dots (19)$$

$$A_1 = r(\pi - \theta)l \dots (20)$$

$$A_2 = r \cdot \theta \cdot l \dots (21)$$

Sustituyendo A en la ecuación 18 tenemos:

$$v_b(t) = -\frac{dB(A_1 - A_2)}{dt} \dots (22)$$

$$v_b(t) = -Brl \frac{d(\pi - 2\theta)}{dt}$$

$$v_b(t) = 2Brl \frac{d\theta}{dt}$$

$$v_b(t) = 2Brl\omega$$

Realizando el siguiente cambio de variable:

$$K_e = 2Brl \dots (23)$$

Sustituyendo (23) en (22) tenemos:

$$v_b(t) = K_e\omega \dots (24)$$

Analizando la fuerza en el rotor del motor podemos encontrar la relación entre K_e y K_T . Sabemos que una corriente eléctrica que fluye a través de un alambre de longitud l en presencia de un campo magnético B experimenta una fuerza F tangencial al núcleo. Esto es:

$$F = 2Bli.....(25)$$

Como el radio de la armadura es r , el par desarrollado es :

$$T = rF.....(26)$$

$$T = r2Bli$$

$$T = K_T i.....(27)$$

Se observa que:

$$K_T = 2bRL.....(28)$$

Expresando a K_T en Nm/A y K_e en Vs/rad por lo que ambas tienen exactamente el mismo valor numérico (esto no ocurre si se utilizan otros sistemas de unidades):

$$K_T = 0,046Nm/A$$

y

$$K_e = 0,046Vs/rad$$

Sabiendo que el sistema de primer orden queda descrito como:

$$Y(s) = \frac{p}{s+p} \cdot \frac{1}{a}.....(29)$$

por lo que la respuesta del sistema es:

$$Y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{p}{s+p} = 1.....(30)$$

$$Y(t) = 0,98 = 1 - e^{pt}$$

$$e^{pt} = ,02$$

Observando la gráfica obtenida experimentalmente (que se muestra en la figura 77), a una entrada escalón, obtenemos el tiempo de asentamiento $t_s = 4$ s.

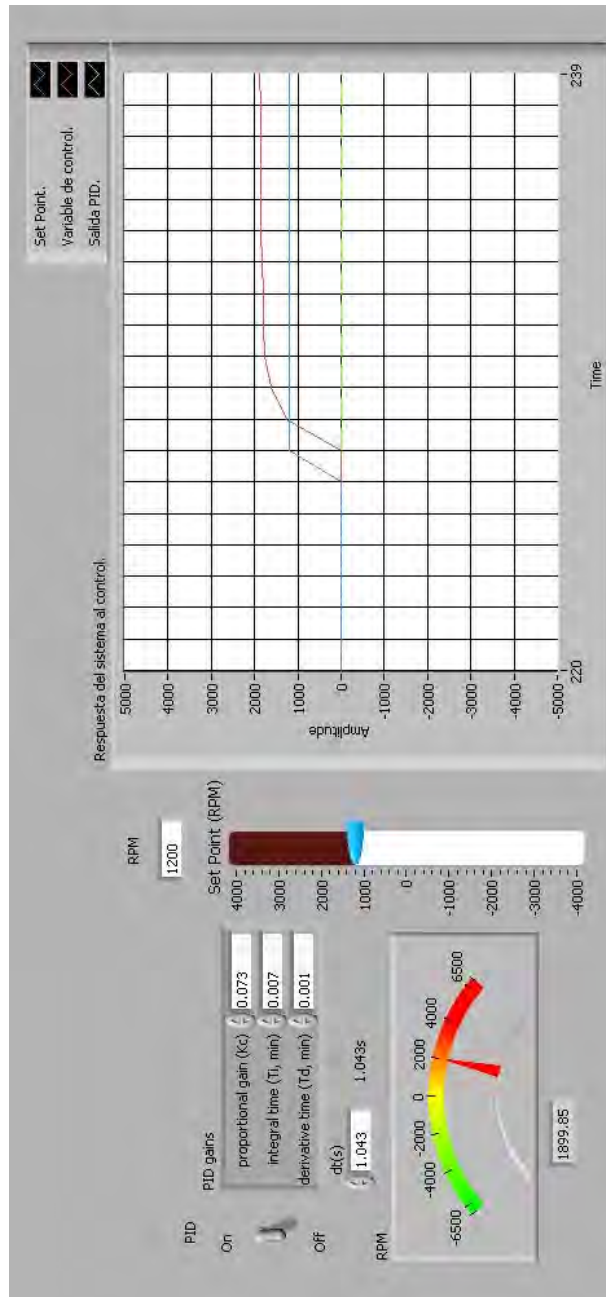


Figura 77: Lazo Abierto

Despejando p obtenemos:

$$\operatorname{Ln}e^{pt} = \operatorname{Ln}0,02$$

$$-pt = -3,912$$

$$p = \frac{3,912}{4} = 0,978$$

Sí sabemos que p es la constante mecánica del sistema y queda definida por:

$$p = \frac{b}{J} \dots (31)$$

Entonces obtendremos el valor de b de la siguiente manera:

$$b = p \cdot J$$

$$b = (0,978) \cdot (5,18 \cdot 10^{-6})$$

$$b = 5,066 \cdot 10^{-6}$$

Sustituyendo el valor de b en la ecuación (15) además de utilizar los parámetros dados por el fabricante obtenemos:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{s^2 JL + s(JR + bL) + bR + k_e k_T} \dots (15)$$

$$JL = 1,4504 \cdot 10^{-8}$$

$$JR + bL = 2,8504 \cdot 10^{-5}$$

$$bR + k_e k_T = 2,1438 \cdot 10^{-3}$$

Por lo que nuestra función de transferencia queda de la forma:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0,046}{(1,4504 \cdot 10^{-8})s^2 + (2,8504 \cdot 10^{-5})s + 2,1438 \cdot 10^{-3}} \dots (32)$$

Normalizando la función de transferencia expresada en la ecuación (32).

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{3,171 \cdot 10^6}{s^2 + (1,965 \cdot 10^3)s + 1,478 \cdot 10^5}$$

5.3.5. Actividad 2 *Análisis de un Sistema Sobreamortiguado.*

Accionar el interruptor *PID* y aplicar una entrada escalón de 2500 *RMP*.

Para diseñar un control se utiliza el método manual de sintonización mediante ensayo y error, en los siguientes rangos:

$$0,069 \leq K_C \leq 0,076$$

$$0,019 \leq T_i \leq 0,022$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

El método consiste en:

- Aumentar la ganancia hasta que la respuesta a los cambios de consigna sea rápida, pero sin oscilación.
- Introducir el término integral, comenzando por un valor de T_i igual al tiempo de estabilización.
- Disminuir T_i para aumentar la rapidez de la respuesta, siempre y cuando no aparezca oscilación.
- Si se desea acción derivativa, comenzar con un valor de T_d igual a la tercera parte del retraso puro del sistema.
- Aumentar T_d hasta el valor máximo para el cual la respuesta no es oscilante. Intentar aumentar la ganancia.

Para obtener una respuesta lenta sin sobrepaso y utilizando el método manual, se obtienen las siguientes constantes:

$$K_C = 0,073$$

$$T_i = 0,021$$

$$T_d = 0$$

Por lo que la respuesta transitoria se comporta como se muestra figura 78.

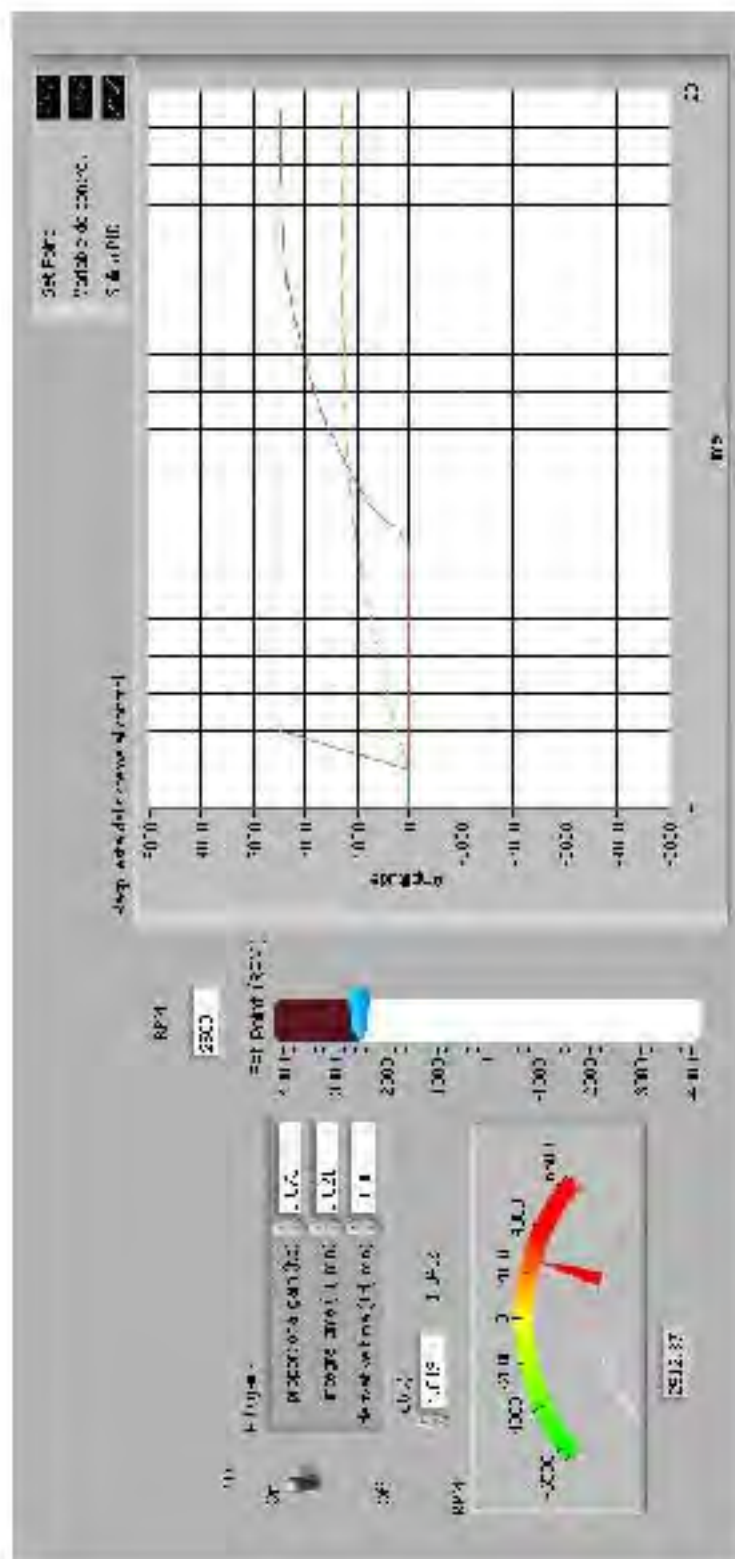


Figura 78: Sistema Sobreamortiguado

A partir de la gráfica de la figura 78 podemos obtener la función de transferencia del sistema amortiguado que tiene la forma:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \dots (34)$$

De la gráfica se observa que el voltaje de entrada es de 5V entonces la ganancia vendrá dada por el valor final en régimen permanente ponderado por la amplitud del escalón.

$$k = \frac{2500}{5} = 500$$

La constante de tiempo τ es igual al tiempo que tarda la salida en alcanzar un 63,212% del valor final, matemáticamente la salida alcanza su valor final en un tiempo infinito pero en el sistema lo hace en tiempo finito, por lo cual se utilizan dos criterios: 98%(4 τ) y el de 95%(5 τ), entonces el sistema tarda en alcanzar el 98% de su valor final en 14s esta es:

$$4\tau = 14s$$

$$\tau = \frac{14}{4} = 3,5s$$

Sustituyendo en la ecuación (34) tenemos:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{500}{3,5s + 1}$$

Normalizando la expresión anterior obtenemos la función de transferencia.

