



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL AUTOMÁTICO DE
FUERZA Y VELOCIDAD EN UN
TRIBÓMETRO COAXIAL**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Gibran Esaú Rivero Tapia

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rafael Schouwenaars Franssens



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

Agradecimientos

A mis padres, por el apoyo que me brindaron para poder concluir mis estudios académicos a nivel licenciatura.

Al Dr. Rafael Schouwenaars Franssens, por su apoyo, confianza y comprensión; permitiéndome trabajar con el tribómetro coaxial y desarrollar el presente trabajo.

A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), por el apoyo financiero recibido a través del proyecto PAPIIT IN114215.

Índice de contenido

Prefacio	i
-----------------	---

Capítulo 1 Antecedentes	1
--------------------------------	---

- 1.1 Tribómetro coaxial de la UDIATEM
- 1.2 Características de los ensayos con el tribómetro coaxial
- 1.3 Planteamiento del problema
- 1.4 Objetivos

Capítulo 2 Sistema de control PID	8
--	---

- 2.1 Sistema de control automático
 - 2.1.1 Sistemas de lazo abierto
 - 2.1.2 Sistemas de lazo cerrado
 - 2.1.3 Estabilidad
 - 2.1.4 Especificaciones en el dominio del tiempo
 - 2.1.5 Proceso de diseño para un sistema de control
- 2.2 El control PID
 - 2.2.1 Acción de control proporcional
 - 2.2.2 Acción de control integral
 - 2.2.3 Acción de control diferencial
 - 2.2.4 Sintonización del control PID

Capítulo 3 Sistema de control digital	25
--	----

- 3.1 El compensador PID digital
 - 3.1.1 Conversión analógica a digital y digital a analógica
 - 3.1.2 Eliminación del efecto windup
 - 3.1.3 Diagrama de flujo de programación del control PID digital

Capítulo 4 Control de fuerza	31
-------------------------------------	----

- 4.1 Control manual de carga
 - 4.1.1 Diagrama esquemático del sistema de control de carga
 - 4.1.2 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga en lazo abierto

- 4.2 Control automático de fuerza
 - 4.2.1 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga en lazo cerrado
 - 4.2.2 Implementación del sistema de control de carga en lazo cerrado
 - 4.2.3 Estabilidad del sistema de desplazamiento lineal
 - 4.2.4 Requerimientos y especificaciones para el control de carga
 - 4.2.5 Diagrama de bloques del sistema de control de carga en lazo cerrado
 - 4.2.6 Programación en LabVIEW
 - 4.2.7 Programación en el lenguaje de GalilTools

Capítulo 5 Control de velocidad

47

- 5.1. Control manual de velocidad
 - 5.1.1 Diagrama esquemático del control manual de velocidad
 - 5.1.2 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de velocidad en lazo abierto
- 5.2 Control automático de velocidad
 - 5.2.1 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de velocidad en lazo cerrado
 - 5.2.2 Implementación del control del servomotor rotatorio
 - 5.2.2.1 Acoplamiento del servomotor rotatorio
 - 5.2.3 Estabilidad del sistema de velocidad
 - 5.2.4 Requerimientos y especificaciones para el control de velocidad
 - 5.2.5 Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad en lazo cerrado
 - 5.2.6 Programación en ARDUINO UNO

Capítulo 6 Pruebas y resultados

64

- 6.1 Curvas de fuerza y velocidad obtenidas con el control automático
- 6.2 Análisis de resultados

Discusión

74

Conclusiones

78

Referencias

79

Prefacio

En el presente trabajo se explica la manera en que se implementó la técnica de control automático PID (Proporcional Integral Derivativo) a un sistema electro-mecánico llamado tribómetro coaxial, para dar solución al problema de control manual de fuerza y velocidad, los cuales son parámetros de entrada en los ensayos tribológicos, donde se tiene contacto y movimiento relativo sobre la muestra a evaluar, siendo la fricción y el desgaste los objetos principales de estudio.

En el primer capítulo se exponen las características y finalidad del tribómetro coaxial de la UDIATEM (Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales), sistema sobre el cual se trabajó. También se incluyen dos subcapítulos donde se indica el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, hipótesis, justificación y objetivos.

La información contenida en el segundo capítulo está dirigida a los conceptos y elementos básicos de un sistema de control PID, técnica propuesta para controlar de forma automática la fuerza y velocidad, para mantenerlos constantes durante el ensayo, ya que así lo establece el protocolo de ensayos con el tribómetro coaxial.

En el tercer capítulo, se señalan las consideraciones principales para llevar a cabo la implementación de un control PID en un controlador digital, el cual se encargará de manipular las variables involucradas (fuerza y velocidad), teniendo en cuenta que cada material se comporta de acuerdo a sus características y propiedades.

Para aplicar el control PID se requiere retroalimentación de la variable a controlar, por lo cual, es importante conocer la función de los elementos que integran al sistema de control de carga y al sistema de control de velocidad del tribómetro coaxial, comprender cómo es su proceso e identificar las variables involucradas. Es por ello que en el cuarto y quinto capítulo, primeramente se ve el estado actual del tribómetro coaxial de la UDIATEM, luego se presenta la propuesta de control con retroalimentación y se concluye con la implementación del control PID.

En el sexto capítulo se aprecian los resultados de tres ensayos tribológicos realizados con el control automático de fuerza y velocidad. Cabe resaltar que lo importante en tales resultados para este proyecto no es la interpretación ni el análisis del comportamiento y propiedades obtenidas del material ensayado, sino corroborar que las especificaciones en base a los requerimientos solicitados bajo el control automático se cumplan.

Después de los capítulos mencionados, se tiene una discusión de lo que se realizó y consiguió, así como de la continuidad que se puede tener en la mejora del proceso automatizado del tribómetro coaxial. Finalmente, luego de la discusión se comentan las conclusiones obtenidas del trabajo efectuado.

Capítulo 1 Antecedentes

1.1 Tribómetro coaxial de la UDIATEM

En los laboratorios de la UDIATEM (Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales) en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se desarrolló el tribómetro coaxial presentado en la Figura 1.1, para la realización de pruebas de fricción y desgaste en materiales.

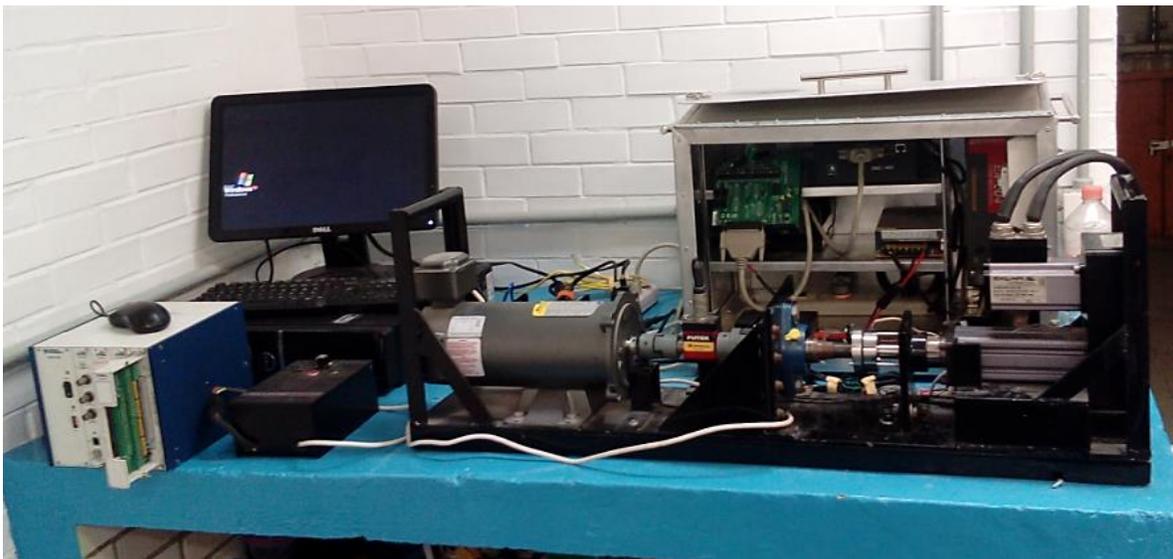


Figura 1.1 Tribómetro coaxial de la UDIATEM.