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{142,8571}{s + 0,2857} \dots (35)$$

5.3.6. Actividad 3 *Análisis de un Sistema Subamortiguado.*

Aplicar el mismo método para obtener las constantes que satisfagan una respuesta rápida con sobre paso, utilizando el rango:

$$0,069 \leq K_C \leq 0,076$$

$$0,095 \leq T_i \leq 0,013$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

Ya aplicado el método se obtuvieron los siguientes valores de las constantes que satisfacen un sistema subamortiguado:

$$K_C = 0,073$$

$$T_i = 0,010$$

$$T_d = 0$$

La función de transferencia de un sistema subamortiguado tiene la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots (36)$$

De la gráfica se puede obtener el valor del sobrepaso.

$$M_p = \frac{2750 - 2500}{2500} = 0,1$$

El tiempo de asentamiento t_s también puede obtenerse de la gráfica.

$$t_s = 15s$$

Se calcula el factor de amortiguamiento σ a partir del tiempo de asentamiento t_s :

$$t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} = \frac{4}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{4}{15} = 0,2666$$

Conociendo el valor del factor de amortiguamiento σ y conociendo que el valor de sobrepaso se puede obtener la frecuencia natural amortiguada ω_d :

$$M_p = e^{-\frac{(\zeta\omega_n)\pi}{\omega_d}} = e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi} \Rightarrow \ln M_p = \ln e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi}$$

$$\omega_d = \frac{-\sigma\pi}{\ln M_p} = \frac{-(0,2666)\pi}{\ln(0,1)}$$

$$\omega_d = 0,3638$$

Ya teniendo el valor de ω_d , obtenemos la frecuencia natural no amortiguada del sistema ω_n .

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2} = \sqrt{0,2666^2 + 0,3638^2}$$

$$\omega_n = 0,4510$$

Sustituyendo los valores de la frecuencia natural amortiguada ω_d y del factor de amortiguamiento σ en $\sigma = \zeta\omega_n$ se obtiene el coeficiente de amortiguamiento relativo ζ :

$$\zeta = \frac{\sigma}{\omega_n} = \frac{0,2666}{0,4510}$$

$$\zeta = 0,5911$$

Ya encontrados todos los parámetros necesarios para encontrar la función de transferencia, sustituiremos los valores en (36)

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0,4510^2}{s^2 + 2(0,5911)(0,4510)s + 0,4510^2}$$

Finalmente queda

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0,2034}{s^2 + 0,5332s + 0,2034}$$

5.3.7. Informe.

Llena la siguiente tabla

Ganancia	Sistema Sobreamortiguado	Sistema Subamortiguado
K_C	0,073	0,073
t_i	0,021	0,010
t_d	0	0

Para todos los casos realizados en el trabajo calcular la función de transferencia y presentar la gráfica correspondiente indicando los parámetros necesarios.

- Gráfica del sistema en lazo abierto.

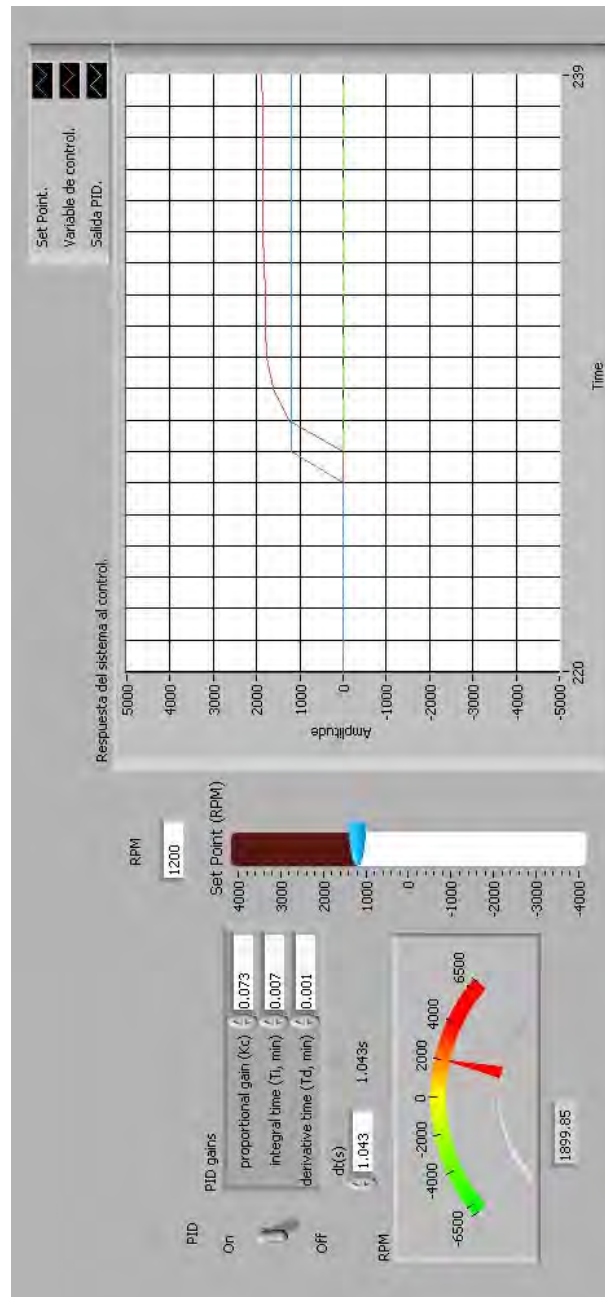


Figura 80: Lazo Abierto

La función de transferencia corresponde a:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{3,171 \cdot 10^6}{s^2 + (1,965 \cdot 10^3)s + 1,478 \cdot 10^5}$$

- Gráfica del sistema sobreamortiguado.

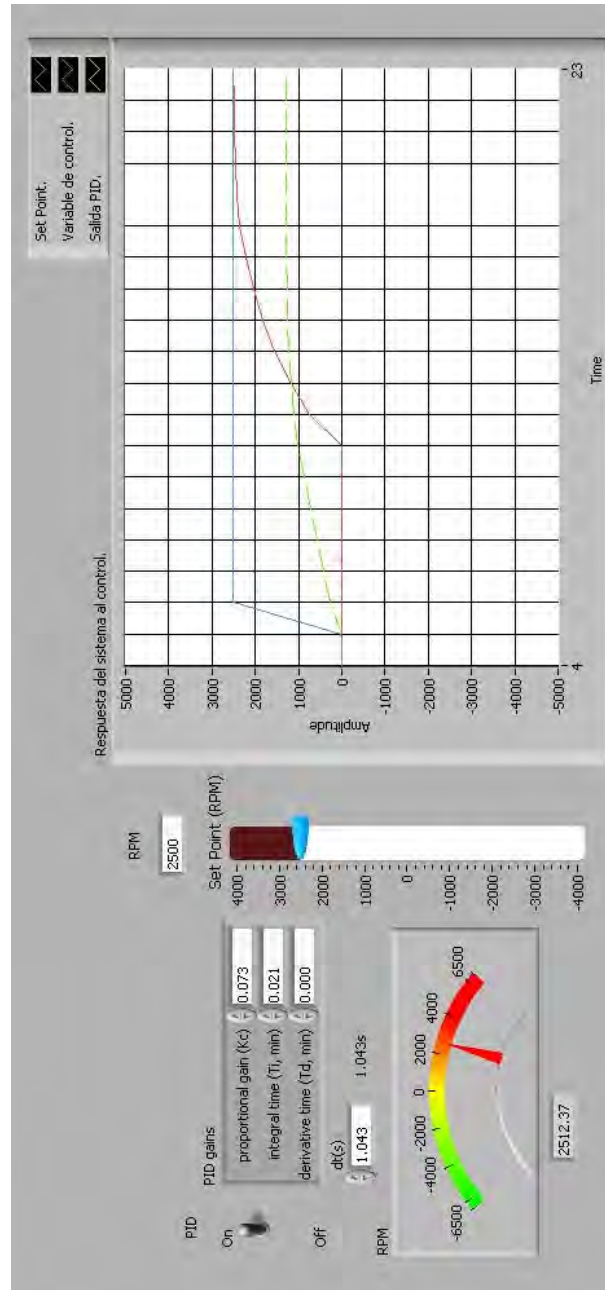


Figura 81: Sistema Sobreamortiguado

La función de transferencia corresponde a:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{142,8571}{s + 0,2857}$$

- Gráfica del sistema subamortiguado.

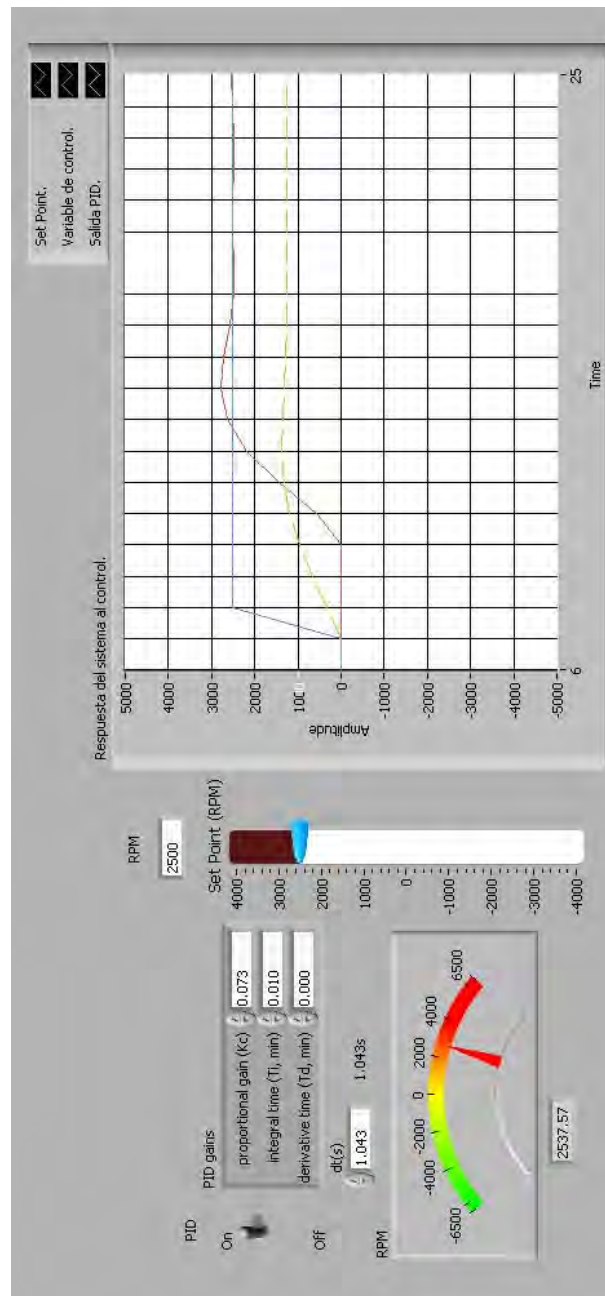


Figura 82: Sistema Subamortiguado

La función de transferencia corresponde a:

$$\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{0,2034}{s^2 + 0,5332s + 0,2034}$$

Explique los diferentes efectos que tienen cada una de las acciones de control K_C , t_i , t_d , en la respuesta del sistema.