Se le conoce como tribómetro al prototipo o máquina encargado de realizar pruebas y simulaciones de fricción, desgaste y lubricación, donde hay interacción entre superficies en movimiento relativo, siendo estos los objetos principales de estudio en el campo de la tribología, midiendo en la medida de lo posible estos efectos en tiempo real [1]. La principal diferencia entre una máquina de desgaste y un tribómetro es que, en este último, se lleva a cabo un registro en tiempo real de las variables medibles durante el ensayo, mientras que, en la primera, sólo se observa el resultado final después de un tiempo preestablecido.

Recibe el nombre de tribómetro coaxial porque, como se puede ver en la Figura 1.2, el eje de rotación del perno de desgaste coincide con el eje de rotación del eje del motor al cual está acoplado [1].

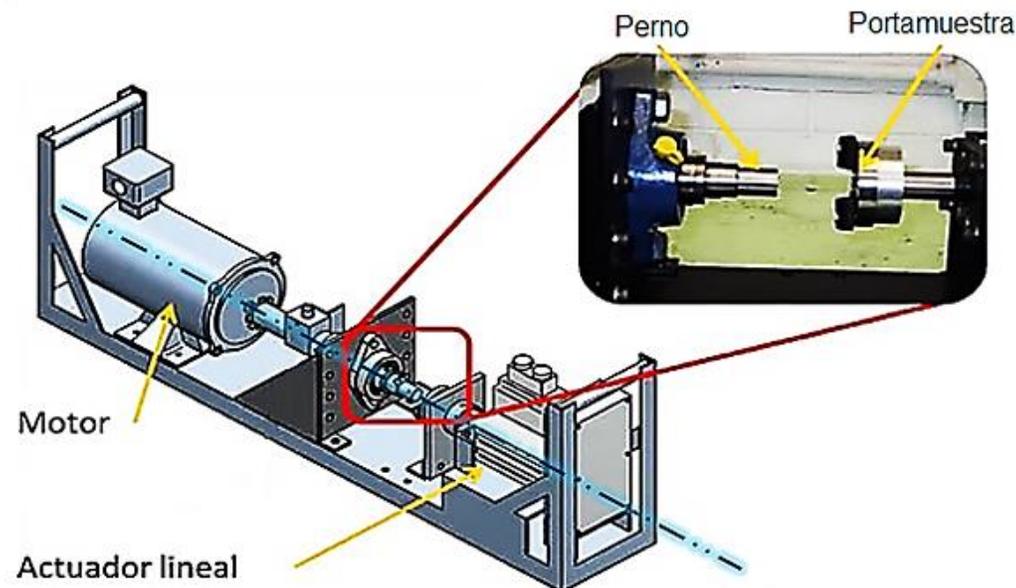


Figura 1.2 Configuración lineal del tribómetro coaxial [2].

El tribómetro coaxial tiene como finalidad evaluar la transformación que sufren los materiales dúctiles bajo condiciones de fricción en seco (como la generación de tribocapas) donde se hace presente la deformación plástica y así determinar los parámetros físicos que permitan la evaluación y selección de materiales adecuados para tales condiciones de desgaste. El material a evaluar es sometido a contacto y movimiento relativo, efecto de cargas axiales que sobrepasan ligeramente el esfuerzo de cedencia característico de cada material [3].

El tribómetro coaxial de la UDIATEM ha tenido un rediseño importante desde su primer diseño y construcción, consiguiendo desarrollar un sistema de investigación propio, confiable y práctico para llevar a cabo ensayos tribológicos con necesidades específicas y así obtener las propiedades pertinentes de los materiales a evaluar. Estas aportaciones, como las expuestas en las Figuras 1.3 y 1.4, han sido realizadas por ex alumnos y profesores de la UNAM.



Figura 1.3 Primer diseño y construcción del tribómetro coaxial de la UDIATEM realizado por los autores de [4].

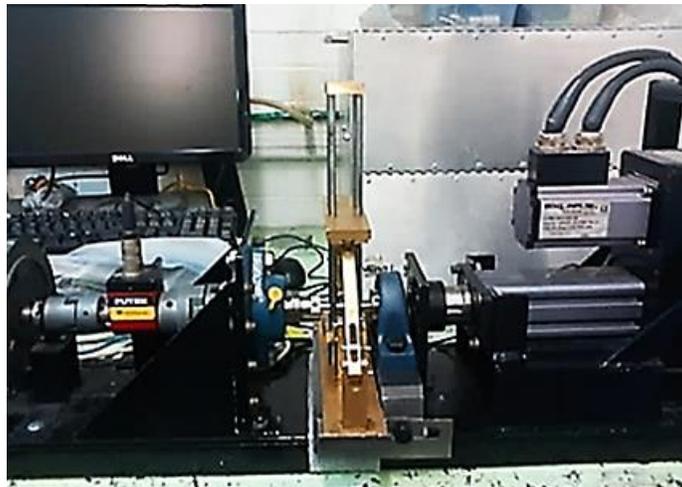


Figura 1.4 Primer rediseño del tribómetro coaxial realizado por el autor de [3] con la implementación del cilindro sobre bloque aportada por el autor de [5].

Varias publicaciones han sido realizadas haciendo uso del tribómetro coaxial de la UDIATEM, algunas de ellas se enlistan a continuación:

- Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante un ensayo de tribometría coaxial [6].
- Análisis de Al y Al-Sn ensayados en un tribómetro coaxial [3].
- Formación de una capa tribológica en la aleación SAE-783 [7].

- Modelado del efecto de la viscoplasticidad en un ensayo de tribometría coaxial [1].
- Modelado de la respuesta mecánica de multicapas dúctiles durante el ensayo en un tribómetro coaxial [8].
- Caracterización tribológica de fundiciones de CuMgSn mediante tribometría coaxial [9].
- Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción [10].
- Determinación del protocolo para la obtención de curvas stribeck en ensayo tribológico cilindro sobre bloque [5].

De aquí surgió la importancia y seguimiento de continuar trabajando con nuevas mejoras en el tribómetro coaxial, para enriquecer y contribuir a más aportaciones relacionadas a la evaluación y estudio de materiales en el ámbito de la tribología, pues en el campo de la ingeniería y de la industria, existen muchos casos en que los materiales están sometidos a situaciones de fricción (resistencia al movimiento que presenta un cuerpo sobre otro [5]) y por consecuencia a desgaste (fenómeno de remoción de material en la superficie debido a la interacción con una superficie de contacto [10]), donde se busca mejorar el desempeño de tales materiales, economizando su elaboración y pérdidas energéticas. Los parámetros generados a partir del ensayo tribológico determinan en gran medida el desempeño y la vida útil de elementos mecánicos en movimiento relativo [7]; como ejemplo de ello, los cojinetes de deslizamiento.

1.2 Características de los ensayos con el tribómetro coaxial

Para obtener resultados con exactitud, el protocolo de ensayo establece que es necesario que, desde que inicie hasta que termine el ensayo, se mantenga actuando sobre la pieza a evaluar un régimen de giro y carga (fuerza exterior que actúa sobre un cuerpo) constantes [3]; estos parámetros, los cuales están resaltados en la Figura 1.5, dependen del material a evaluar, ya que se debe tener mucho cuidado en la correlación de los valores tomados para la fricción y desgaste durante el tiempo que dure un determinado ensayo tribológico en un material que se quiera estudiar, así como tener precaución en la carga y velocidad aplicada a la muestra para poder controlar estos parámetros [1].

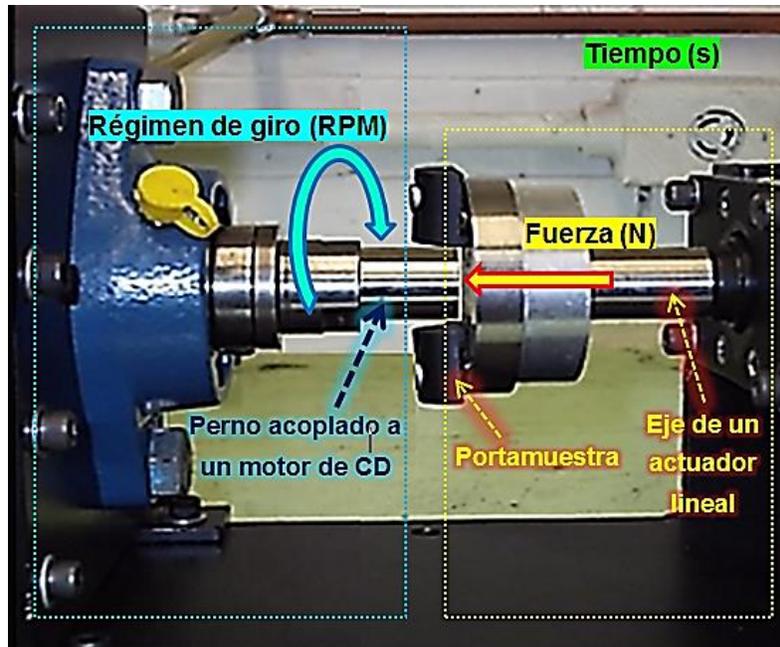


Figura 1.5 Régimen de giro, fuerza y tiempo, parámetros de entrada en los ensayos con el tribómetro coaxial.

La fricción y el desgaste son consecuencia de interacciones microscópicas entre las superficies deslizantes entre sí. Dichas interacciones son el resultado de las características geométricas y topográficas de las superficies en movimiento relativo [1]. Además, la fricción generada entre la muestra y el perno, es la principal perturbación externa en los ensayos tribológicos, por lo cual se requiere ajustar el régimen de giro y carga al valor deseado, manteniéndolos constantes lo mejor posible para obtener resultados con fidelidad.

Más adelante, en los Capítulos 4° y 5°, se verá con el debido detalle el proceso que se lleva a cabo para ejercer el control de velocidad y fuerza en el tribómetro coaxial, así como los elementos involucrados para lograr dicha tarea. Por lo tanto, de manera muy breve en cuanto a su operación, el sistema sujeta la muestra a evaluar, la cual entra en contacto con un perno ejerciéndose fuerza a compresión mientras se induce movimiento rotacional en dicho perno, donde primeramente se estabiliza la carga y luego se induce el movimiento rotacional [3]. La velocidad del perno se controla a través del giro de la perilla de un variador de velocidad de un motor de corriente directa. Por otro lado, la fuerza se controla mediante desplazamientos del eje de un actuador lineal, manipulando sus movimientos

haciendo uso de un controlador digital con el ingreso de comandos por software. En ambos ejes se cuenta con sensores para el régimen de giro, carga y torque (par de fuerza), pudiendo observar gráficamente en tiempo real tales mediciones, cuyos datos recopilados se guardan digitalmente para su posterior análisis. En la Figura 1.6, se indican los elementos del tribómetro coaxial que se han hecho alusión hasta el momento.

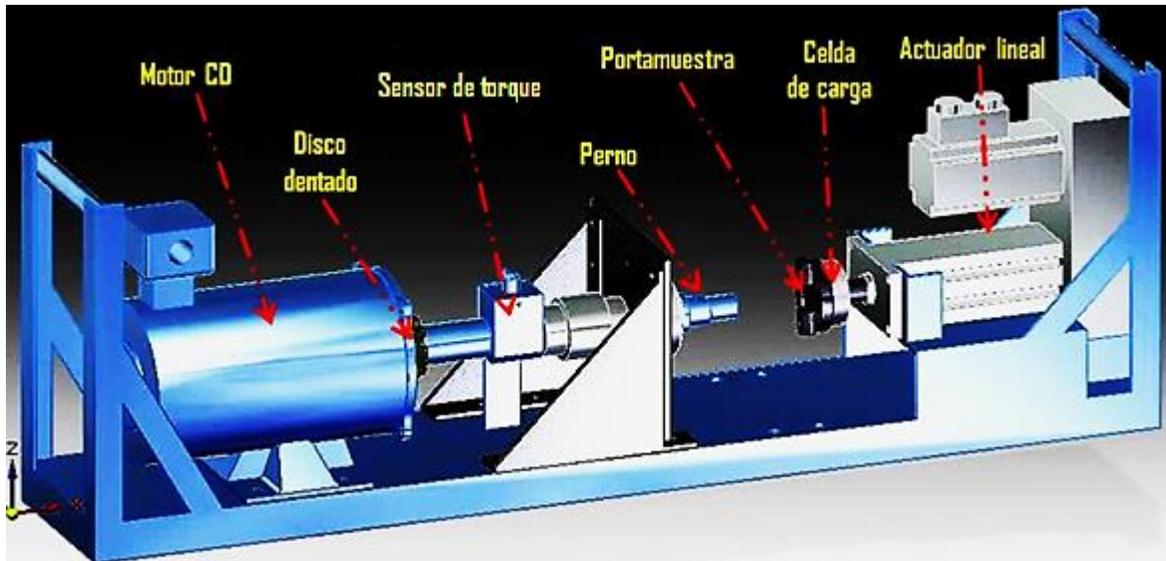


Figura 1.6 Elementos principales que conforman al tribómetro coaxial de la UDIATEM [3].

1.3 Planteamiento del problema

Al llevar a cabo ensayos en el tribómetro coaxial, el control de velocidad y fuerza se ejecutan de forma manual en el equipo antes de las mejoras implementadas en esta tesis. Esto hace que las veces que sea necesario, el operador tenga que ajustar la velocidad y fuerza al valor deseado durante el ensayo, ya sea girando la perilla del variador de velocidad y/o ingresando comandos en la computadora. Razón por la cual, el presente trabajo buscó dar solución a corto plazo al problema del control manual de fuerza y velocidad, aplicando e implementando una técnica de control automático, a la vez de plantear mejoras adicionales a mayor plazo.

De tal planteamiento, surge la siguiente pregunta de investigación: *¿Qué método de control automático junto con su implementación es el más conveniente de acuerdo a la naturaleza del sistema (tribómetro coaxial) para llevar y mantener constantes el régimen de giro y carga al valor deseado?* Cuya hipótesis es que, la implementación de la técnica de control automático PID, logrará llevar y mantener el valor de fuerza y velocidad al punto deseado. Teniendo como justificación la conveniencia de contar con un sistema de control automático para tener un mejor control de los parámetros de entrada y de las variables de salida, consiguiendo facilitar al operario realizar los ensayos con el tribómetro coaxial.