- K_C : Es la ganancia, esta no puede ser aumentada al infinito ya que el sistema se hará inestable y comenzará a oscilar, entonces se aumenta hasta que la respuesta sea rápida sin oscilaciones.
- t_i : El tiempo integral es lo que ajusta la acción integral, aumenta la rapidez de la respuesta.
- t_d : El tiempo derivativo tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, pero amplifica las señales de ruido.

Presentar otra forma de sintonización de controladores PID , además de la manual.

Para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental Ziegler y Nichols definieron:

Reglas de Ziegler-Nichols.

De la planta se obtiene la respuesta experimental a una entrada escalón, si la respuesta posee un retardo tal que se forma una s , como se muestra en la figura 83.

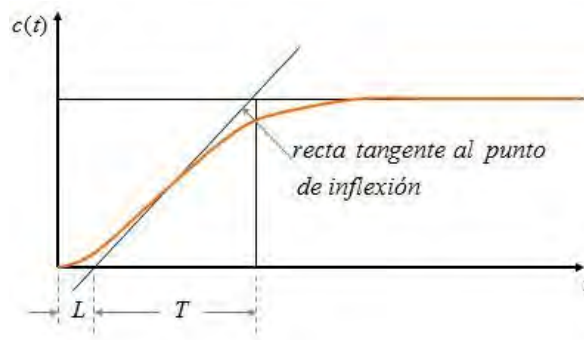


Figura 83: Curva experimental

Se pueden obtener los parámetros del controlador PID , la característica de esta respuesta con el tiempo de atraso L y la constante de tiempo T , puede aproximarse a un sistema de primer orden.

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

Se traza una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta del sistema, la intersección con el eje del tiempo y el valor final de la amplitud forman las distancias L y T , con estos se obtienen los parámetros del controlador PID utilizando la tabla de la figura 84.

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

Figura 84: Tabla de ganancias.

Explicar ¿Por qué un control PID es capaz de compensar cualquier perturbación cons-tante?

Porque al tener una acción derivativa mejora la respuesta transitoria y al tener una acción integral mejora el error en estado estable.

6. Apéndices.

6.1. Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.

6.1.1. Diferencias entre las tarjetas de adquisición de datos NI USB-6008 y NI USB-6009.

En el laboratorio de la asignatura de fundamentos de control de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se cuenta con dos tarjetas de adquisición de datos, la NI USB-6008 y la NI USB-6009, la figura 85 muestra las principales diferencias entre ambos tipos de tarjetas.

Feature	USB-6008	USB-6009
AI Resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI Sample Rate, Single Channel*	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI Sample Rate, Multiple Channels (Aggregate)*	10 kS/s	48 kS/s
DIO Configuration	Open collector	Open collector or active drive
* System dependent.		

Figura 85: Diferencias entre NI USB-6008 y NI USB-6009. Tomado de la guía de usuario y especificaciones USB-6008/6009.

6.1.2. Diagrama de bloques de la tarjeta NI USB-6008/6009.

El Diagrama de Bloques (Block Diagram)s de la figura 86 muestra los principales componentes funcionales de la tarjeta USB-6008/6009.

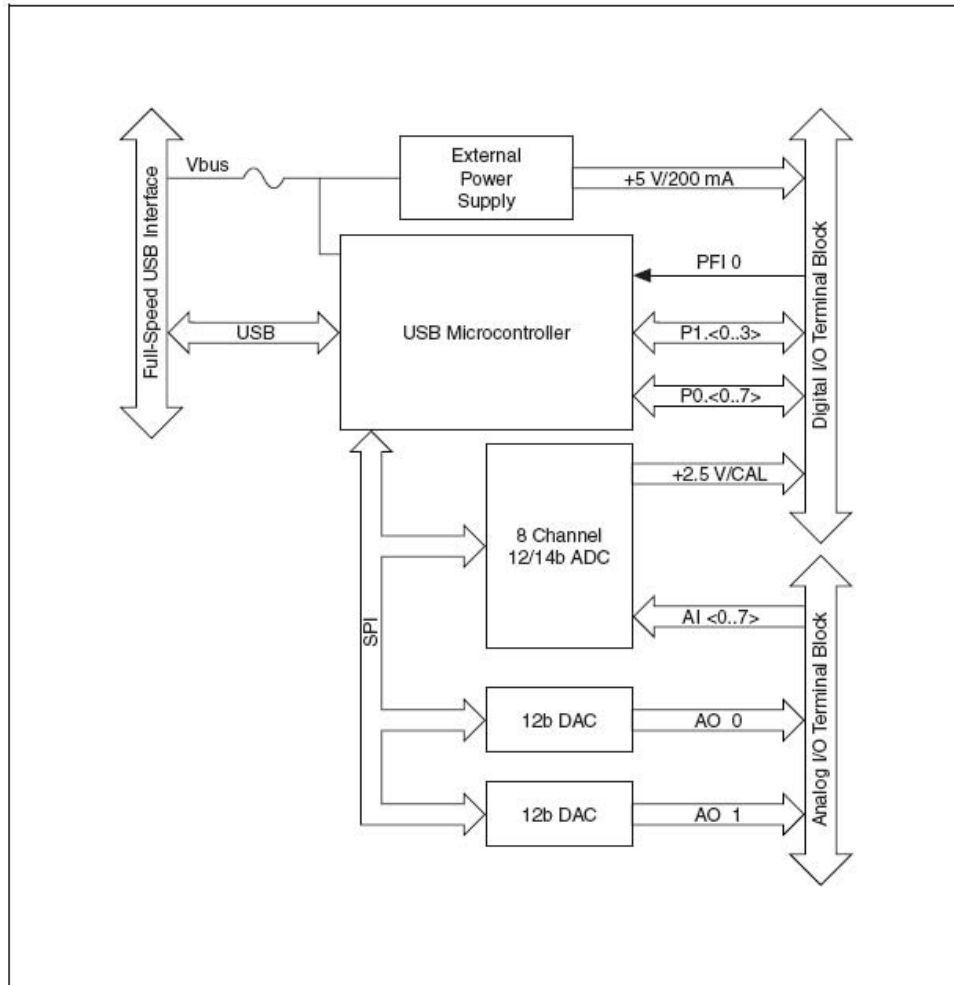


Figura 86: Diagrama de Bloques (Block Diagram)s de la tarjeta USB-6008/6009. Tomado de la guía de usuario y especificaciones USB-6008/6009.

6.1.3. Puertos digital y analógico de la tarjeta NI USB-6008/6009.

La tarjeta de adquisición de datos USB-6008/6009 cuenta con puertos digitales y analógicos, la figura 87 muestra la configuración de los pines del puerto analógico y la figura 88 muestra la configuración de los pines del puerto digital.

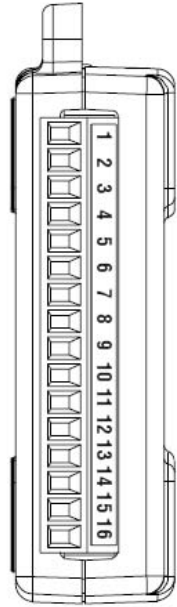
Module	Terminal	Signal, Single-Ended Mode	Signal, Differential Mode
	1	GND	GND
	2	AI 0	AI 0+
	3	AI 4	AI 0-
	4	GND	GND
	5	AI 1	AI 1+
	6	AI 5	AI 1-
	7	GND	GND
	8	AI 2	AI 2+
	9	AI 6	AI 2-
	10	GND	GND
	11	AI 3	AI 3+
	12	AI 7	AI 3-
	13	GND	GND
	14	AO 0	AO 0
	15	AO 1	AO 1
	16	GND	GND

Figura 87: Configuración del puerto analógico. Tomado de la guía de usuario y especificaciones USB-6008/6009.

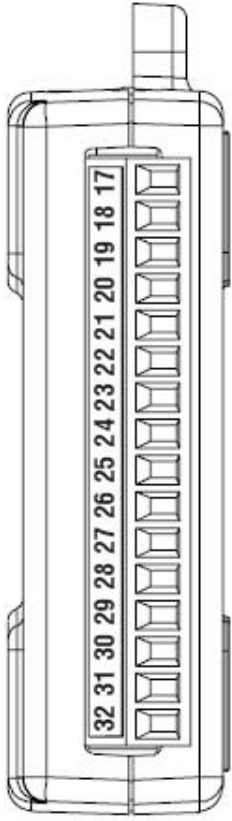
Module	Terminal	Signal
	17	P0.0
	18	P0.1
	19	P0.2
	20	P0.3
	21	P0.4
	22	P0.5
	23	P0.6
	24	P0.7
	25	P1.0
	26	P1.1
	27	P1.2
	28	P1.3
	29	PFI 0
	30	+2.5 V
	31	+5 V
	32	GND

Figura 88: Configuración del puerto digital. Tomado de la guía de usuario y especificaciones USB-6008/6009.

La figura 89 muestra la descripción de cada pin de la tarjeta USB-6008/6009.

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND			Ground —The reference point for the single-ended AI measurements, bias current return point for differential mode measurements, AO voltages, digital signals at the I/O connector, +5 VDC supply, and the +2.5 VDC reference.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: <AI 1, AI 5>, <AI 2, AI 6>, and <AI 3, AI 7>.
AO 0	GND	Output	Analog Channel 0 Output —Supplies the voltage output of AO channel 0.
AO 1	GND	Output	Analog Channel 1 Output —Supplies the voltage output of AO channel 1.
PI <0..3> PO <0..7>	GND	Input or Output	Digital I/O Signals —You can individually configure each signal as an input or output.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input.

Figura 89: Descripción de las terminales de la tarjeta USB-6008/6009. Tomado de la guía de usuario y especificaciones USB-6008/6009.

6.2. Acondicionamiento de señal.

El objetivo del acondicionamiento de señal es el de poder usar los módulos de presión y de posición-velocidad con la tarjeta de adquisición de datos *USB – 6009*. La tarjeta de adquisición de datos *USB – 6009*, en su entrada analógica, puede aceptar tensiones en el rango de $[-10V, 10V]$ si está trabajando en el modo referido a tierra, y si está trabajando en el modo diferencial, acepta tensiones en el rango de $[-20V, 20V]$ y corrientes de hasta $200mA$. La salida analógica de la tarjeta de adquisición de datos provee tensiones en el rango de $[0V, 5V]$ con corrientes de hasta $50mA$.

El módulo de presión requiere una entrada de tensión en el rango de $[0V, 10V]$, su sensor de presión entrega una tensión en el rango de $[0V, 8V]$, cuya equivalencia en Pascales es de $[0Pa, 200kPa]$. El módulo de posición-velocidad requiere de tensiones en el rango de $[-8V, 8V]$ de entrada para funcionar y la tensión que entrega su sensor de velocidad está en el rango de $[-8V, 8V]$, cuya equivalencia en revoluciones por minuto es de $[-4000RPM, 4000RPM]$. En ambos módulos la demanda de corriente es despreciable, sin embargo tienen requerimientos de voltaje distintos, por eso se diseñarán dos acondicionamientos de señal, uno para cada módulo.

6.2.1. Acondicionamiento de señal para el módulo de presión.

Para el módulo de presión se necesita un acondicionamiento que amplifique el rango de tensión de $[0V, 5V]$ a $[0V, 8V]$, para lograr esto se requerirá del amplificador operacional *LM358* configurado como amplificador de voltaje no inversor con ganancia de 1.6. Se eligió este amplificador operacional porque tiene dos amplificadores operacionales en cada encapsulado.

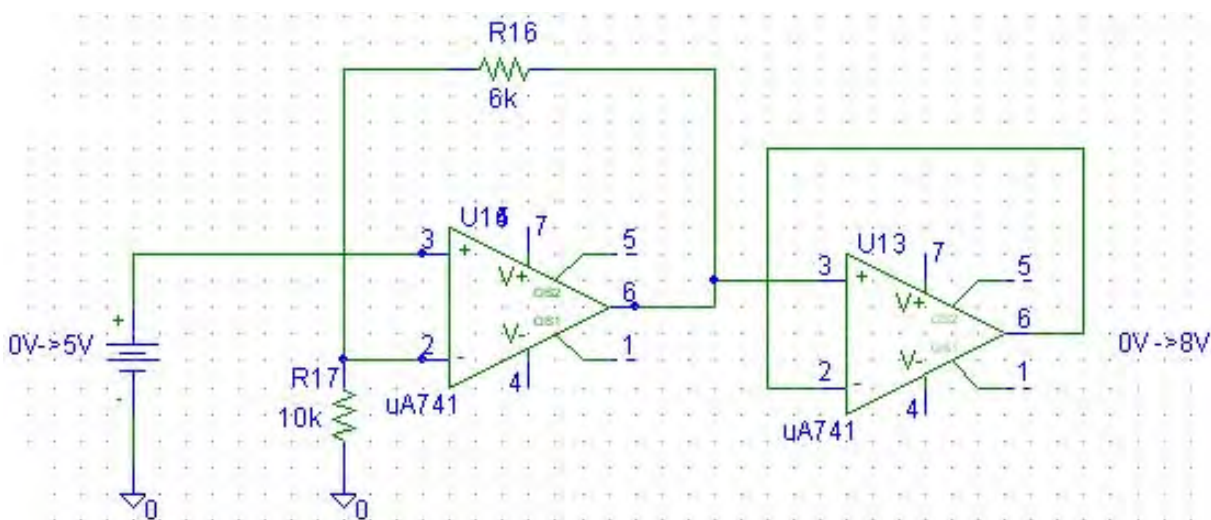


Figura 90: Amplificador de voltaje no inversor con seguidor de voltaje a la salida.

En la figura 90 se muestra el amplificador de voltaje con un seguidor de voltaje a su salida, esto para asegurar que el voltaje no se caerá del valor requerido entre $[0V, 8V]$.

6.2.2. Acondicionamiento de señal para el módulo de posición-velocidad.

El acondicionamiento de señal para el módulo de posición-velocidad requiere de varias etapas, ya que se necesita un rango de voltajes de $[-8V, 8V]$. Para lograr ese rango a partir del rango de voltajes de $[0V, 5V]$ se requieren las siguientes etapas:

1. Amplificar el rango de $[0V, 5V]$ a $[0V, 10V]$. Con un amplificador operacional configurado como amplificador de voltaje no inversor con una ganancia de 2. Su diagrama se muestra en la figura 91.

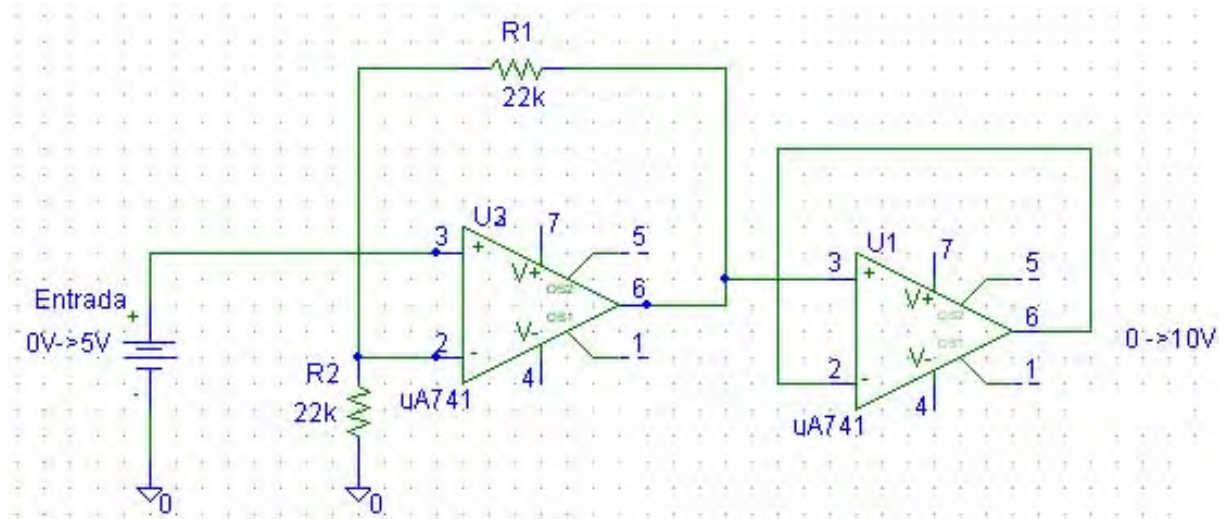


Figura 91: Amplificador de voltaje no inversor con seguidor de voltaje a la salida.

2. Obtener un voltaje constante de $-5V$ a partir de la fuente simétrica de alimentación. Se hace un divisor de voltaje con dos resistencias de $1k\Omega$ en serie entre $0V$ y $12V$ para obtener $6V$ en cada resistencia. Esos $6V$ se toman de una de las resistencias y se aplican a un amplificador operacional configurado como amplificador de voltaje inversor con ganancia de $0,813$, de esta manera se obtiene la constante de $-5V$. El diagrama se muestra en la figura 92.

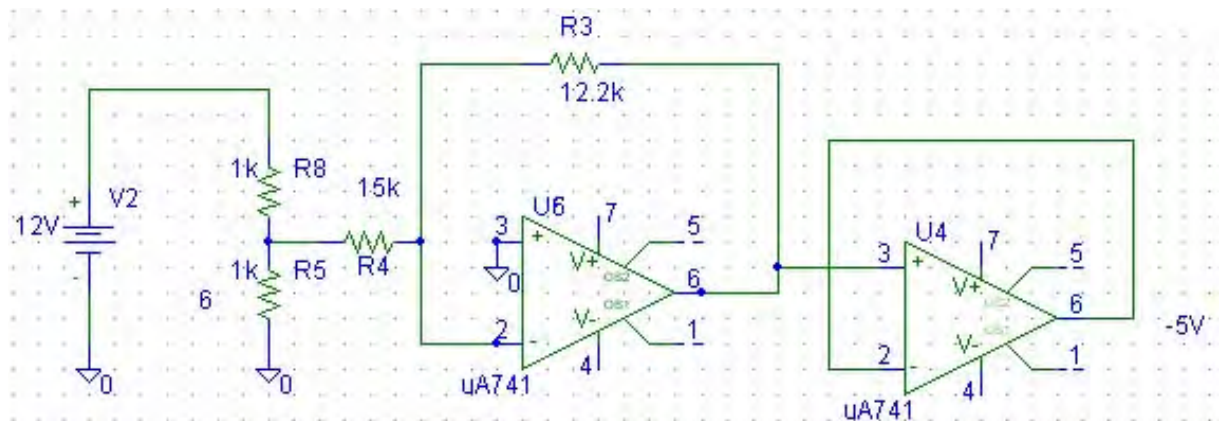


Figura 92: Amplificador de voltaje inversor con seguidor de voltaje a la salida.

3. Sumar el voltaje constante de $-5V$ al rango de $[0V, 10V]$ obteniendo así un rango de $[-5V, 5V]$. Para sumar estos dos voltajes, se usa el amplificador operacional configurado como amplificador sumador no inversor con ganancia unitaria. El diagrama se muestra en la figura 93.

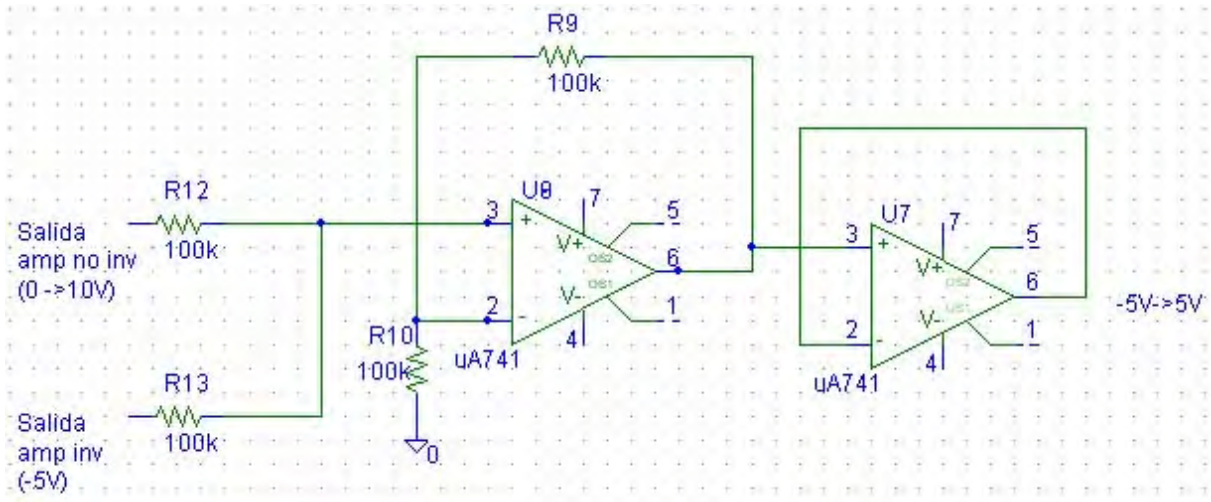


Figura 93: Amplificador sumador no inversor con seguidor de voltaje a la salida.

4. Multiplicar el rango de $[-5V, 5V]$ por una ganancia de 1,6 para obtener el rango de $[-8V, 8V]$. Esto se logra usando un amplificador operacional configurado como amplificador de voltaje no inversor con una ganancia de 1,6. El diagrama se muestra en la figura 94.

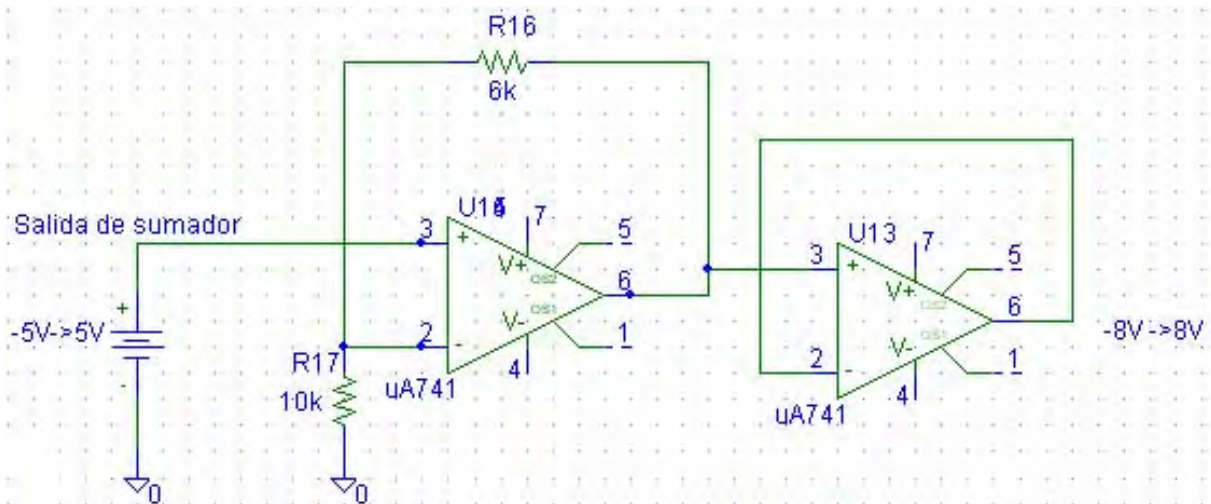


Figura 94: Amplificador no inversor con seguidor de voltaje a la salida.