1.4 Objetivos

Los objetivos generales, son los siguientes:

- Lograr que durante el tiempo que dure el ensayo tribológico, tanto el régimen de giro como la carga se ajusten de forma automática a los valores deseados.
- Crear una interfaz gráfica para el control de los pasos o etapas del ensayo tribológico, así como para una mejor visualización de los parámetros y variables involucrados en dichos ensayos.
- Facilitar y agilizar aún más al operario la manera de llevar a cabo ensayos con el tribómetro coaxial.
- Plantear mejoras a largo plazo para el control automático fuerza y velocidad en el tribómetro coaxial.

Capítulo 2 Sistema de control PID

2.1 Sistema de control automático

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado [11]. En el caso de un sistema de control, este se encuentra formado por subsistemas y procesos (o plantas) unidos con el fin de controlar las salidas de los procesos, generando una salida o respuesta para una entrada o estímulo dado. A modo de la Figura 2.1, la entrada representa una respuesta deseada (lo que deseáramos que fuera la salida) y la salida es la respuesta real [12].



Figura 2.1 Entrada y salida de un sistema de control [12].

Una planta puede ser una parte de un equipo, como un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. Dicho de manera breve, la planta es cualquier objeto físico que se va a controlar. En cuanto al proceso, este involucra una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado [11].

Se pueden considerar cuatro razones básicas por las cuales se usan los sistemas de control [12]:

- Comodidad de forma de entrada
- Amplificación de potencia
- Compensación por perturbaciones
- Control remoto

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina *interna*, mientras que una perturbación *externa* se genera fuera del sistema y es una entrada [11]. Como se señala en las Figuras 2.4 y 2.5, las perturbaciones se muestran agregadas al controlador y a las salidas del proceso por medio de puntos suma, que dan la suma algebraica de sus señales de salida por medio de signos asociados.

Los sistemas de control son *dinámicos*, es decir, responden a una entrada al experimentar una respuesta transitoria antes de llegar a una respuesta en estado estable. Haciendo referencia a la Figura 2.2, después de la respuesta transitoria un sistema físico aproxima su respuesta en estado estable, que es su aproximación a la respuesta comandada o deseada [12].

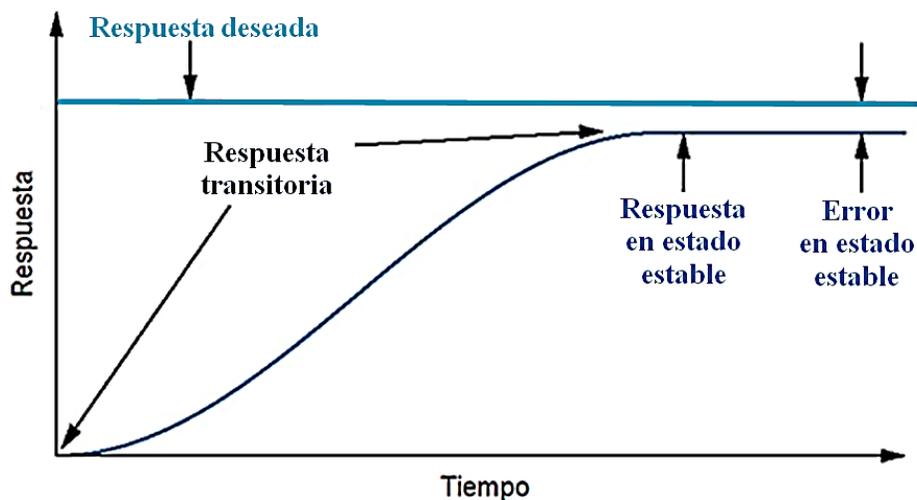


Figura 2.2 Respuesta dinámica de un sistema de control [12].

Tres objetivos principales hay del análisis y diseño de sistemas de control [12]:

- Manipular la respuesta transitoria
- Reducir el error en estado estable
- Alcanzar la estabilidad

Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado. La variable *controlada* es la cantidad o condición que se mide y controla. La

señal de control o variable *manipulada* es la cantidad o condición que el *controlador* modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema [11]. Un transductor convierte la forma de la entrada a la empleada por el controlador, mientras este último maneja un proceso o planta. [12].

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado), determina la desviación y produce una señal de control que reduce la desviación a cero o a un valor pequeño. La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina *acción de control*. El controlador detecta la señal de error, que por lo general, está en un nivel de potencia muy bajo, y la amplifica a un nivel lo suficientemente alto. La salida de un controlador automático se alimenta a un actuador (dispositivo de potencia que produce la entrada para la planta de acuerdo con la señal de control) a fin de que la señal de salida se aproxime a la señal de entrada de referencia. El sensor, o elemento de medición, es un dispositivo que convierte la variable de salida en otra variable manejable, que pueda usarse para comparar la salida con la señal de entrada de referencia. El punto de ajuste del controlador debe convertirse en una entrada de referencia con las mismas unidades que la señal de realimentación del sensor o del elemento de medición [11]. Los elementos mencionados que integran a un sistema de control automático, se muestran a continuación en la Figura 2.3.

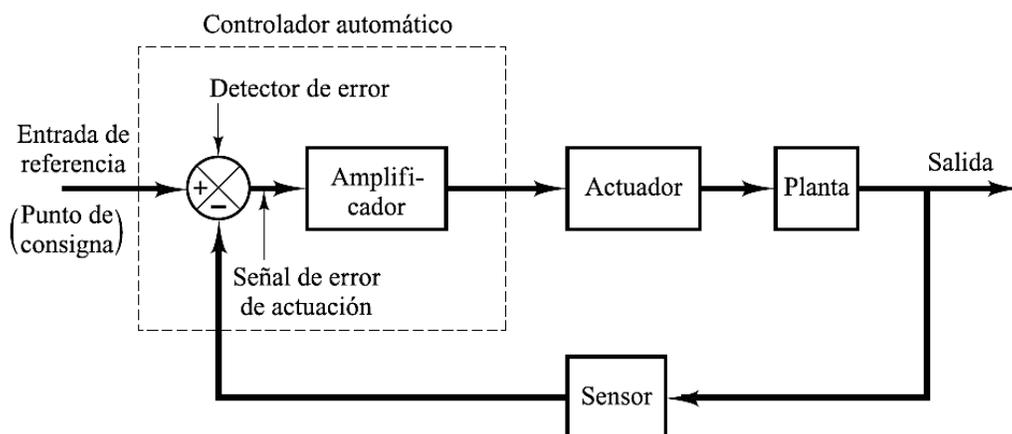


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema de control industrial, formado por un controlador automático, un actuador, una planta y un sensor (elemento de medición) [11].

Dentro de los sistemas de control se tienen dos categorías [12]:

- Sistemas de lazo abierto
- Sistemas de lazo cerrado

2.1.1 Sistemas de lazo abierto

Los sistemas de lazo abierto son sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control. En éstos sistemas no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada [11]. El diagrama de bloques básico de un sistema de lazo cerrado se muestra en la Figura 2.4.

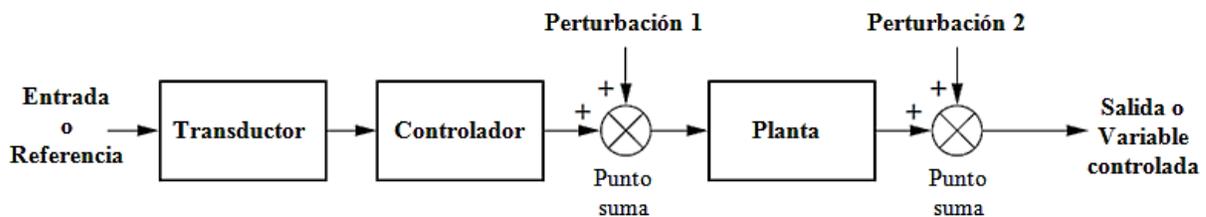


Figura 2.4 Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto [12].