El acondicionamiento para el módulo de posición-velocidad queda ensamblado todo junto como se muestra en la figura 95.

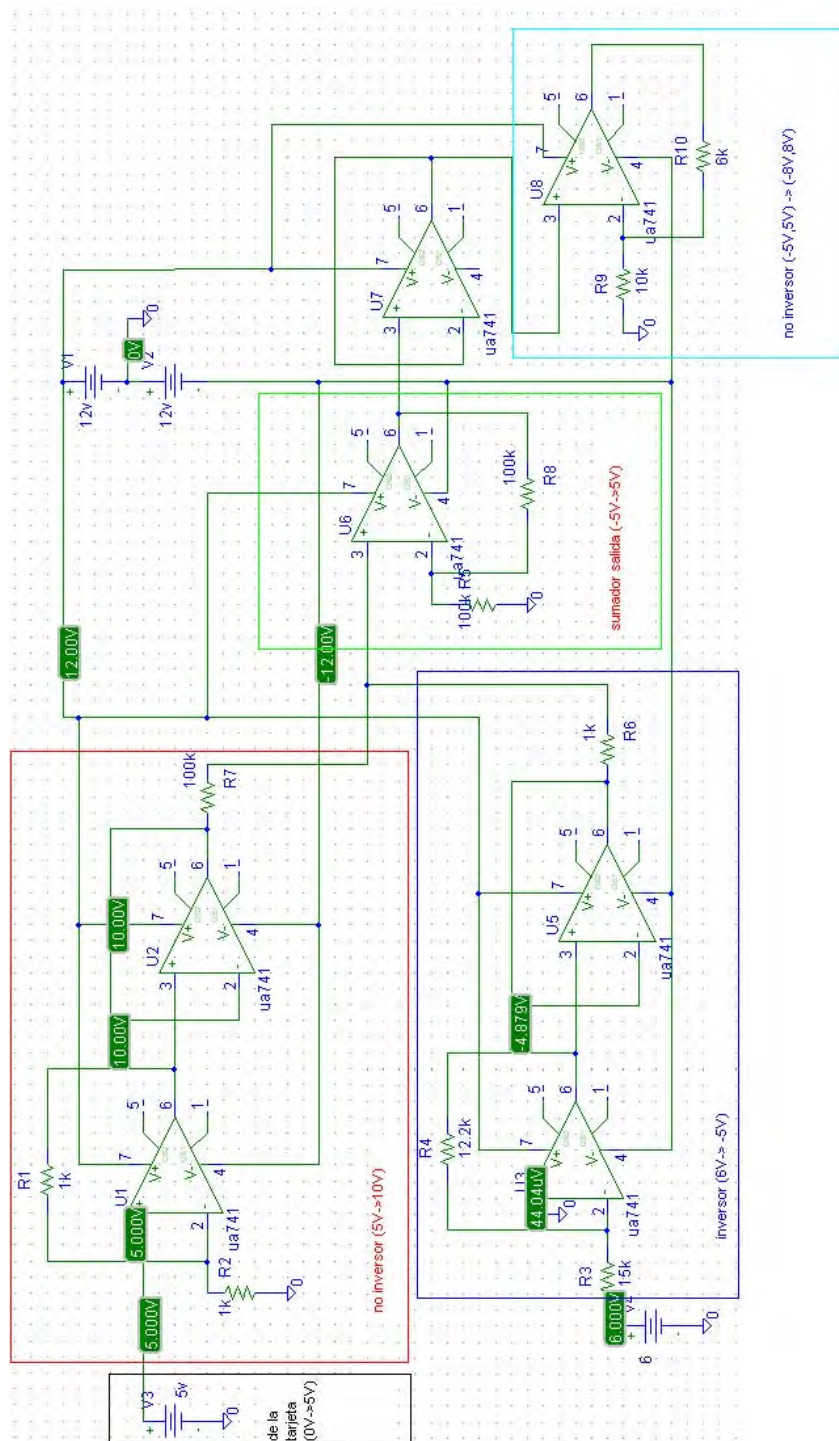


Figura 95: Acondicionamiento de señal para el módulo de posición-velocidad.

7. Prácticas.

7.1. Práctica 1 Módulo de presión.

7.1.1. Objetivos.

1. Conocer cada elemento del módulo *G35A/EV*, así mismo, la unidad exterior de generación de la magnitud física *TY35/EV*.
2. Utilizar los transductores de presión.
3. Entender los conceptos: lazo abierto, realimentación o *feedback*, estabilidad y los tipos de respuesta del sistema.
4. Conocer el funcionamiento de un *PID*.
5. Realizar la función de transferencia a partir de la respuesta transitoria.
6. Manejar la tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

7.1.2. Material a utilizar

- Fuente *PS1/EV*, figura 96.



Figura 96: Fuente de 24V y $\pm 12V$.

- Módulo de Presión *G36/EV*, figura 97.

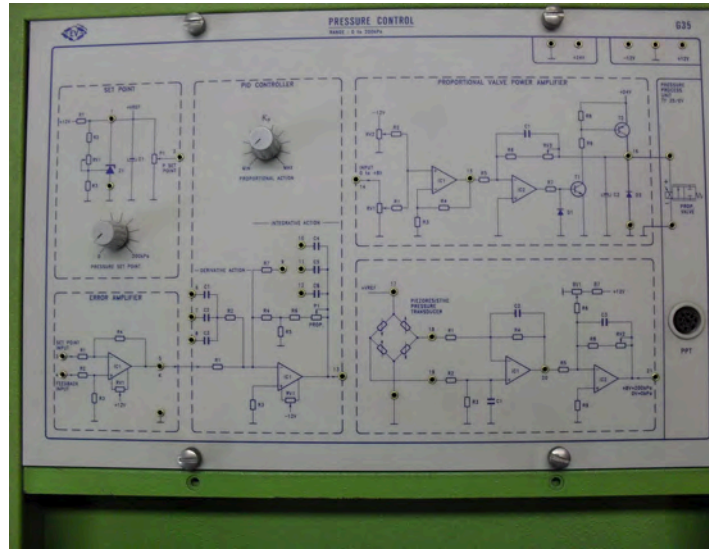


Figura 97: Módulo de Presión.

- Unidad Exterior de Generación de la magnitud física *TY36/EV*, figura 98.



Figura 98: Unidad exterior.

- Acondicionamiento de señal, figura 99.



Figura 99: Acondicionamiento de señal.

- Multímetro, figura 100.



Figura 100: Multímetro digital

- Juego de cables, figura 101.

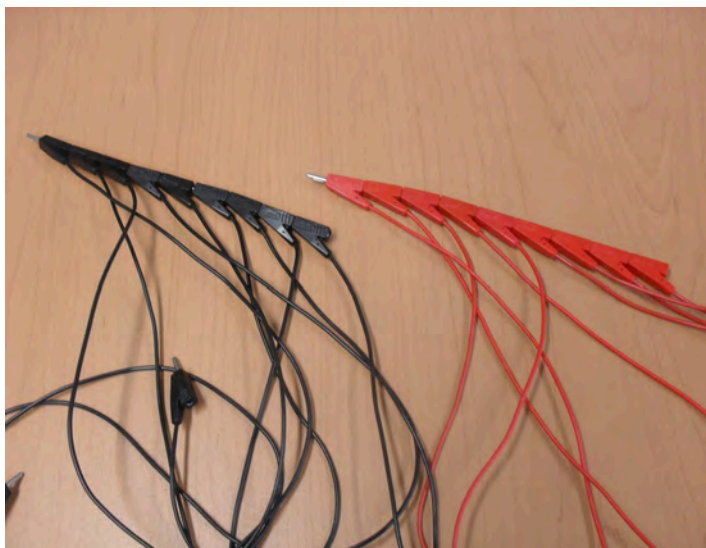


Figura 101: Cables

- Cable conexión DIN 8, figura 102.



Figura 102: Cable DIN 8.

- Cables de alimentación, figura 103.



Figura 103: Cable de alimentación

- Tarjeta USB-6009, figura 104.



Figura 104: Tarjeta de adquisición de datos.

7.1.3. Desarrollo.

Ajuste del equipo.

Conectar y encender la fuente, ajustar a cero el valor de la corriente, girar hasta que se encienda en indicador CV. Ajustar el voltaje a 24V. APAGAR LA FUENTE.

Conectar la tarjeta *USB – 6009* a la PC. Para verificar que está en perfectas condiciones, abrir el programa *National Instruments, Measurement* del escritorio, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 105.



Figura 105: My System-Measurement & Automation Explorer.

En la caja *Configuration*, elegir *My System/Devices and Interfaces/NI-DAQmx Devices*, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 106.

Dar click derecho sobre el dispositivo coloreado en verde de la pantalla para desplegar el menú y elegir *Test Panels* como se muestra en la figura 107.

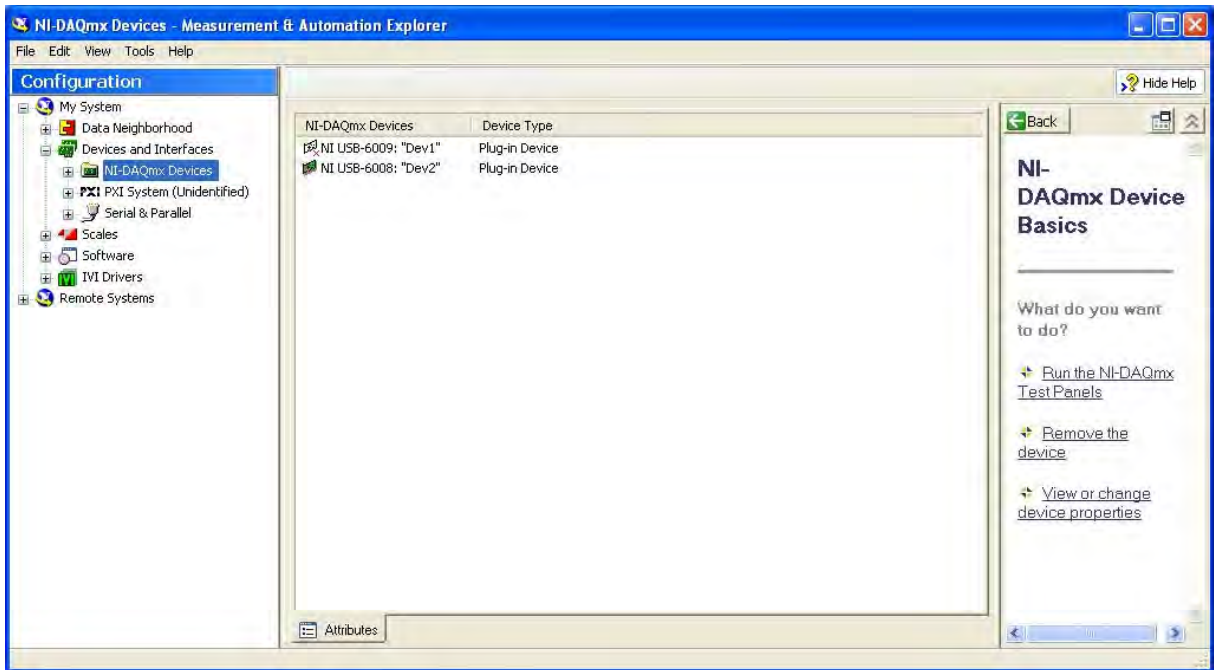


Figura 106: Configuración del sistema.