Debe señalarse que, para los sistemas en los que se conocen con anticipación las entradas y en los cuales no hay perturbaciones, es aconsejable emplear un control en lazo abierto. Sin embargo, las desventajas fundamentales de los sistemas de control en lazo abierto son las siguientes [11]:

- Las perturbaciones y los cambios en la calibración originan errores, y la salida puede ser diferente de lo que se desea. Se comandan por la entrada.
- Para mantener la calidad requerida en la salida, es necesaria la recalibración de vez en cuando.

2.1.2 Sistemas de lazo cerrado

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina *sistema de control con retroalimentación* o denominado también sistema de *control de lazo cerrado* [11]. El sistema de lazo cerrado compensa perturbaciones al medir la respuesta de salida, alimentando esa medida a una trayectoria de retroalimentación y comparando esa respuesta con la entrada del punto suma. En la retroalimentación, la señal de salida se resta con la señal de entrada, dando como lugar a la señal de actuación o error, provocando que el controlador cambie su señal de control. Si hay una diferencia entre las dos respuestas, el sistema acciona la planta, por medio de una señal de actuación, para hacer la corrección. Si no existe diferencia, el sistema no acciona la planta, puesto que la respuesta de la planta ya es la respuesta deseada [12]. En la Figura 2.5, se puede ver la trayectoria de retroalimentación con sus signos asociados.

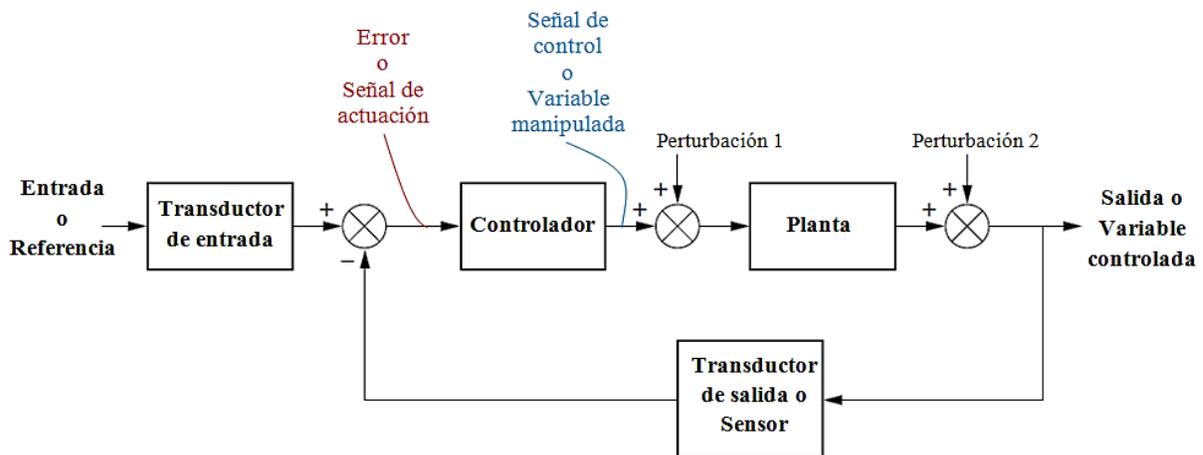


Figura 2.5 Diagrama de bloques de un sistema con retroalimentación, o bien, de lazo cerrado [12].

La respuesta transitoria y error en estado estable se pueden controlar en forma más cómoda y con mayor flexibilidad en los sistemas de lazo cerrado, aunque son más complejos y costosos que los de lazo abierto [12]. Los sistemas de control en lazo cerrado tienen ventajas cuando se presentan perturbaciones y/o variaciones impredecibles en los

componentes del sistema, donde la ventaja es que el uso de la retroalimentación vuelve la respuesta del sistema relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema [11].

2.1.3 Estabilidad

La estabilidad es la especificación más importante de un sistema. Si un sistema es inestable, la respuesta transitoria y los errores en estado estable son puntos debatibles, pues no se puede diseñar un sistema inestable para un requerimiento específico de respuesta transitoria o de error en estado estable [12].

La respuesta total de un sistema es la suma de la respuesta libre y la respuesta forzada [12]:

- Una respuesta libre describe la forma en que el sistema disipa o adquiere energía.
- La respuesta forzada depende de la entrada.

Para un sistema lineal e invariante con el tiempo (sistema donde la salida es siempre la misma ante una misma entrada, sin importar el instante de tiempo en el que se aplica dicha entrada), se tienen las siguientes definiciones [12]:

- Un sistema es *estable* si la respuesta libre tiende a cero, a medida que el tiempo tiende al infinito.
- Un sistema es *inestable* si la respuesta libre tiende al infinito, a medida que el tiempo tiende al infinito.
- Un sistema es *marginalmente estable* si la respuesta libre ni decae ni crece, sino que permanece constante u oscila.

En algunos sistemas puede ser difícil separar la respuesta libre de la respuesta forzada. Una definición alternativa de estabilidad tomando la respuesta total BIBO es [12]:

- Un sistema es *estable* si toda entrada acotada produce una salida acotada. Por lo tanto, un sistema es *inestable* si existen entradas acotadas que produce una salida no acotada.

Tomando en cuenta lo anterior, para que un sistema lineal e invariante con el tiempo sea útil para ser controlado, debe cumplir con alguno de los siguientes puntos [12]:

- ✓ La respuesta libre debe finalmente aproximarse a cero, dejando solo la respuesta forzada; o bien, oscilar.
- ✓ Su respuesta libre debe decaer a cero a medida que el tiempo se aproxima al infinito.
- ✓ Si toda entrada acotada produce una salida acotada.

Al diseñar un sistema de control, se debe ser capaz de predecir su comportamiento dinámico a partir del conocimiento de los componentes. Si se asegura la estabilidad absoluta en lazo abierto, el diseñador cierra el lazo y prueba el comportamiento del sistema en lazo cerrado [12].

Con frecuencia, las características de estabilidad y desempeño de un sistema de control se especifican en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón, puesto que esta es fácil de generar y es suficientemente drástica. Si se conoce la respuesta a una entrada escalón, es matemáticamente posible calcular la respuesta para cualquier entrada. La respuesta transitoria de un sistema para una entrada escalón depende de las condiciones iniciales. Por conveniencia, como se indica en la Figura 2.6, es una práctica común usar la condición inicial estándar de que el sistema está en reposo al inicio, por lo cual la salida y todas las derivadas con respecto al tiempo son cero [11].

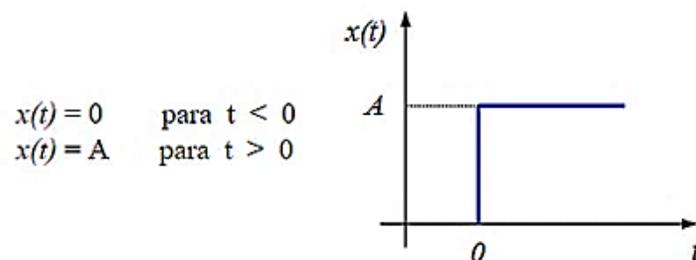


Figura 2.6 Función escalón.