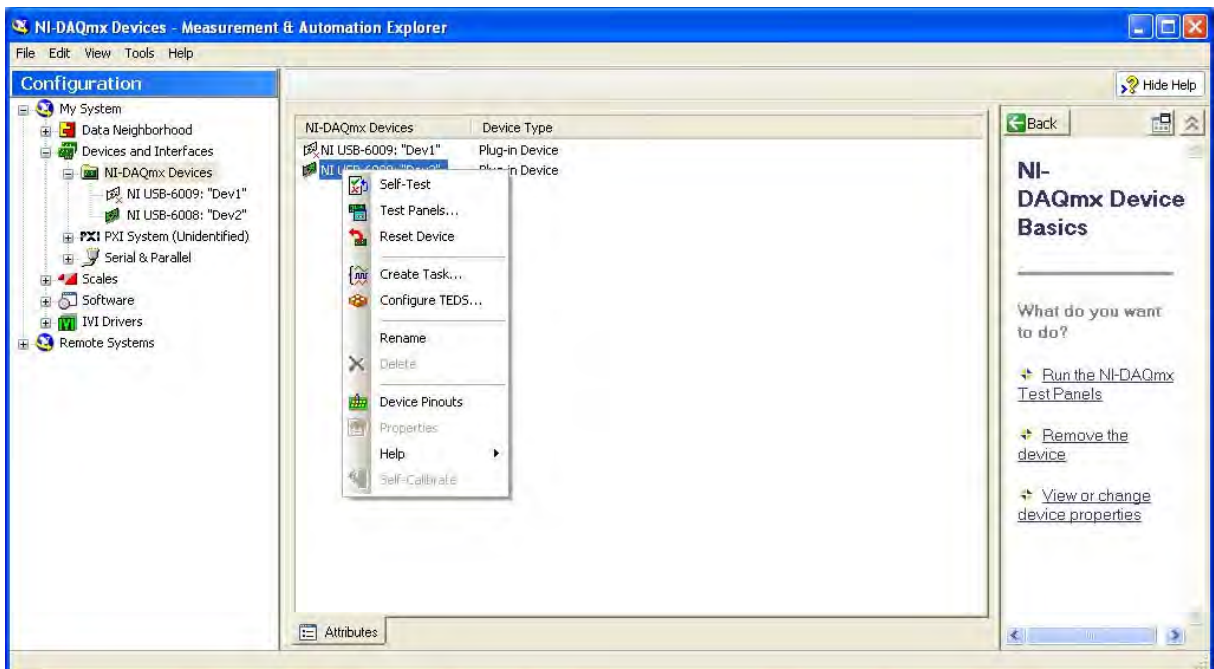


Figura 107: Menú del dispositivo NI USB-6009.

Se desplegará un menú con varias pestañas, pero sólo se utilizarán las pestañas *Analog Input*, *Analog Output*.

En *Analog Input* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como entrada.
- *Mode*, donde se establece la manera en que se adquirirán los datos
- *Input Configuration* donde se establece cómo operará la entrada. En modo diferencial se usa como referencia un nivel bajo distinto de la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-20V, 20V]$, en modo *RSE* se usa como referencia a la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-10V, 10V]$.
- *Max Input Limit* y *Min Input Limit* establecen los límites máximo y mínimo de tensión de entrada respectivamente.

Lo anterior se puede observar en la figura 108.



Figura 108: Pestaña Analog Input del menú Test Panels.

En *Analog Output* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como salida.
- *Mode* que establece la manera en que se enviarán los datos.
- *Max Output Limit* y *Min Output Limit* que establecen los límites máximo y mínimo de tensión de salida respectivamente.
- *Output Value* que es el valor que el *Test Panels* enviará a la salida escogida por el usuario.

Lo anterior se puede observar en la figura 109.

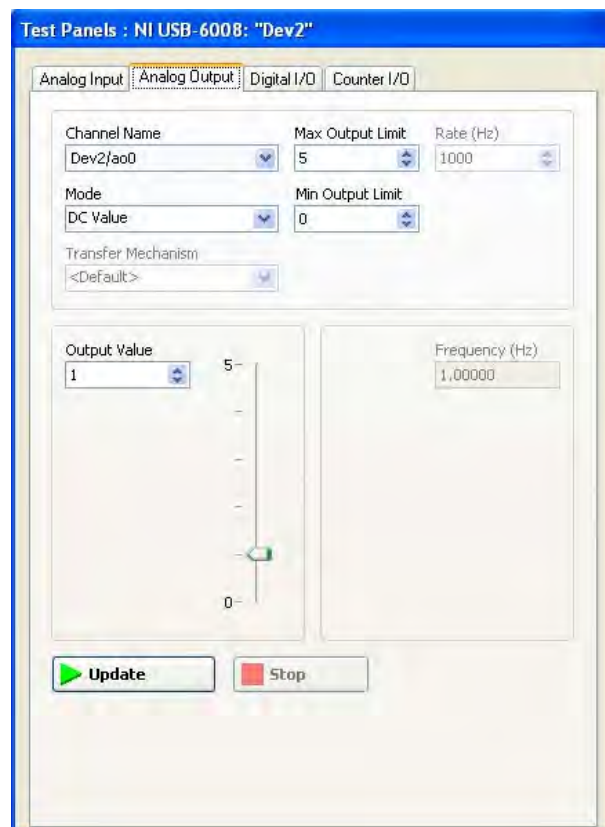


Figura 109: Pestaña Analog Output del menú Test Panels.

En la pestaña *Analog Input*, se usan los valores predeterminados y se da click en <Start>. Se observará una gráfica en la que el voltaje será 0V o tendrá un valor muy cercano a él. Si es así, significa que la tarjeta funciona bien, si da una lectura muy distinta de cero, significa que la entrada está dañada y habrá que elegir otra entrada y probarla de la misma manera.

En la pestaña *Analog Output* usar los valores predeterminados y en el campo *Analog Value* establecer un valor entre 0V y 5V de salida y medir el valor con el multímetro en el canal de salida seleccionado por el usuario. Si el valor medido con el multímetro corresponde al valor que el usuario estableció en el campo *Analog Value*, significa que el canal de salida funciona bien, si los valores son distintos por un valor muy grande, significa que ese canal de salida está dañado, habrá que elegir otro y probar de nuevo.

Conectar el equipo de la siguiente manera:

- Conectar los voltajes de polarización que se encuentran en la parte superior derecha del Módulo *G36/EV*.
- Conectar una entrada de la tarjeta *USB-6009* al borne 23 del módulo *G36/EV*.
- Conectar la salida del acondicionamiento al borne 18.
- Conectar los bornes 26 con 27 y 29 con el borne 30.
- Conectar el módulo *G36/EV* con la unidad exterior *TY36/EV* mediante el cable DIN 8.

Una vez comprobada la tarjeta de adquisición de datos, abrir LabVIEW 8.5 y buscar el programa en el escritorio de la PC *Presión*, la figura 110 muestra el panel frontal del programa. En la pantalla se observan los siguientes elementos:

- Set Point en *kP*
- Interruptor *ON – OFF*, que acciona el *PID*.
- Cuadro de ganancias del *PID*

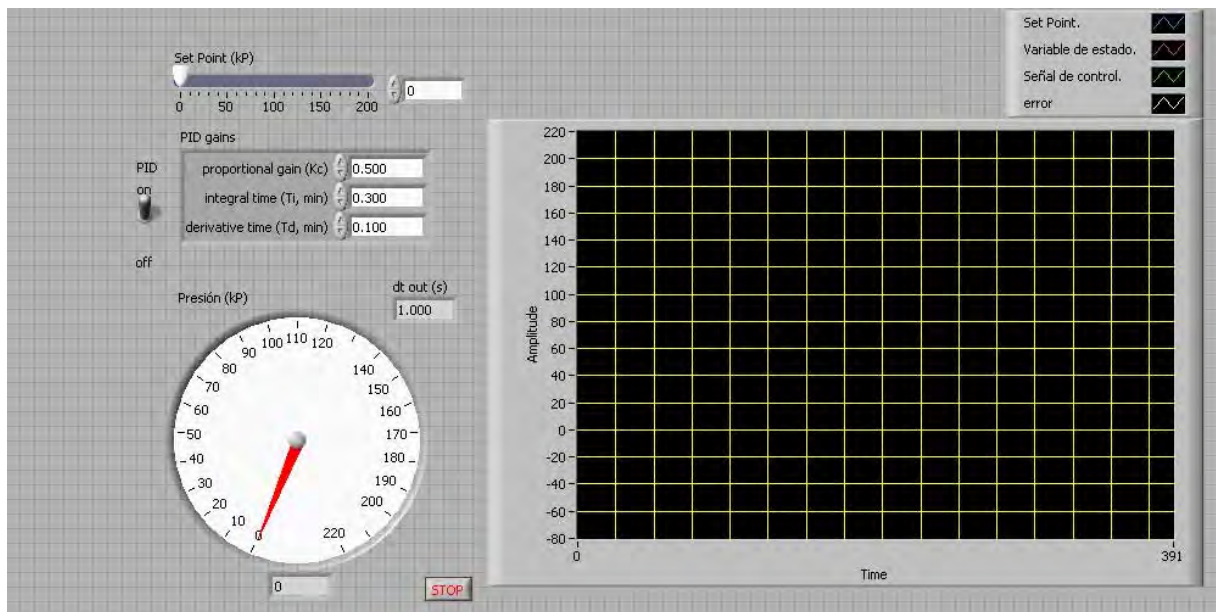


Figura 110: Panel Frontal del programa Posición- velocidad.

En la Unidad exterior de generación de la magnitud física *TY36/EV* se encuentra la válvula auxiliar 5b mostrada en la figura 111, que moveremos cuidadosamente en sentido antihorario, verificar que ésta sólo rota media vuelta.



Figura 111: Válvula manual 5b.

En el programa de *Presión* colocaremos el set point en $100kP$ como referencia. El interruptor en *ON*. Verificar que la válvula auxiliar 5b este cerrada.

7.1.4. Actividad 1 *Análisis de un Sistema Amortiguado*

. Para diseñar un control *PID* se utiliza el método manual de sintonización mediante ensayo y error, en los siguientes rangos:

$$0,047 \leq K_C \leq 0,052$$

$$0,295 \leq T_i \leq 0,305$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

El método consiste en:

- Aumentar la ganancia hasta que la respuesta a los cambios de consigna sea rápida, pero sin oscilación.
- Introducir el término integral, comenzando por un valor de T_i igual al tiempo de estabilización.
- Disminuir T_i para aumentar la rapidez de la respuesta, siempre y cuando no aparezca oscilación.
- Si se desea acción derivativa, comenzar con un valor de T_d igual a la tercera parte del retraso puro del sistema.
- Aumentar T_d hasta el valor máximo para el cual la respuesta no es oscilante. Intentar aumentar la ganancia.