2.1.4 Especificaciones en el dominio del tiempo

En muchos casos prácticos, las características de desempeño deseadas del sistema de control se especifican en términos de cantidades en el dominio del tiempo. Estas especificaciones son importantes, ya que casi todos los sistemas de control son sistemas en el dominio del tiempo, es decir, deben presentar respuestas de tiempo aceptables. Esto significa que el sistema de control debe modificarse hasta que la respuesta transitoria sea satisfactoria [11].

Los sistemas que pueden almacenar o disipar energía no responden instantáneamente y presentan respuestas transitorias cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones. La respuesta transitoria de un sistema de control práctico muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario [11]. En la Figura 2.7 se muestran los parámetros de tiempo principales que puede tener un transitorio con oscilaciones amortiguadas en la respuesta de un sistema de control, que a su vez son parte de las especificaciones de diseño.

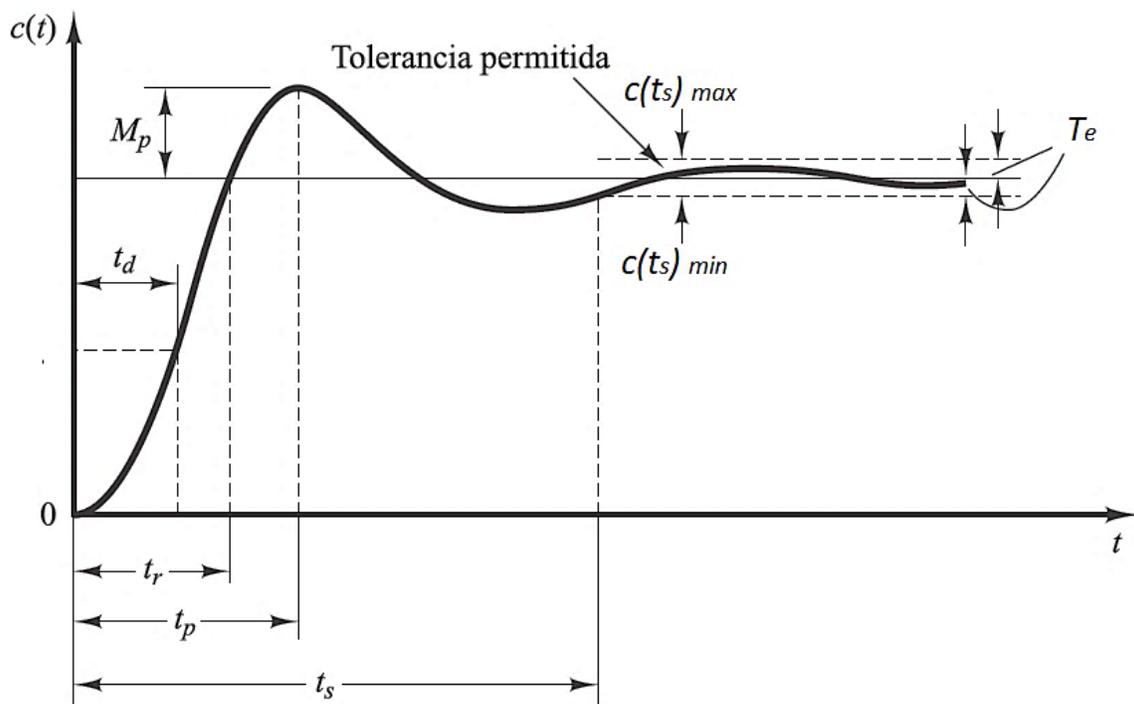


Figura 2.7 Respuesta transitoria de un sistema de control que presenta oscilaciones amortiguadas antes de llegar al tiempo de asentamiento [11].

La descripción de los parámetros en dominio del tiempo de la Figura 2.7 se tiene a continuación [11]:

- **Tiempo de retardo, t_d :** es el tiempo requerido para que la respuesta alcance por primera vez la mitad del valor final.
- **Tiempo de subida, t_r :** tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90% (para sistemas sobreamortiguados) o del 0 al 100% (para sistemas subamortiguados de segundo orden) de su valor final.
- **Tiempo pico, t_p :** es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobrepaso.
- **Sobrepaso máximo, M_p :** es el valor pico máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la referencia. Es común usar el porcentaje de sobrepaso máximo, donde:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} 100\% \quad (2.1)$$

- **Tiempo de asentamiento, t_s :** es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 o 5%). A partir de haberse cumplido el tiempo de asentamiento, se llega al estado estable.
- **Tolerancia permitida, T_e :** Es el umbral conformado por un límite máximo y un límite mínimo, dentro de los cuales puede mantenerse el valor de la variable a controlar una vez llegando al estado estable. En otras palabras, es la tolerancia al error en estado estable.

2.1.5 Proceso de diseño para un sistema de control

Para problemas de diseño rutinarios, las especificaciones de comportamiento (las cuales relacionan la precisión, la estabilidad relativa y la velocidad de respuesta) se proporcionan en términos de valores numéricos precisos. En otros casos, se ofrecen una parte en términos cuantitativos y otra parte en términos de planteamientos cualitativos. En este último caso, puede ser necesario modificar las especificaciones durante el proceso del diseño, ya que es

posible que las especificaciones dadas nunca se cumplan (debido a que los requisitos producen conflictos) o conduzcan a un sistema muy costoso [11]. Con el uso de requerimientos, se determinan las especificaciones de diseño, como la respuesta transitoria deseada y la precisión en estado estable.

En la Figura 2.8 se muestra el proceso de diseño que propone el autor de [12], mismo que se usó en éste proyecto para el diseño del control automático de fuerza y velocidad en el tribómetro coaxial.

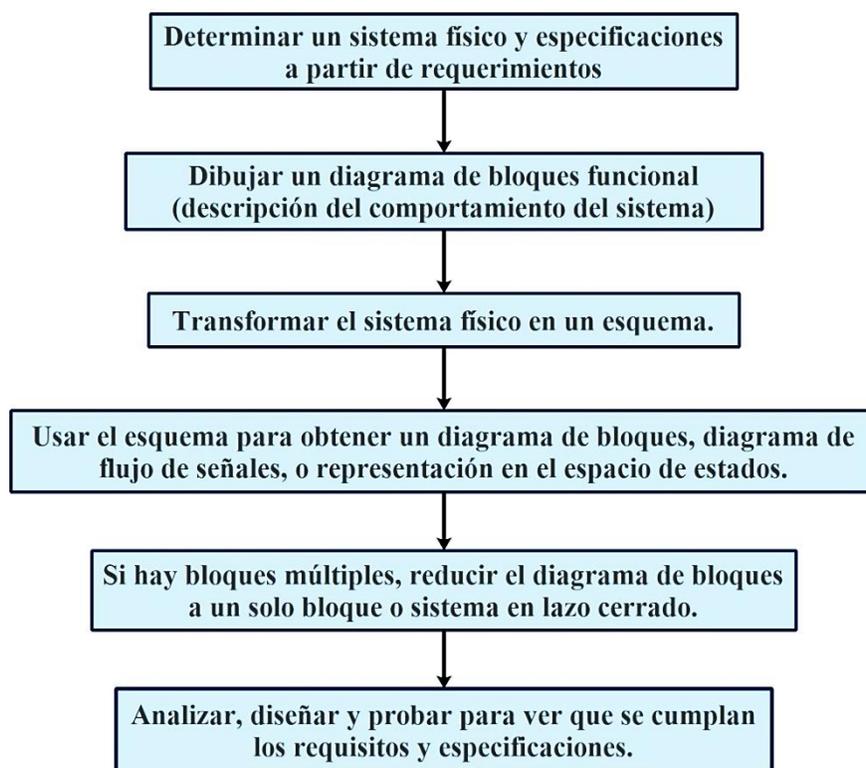


Figura 2.8 Proceso de diseño de un sistema de control [12].