Observar que la función de transferencia debe tener la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \dots (1)$$

7.1.5. Actividad 2 *Sistema Subamortiguado.*

Aplicar el método de la actividad anterior para obtener las constantes que satisfagan una respuesta rápida con sobrepaso, utilizando el rango:

$$0,995 \leq K_C \leq 1,005$$

$$0,045 \leq T_i \leq 0,055$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

Observar que la función de transferencia debe tener la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

7.1.6. Actividad 3 *Compensador*.

Utilizaremos la válvula *5b* mostrada en la figura 111 con el sistema subamortiguado. Abrir o cerrar esta válvula crea perturbaciones que el compensador debe eliminar. La válvula es muy sensible, por lo que debe accionarse sólo parcialmente. A este sistema se aplicará el controlador *PID* con las constantes obtenidas en la actividad anterior, mover la válvula *5b* ligeramente y observar en la gráfica que el control será capaz de compensar la señal. Así mismo cerrar la válvula y observar como compensa la perturbación.

7.1.7. Informe.

Llena la siguiente tabla

Ganancia	Sistema Sobreamortiguado	Sistema Subamortiguado
K_C		
t_i		
t_d		

Para todos los casos realizados en el trabajo hacer la Función de Transferencia y presentar la gráfica correspondiente indicando los parámetros necesarios.

Explique los diferentes efectos que tienen cada una de las acciones de control K_C , t_i , t_d , en la respuesta del sistema.

Presentar otra forma de sintonización de controladores PID, además de la manual.

Explicar ¿Por qué un control PID es capaz de compensar cualquier perturbación constante?

7.2. Práctica 2 Módulo de Posición-Velocidad.

7.2.1. Objetivos.

1. Conocer cada elemento del módulo *G36A/EV*, así mismo, conocer la unidad exterior de generación de la magnitud física *TY36/EV*.
2. Utilizar los transductores de velocidad.
3. Entender los conceptos: lazo abierto, realimentación o *feedback*, estabilidad y tipos de respuesta del sistema.
4. Conocer el funcionamiento de un *PID*.
5. Calcular la función de transferencia a partir de la respuesta transitoria.
6. Manejar la tarjeta de adquisición de datos USB-6009.

7.2.2. Material a utilizar.

- Fuente *PS1/EV*, ver figura 112.



Figura 112: Fuente de 24V y $\pm 12V$.

- Módulo de Posición-Velocidad *G36/EV*, ver figura 113.

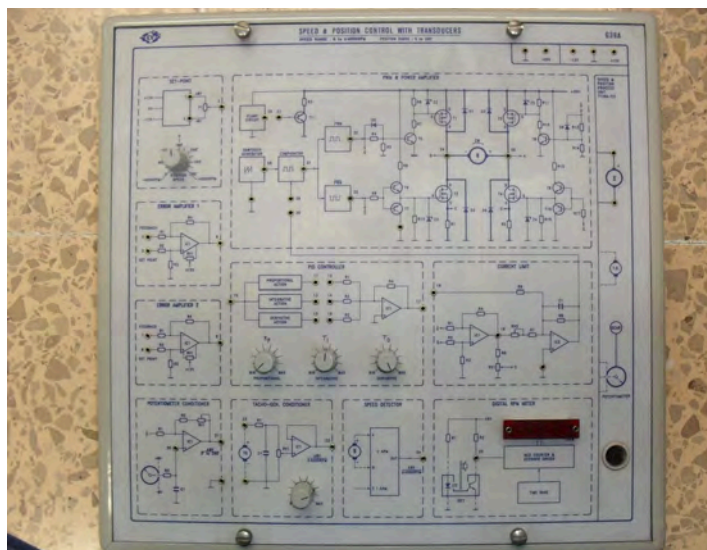


Figura 113: Módulo de Posición-Velocidad

- Unidad Exterior de Generación de la magnitud física *TY36/EV*, ver figura 114.

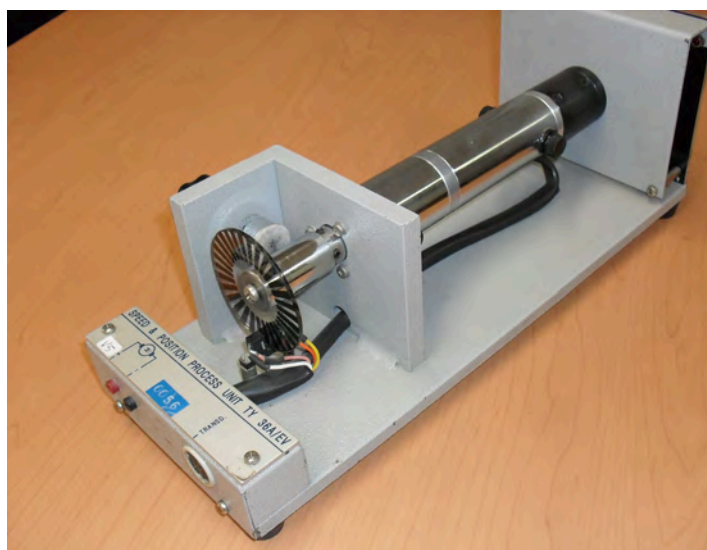


Figura 114: Unidad Exterior.

- Acondicionamiento de señal, figura 115.



Figura 115: Acondicionamiento de señal.

- Multímetro, ver figura 116.



Figura 116: Multímetro digital

- Juego de cables, ver figura 117.

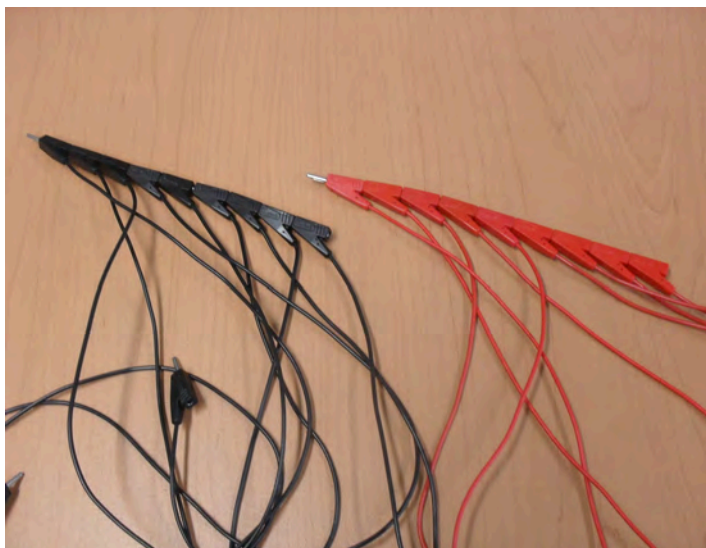


Figura 117: Cables

- Cable conexión DIN 8, ver figura 118.



Figura 118: DIN 8

- Cables de alimentación, ver figura 119.



Figura 119: Cable de alimentación

- Tarjeta USB-6009, ver figura 120.



Figura 120: Tarjeta.

7.2.3. Desarrollo.

Ajuste del equipo.

Conectar y encender la fuente, ajustar a cero el valor de la corriente, girar hasta que se encienda en indicador CV. Ajustar el voltaje a 24V. APAGAR LA FUENTE.

Conectar la tarjeta *USB – 6009* a la PC. Para verificar que está en perfectas condiciones, abrir el programa *National Instruments, Measurement* del escritorio, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 121.



Figura 121: My System-Measurement & Automation Explorer.

En la caja *Configuration*, elegir *My System/Devices and Interfaces/NI-DAQmx Devices*, aparecerá una pantalla como la mostrada en la figura 122.

Dar click derecho sobre el dispositivo coloreado en verde de la pantalla para desplegar el menú y elegir *Test Panels* como se muestra en la figura 123.

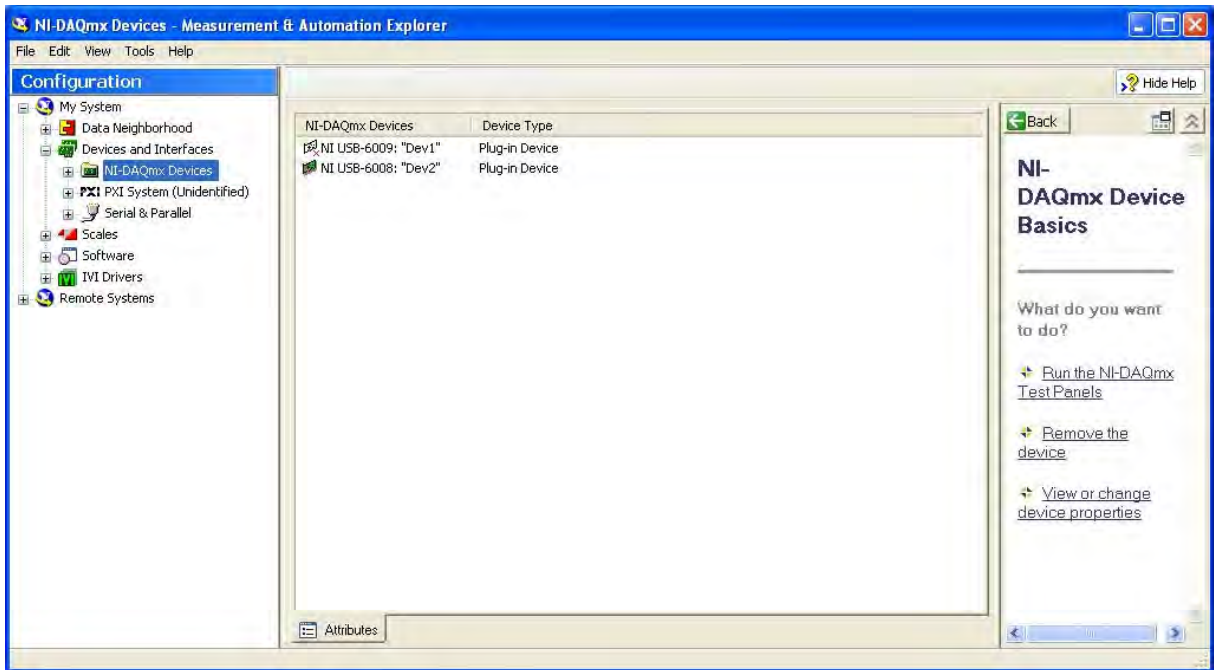


Figura 122: Configuración del sistema.

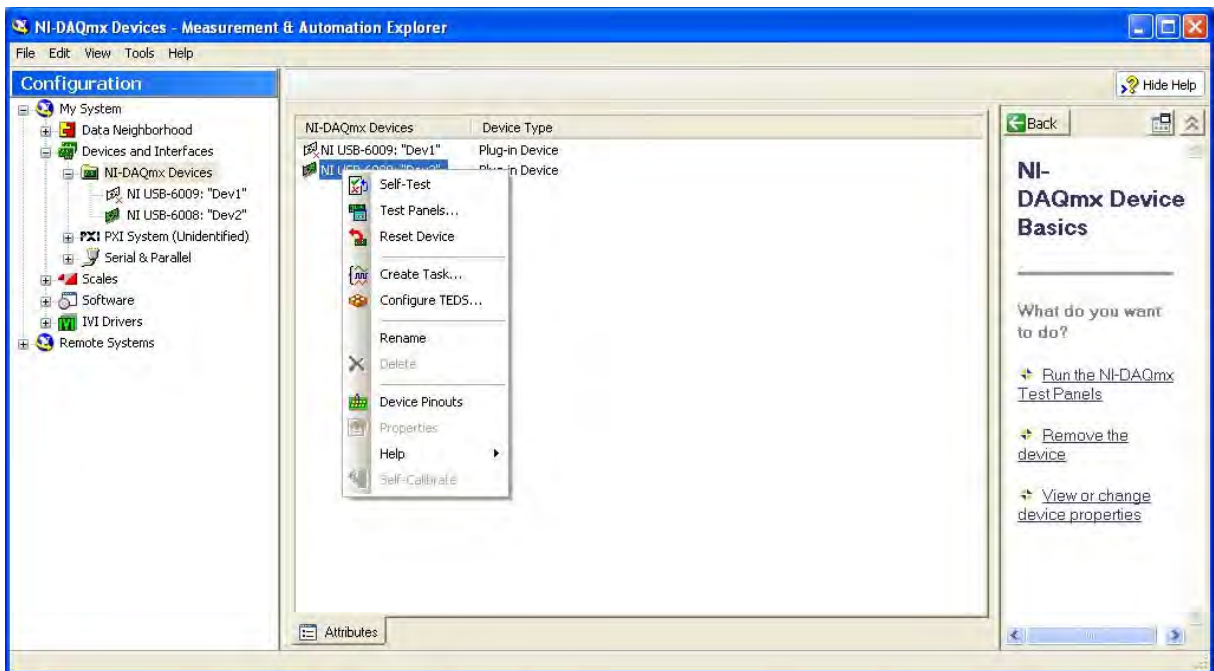


Figura 123: Menú del dispositivo NI USB-6009.