Cabe mencionar que, siendo alternativa de los controladores analógicos basados en amplificadores operacionales, la mayoría de los controladores actuales son del tipo digital, los cuales son sistemas basados en un microprocesador que ejecuta software digital [13]. En tales controladores digitales se programa una serie de algoritmos para poder ejecutar la *ley de control* (operaciones matemáticas para la manipulación de las variables involucradas

en el sistema de control, es decir, para calcular la salida de control requerida para llevar al sistema al estado deseado) [14]. A su vez, la ley de control forma parte de un compensador, el cual modificará la dinámica del sistema para que se satisfagan especificaciones determinadas. Un elemento insertado en el sistema para satisfacer las especificaciones se denomina *compensador*, quien modifica el comportamiento deficiente del sistema original [11].

2.2 El control PID

Más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado [11]. El éxito de los resultados del control PID está reflejado en su simplicidad, robustez y aplicabilidad [15].

Un control PID está compuesto por un compensador que contiene tres elementos para su operación: proporcional, integral y derivativo. Recalcando que el *error* se define como: $error = valor\ deseado - valor\ medido$, a continuación se tiene la descripción de los elementos que conforman el acrónimo PID [16]:

- Elemento **P**: Proporcional al error en el instante t , que es el error "presente".
- Elemento **I**: Proporcional a la integral del error hasta el instante t , que puede ser interpretado como la acumulación del error "pasado".
- Elemento **D**: Proporcional a la derivada del error en el instante t , que se puede ser interpretado como la predicción del error "futuro".

Gráficamente, las acciones o efectos de los elementos del control PID sobre la señal de error tienen la siguiente interpretación [16]:

- La *acción proporcional P* produce una señal de control proporcional a la señal de error en un tiempo t .
- La *acción integral I* es el área bajo la curva de la señal de error hasta un instante t , es decir, la suma de los errores pasados.

- La *acción derivativa D* corresponde con la pendiente de la recta tangente a la gráfica de la función de error en un tiempo t , es decir, la predicción del error futuro.

Por lo tanto, el control PID puede ser entendido como un compensador que toma el presente, el pasado y el futuro del error en consideración [16]. La forma matemática o ley de control de un compensador PID cuando la señal de error es expresada en función del tiempo como $e(t)$, es la siguiente [13]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (2.2)$$

donde K_p es referida como la ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral, K_d es la ganancia derivativa y $u(t)$ es la señal de control. El diagrama de bloques correspondiente a un sistema de control PID básico se muestra a continuación en la Figura 2.9.

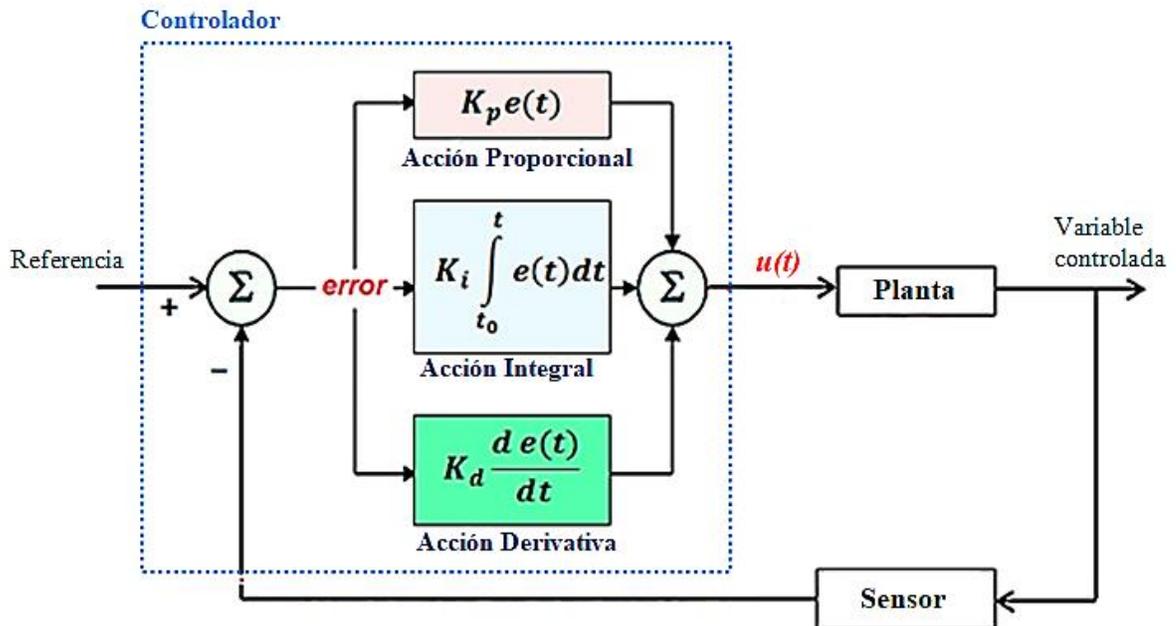


Figura 2.9 Diagrama de bloques de un sistema de control basado en compensador PID.

La combinación se utiliza a menudo para proveer un grado aceptable de reducción del error simultáneamente a una estabilidad y amortiguación aceptables. En general, se comienza con una acción de control proporcional, donde el ajuste se realiza en proporción al tamaño de la señal de error. Luego, las acciones de control integral y diferencial, que están en proporción con la integral y la derivada de la señal de error, se pueden agregar para ayudar a mejorar las especificaciones de salida deseadas [13]. En la Tabla 2.1 se puede apreciar los efectos de las ganancias sobre la salida de un sistema de control PID.

Tabla 2.1 Efectos de las ganancias K_p , K_i y K_d en un sistema de control PID [17].

Constante de control	Tiempo de levantamiento	Sobrepaso	Tiempo de estabilización	Error en estado estable	Estabilidad
Incrementando K_p	Decrece	Incrementa	Incrementa poco	Decrece	Decrece
Incrementando K_i	Decrece poco	Incrementa	Incrementa	Decrece poco	Decrece
Incrementando K_d	Decrece poco	Decrece	Decrece	Cambio mínimo	Mejora

2.2.1 Acción de control proporcional

El control proporcional es el más intuitivo porque la señal de control es proporcional al error presente. Cuanto mayor sea el error, mayor será la acción correctiva. Una gran ganancia proporcional crea una respuesta rápida, pero puede provocar un sobrepaso y oscilación, especialmente si el sistema tiene poca amortiguación [13].

Un buen enfoque para variar las ganancias del compensador PID durante las iteraciones de diseño es aumentar primero gradualmente la ganancia proporcional (K_p) hasta que el tiempo de subida sea lo suficientemente rápido sin demasiado sobrepaso y oscilación. Como se observa en la Figura 2.10, con ganancias bajas la respuesta es lenta y hay un error significativo en el estado estable. Con una alta ganancia proporcional, la respuesta es rápida, pero hay un sobrepaso y oscilación significativos en la respuesta [13].