Se desplegará un menú con varias pestañas, pero sólo se utilizarán las pestañas *Analog Input*, *Analog Output*.

En *Analog Input* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como entrada.
- *Mode*, donde se establece la manera en que se adquirirán los datos
- *Input Configuration* donde se establece cómo operará la entrada. En modo diferencial se usa como referencia un nivel bajo distinto de la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-20V, 20V]$, en modo *RSE* se usa como referencia a la tierra física, permitiendo voltajes de entrada de $[-10V, 10V]$.
- *Max Input Limit* y *Min Input Limit* establecen los límites máximo y mínimo de tensión de entrada respectivamente.

Lo anterior se puede observar en la figura 124.



Figura 124: Pestaña Analog Input del menú Test Panels.

En *Analog Output* están las opciones:

- *Channel Name*, donde se escoge el canal que será usado como salida.
- *Mode* que establece la manera en que se enviarán los datos.
- *Max Output Limit* y *Min Output Limit* que establecen los límites máximo y mínimo de tensión de salida respectivamente.
- *Output Value* que es el valor que el *Test Panels* enviará a la salida escogida por el usuario.

Lo anterior se puede observar en la figura 125.

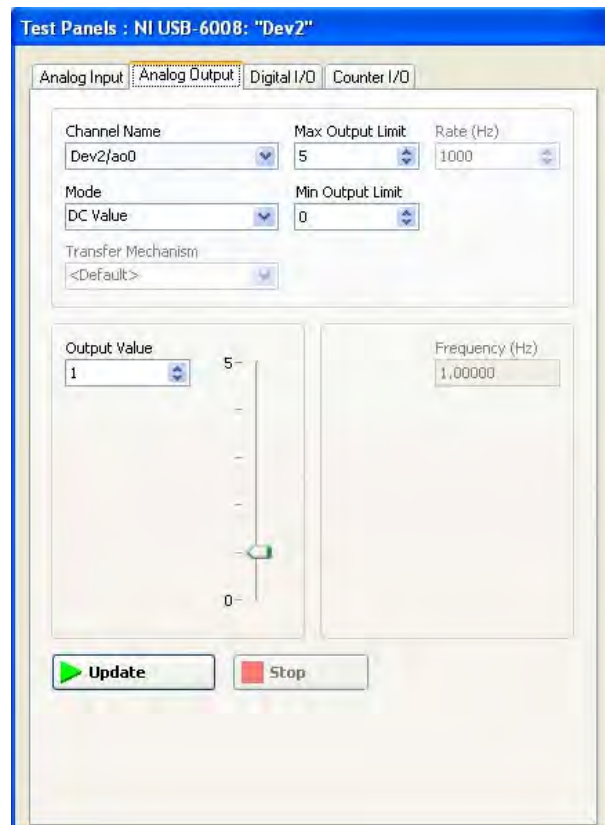


Figura 125: Pestaña Analog Output del menú Test Panels.

En la pestaña *Analog Input*, se usan los valores predeterminados y se da click en <Start>. Se observará una gráfica en la que el voltaje será 0V o tendrá un valor muy cercano a él. Si es así, significa que la tarjeta funciona bien, si da una lectura muy distinta de cero, significa que la entrada está dañada y habrá que elegir otra entrada y probarla de la misma manera.

En la pestaña *Analog Output* usar los valores predeterminados y en el campo *Analog Value* establecer un valor entre 0V y 5V de salida y medir el valor con el multímetro en el canal de salida seleccionado por el usuario. Si el valor medido con el multímetro corresponde al valor que el usuario estableció en el campo *Analog Value*, significa que el canal de salida funciona bien, si los valores son distintos por un valor muy grande, significa que ese canal de salida está dañado, habrá que elegir otro y probar de nuevo.

Conectar el equipo de la siguiente manera:

- Conectar los voltajes de polarización que se encuentran en la parte superior derecha del Módulo *G36/EV*.
- Conectar una entrada de la tarjeta *USB-6009* al borne 23 del módulo *G36/EV*.
- Conectar la salida del acondicionamiento al borne 18.
- Conectar los bornes 26 con 27 y 29 con el borne 30.
- Conectar el módulo *G36/EV* con la unidad exterior *TY36/EV* mediante el cable DIN 8.

Una vez comprobada la tarjeta de adquisición de datos, abrir LabVIEW 8.5 y buscar el programa en el escritorio de la PC *Posición-Velocidad*, la figura 126 muestra el panel frontal del programa. En la pantalla se observan los siguientes elementos:

- Set Point en *RPM*
- Interruptor *ON – OFF*, que acciona el *PID*.
- Cuadro de ganancias del *PID*

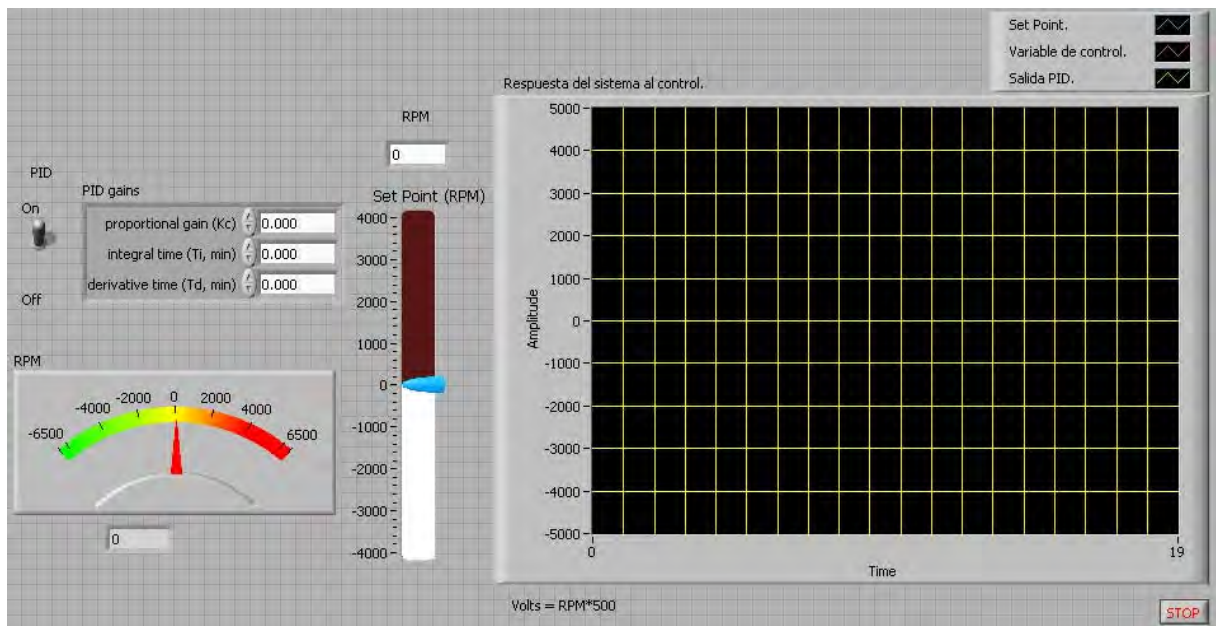


Figura 126: Panel Frontal del programa Posición- velocidad.

7.2.4. Actividad 1 *Lazo abierto*

Colocar el interruptor *PID* en <OFF> implica desconectar el control *PID* y dejar el sistema en lazo abierto. Aplicar una entrada escalón de 1200 *RPM* con el set point, y observar la gráfica que se obtiene.

***Parámetros del motor.**

Algunos de estos son proporcionados por el fabricante y se encuentran en el manual de usuario de la unidad *TY36A*, en las especificaciones del motor.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Tensión Nominal	v	24	V
Velocidad Nominal	ω	4000	RPM
Constante de Par	K_T	0,046	Nm/A
Resistencia	R	5,5	Ω
Momento de inercia rotórico	J	$5,18E^{-6}$	Kgm^2
Inductancia	L	2,8	mH

Cuadro 2: 1

Nota. Para hallar el valor de la constante de contra fem K_e , investigar la relación entre esta y la constante de par K_T .

7.2.5. Actividad 2 *Análisis de un Sistema Sobreamortiguado.*

Accionar el interruptor *PID* y aplicar una entrada escalón de 2500 *RMP*.

Para diseñar un control se utiliza el método manual de sintonización mediante ensayo y error, en los siguientes rangos:

$$0,069 \leq K_C \leq 0,076$$

$$0,019 \leq T_i \leq 0,022$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

El método consiste en:

- Aumentar la ganancia hasta que la respuesta a los cambios de consigna sea rápida, pero sin oscilación.
- Introducir el término integral, comenzando por un valor de T_i igual al tiempo de estabilización.
- Disminuir T_i para aumentar la rapidez de la respuesta, siempre y cuando no aparezca oscilación.
- Si se desea acción derivativa, comenzar con un valor de T_d igual a la tercera parte del retraso puro del sistema.
- Aumentar T_d hasta el valor máximo para el cual la respuesta no es oscilante. Intentar aumentar la ganancia.

7.2.6. Actividad 3 *Análisis de un Sistema Subamortiguado.*

Aplicar el mismo método para obtener las constantes que satisfagan una respuesta rápida con sobre paso, utilizando el rango:

$$0,069 \leq K_C \leq 0,076$$

$$0,095 \leq T_i \leq 0,013$$

$$0,000 \leq T_d \leq 0,003$$

7.2.7. Informe.

Llena la siguiente tabla

Ganancia	Sistema Sobreamortiguado	Sistema Subamortiguado
K_C		
t_i		
t_d		

Para todos los casos realizados en el trabajo calcular la función de transferencia y presentar la gráfica correspondiente.

Explique los diferentes efectos que tienen cada una de las acciones de control K_C , t_i , t_d , en la respuesta del sistema.

Presentar otra forma de sintonización de controladores PID, además de la manual.

Explicar ¿Por qué un control PID es capaz de compensar cualquier perturbación constante?

8. Bibliografía

Referencias

- [1] Kuo, Benjamin C. “Sistemas de control para ingeniería”. Prentice Hall, México, 1995.
- [2] Nise, Norman “Sistemas de control para ingeniería”. Cecsca, México, 2008.
- [3] Ogata, Katsuhiro “Ingeniería de control moderna”. Pearson, México, 1998.
- [4] Coughlin, Robert “Amplificadores operacionales y circuitos integrados li-neales”. Pearson, México, 1999.
- [5] Boylestad, Robert “Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos.”.Pearson, México, 2003.