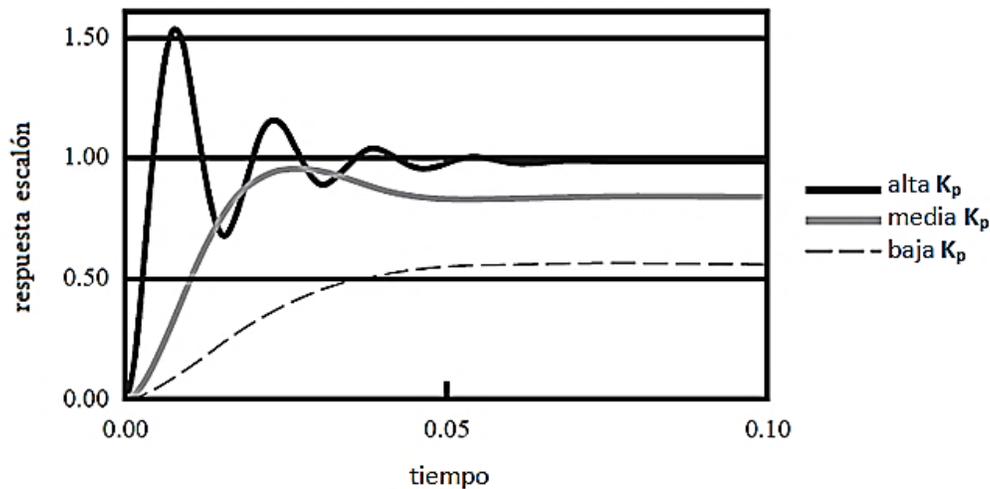


Figura 2.10 Efecto de varias ganancias proporcionales [13].

2.2.2 Acción de control integral

Como la señal comandada es función de la señal de error, con un control proporcional justo (teniendo en cuenta que el término derivado será cero en estado estable) debe haber una señal de error distinta de cero para que el controlador envíe una señal de comando para reducir o eliminar los errores de estado estable. La ganancia integral permite que el controlador supere esta limitación y lleve el error a cero [13]. De modo que esta retroalimentación tiene la virtud importante de poder proporcionar un valor finito de u sin señal de error de entrada e ; donde u es función de los valores pasados de e más que del valor actual, como el caso proporcional. Por lo tanto, los errores pasados “cargarán” el integrador hasta algún valor que permanecerá, aunque el error se haga cero [18].

Para una ganancia alta, el error se disipa muy rápido, pero el sobrepaso será mayor que si no hubiera ganancia integral. Con una ganancia integral baja, el error disminuye lentamente, pero eventualmente se disipa a cero. Como se muestra en la Figura 2.11, con una ganancia media, la curva exhibe una respuesta con muy poco sobrepaso y casi no hay oscilación, y la salida se estabiliza rápidamente sin error de estado estable [13].

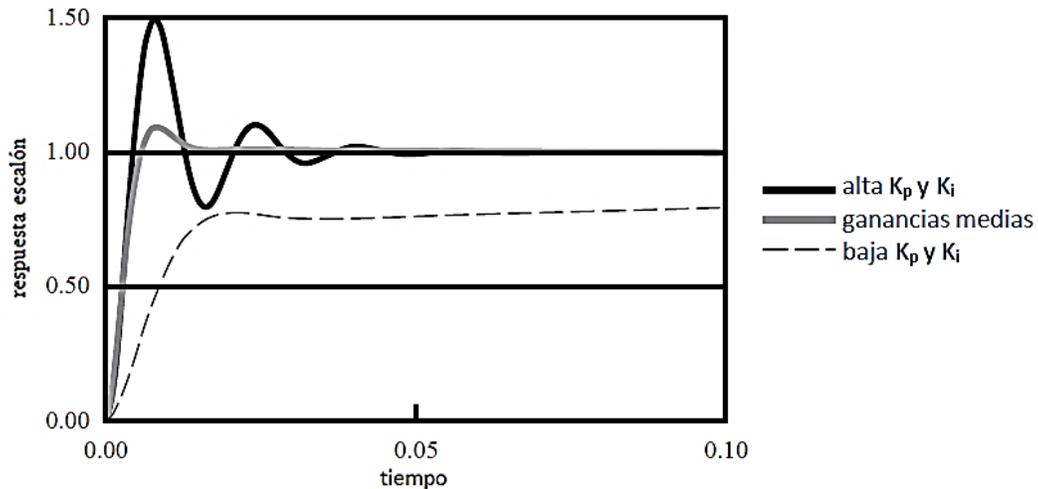


Figura 2.11 Efecto de varias ganancias integrales [13].

2.2.3 Acción de control diferencial

Se utiliza generalmente con la acción proporcional e integral para aumentar la amortiguación y para incrementar la estabilidad de un sistema [18]. La ganancia derivativa responde a la tasa de cambio de la señal de error. Esto permite que el controlador anticipe los cambios en la respuesta del sistema, lo que puede ocasionar un menor sobrepaso y amortiguación de la oscilación [13].

En ocasiones, la ganancia proporcional deberá reducirse a medida que se agregue más ganancia derivada para limitar la ganancia general del sistema. Con una ganancia baja, el sobrepaso y la oscilación todavía están presentes. Con una ganancia derivada muy alta, no hay sobrepaso u oscilación, pero la respuesta es muy lenta. Para la mayoría de los sistemas, con solo ganancias proporcionales y derivadas, la respuesta de salida exhibirá un error de estado estable en la respuesta al escalón [13].

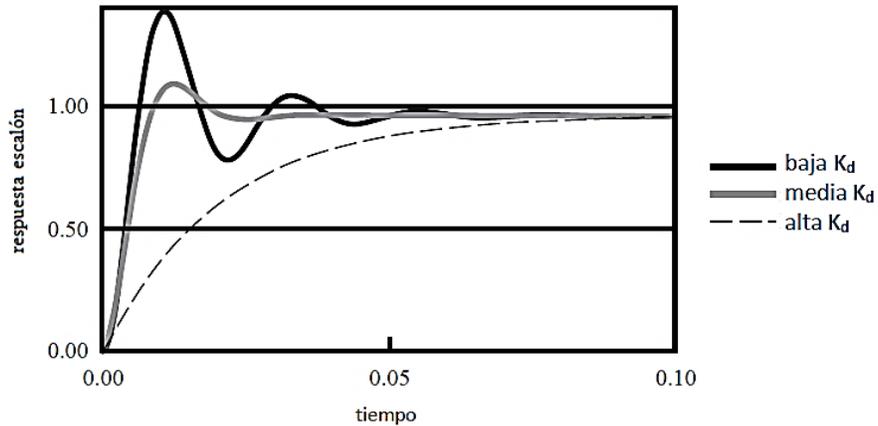


Figura 2.12 Efecto de varias ganancias derivativas [13].

2.2.4 Sintonización del control PID

La selección de los parámetros de ganancia en un controlador PID es una parte importante del diseño, y existen varios métodos analíticos y empíricos que pueden ayudar a elegir las ganancias. El diseño de control se puede especificar en términos de criterios importantes, como el tiempo de asentamiento, el sobrepaso, el error de estado estable y el tiempo de subida [13]. El diseñador debe conseguir que el sistema final cumpla con las especificaciones de comportamiento y, al mismo tiempo, sea fiable [11].

Si se puede obtener un modelo matemático de la planta (conjunto de ecuaciones, en su mayoría diferenciales, que representan la dinámica del sistema, donde dichas ecuaciones se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado [11]), es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estado estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es complicada y no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID, en este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID. En particular, cuando el modelo matemático de la planta no se conoce y, por lo tanto, no se pueden emplear métodos de diseño analíticos, es cuando los controles PID resultan más útiles. Por lo tanto, el proceso de seleccionar los parámetros del

controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como *sintonía del controlador* [11].

Casi todos los controladores PID se ajustan en el sitio manualmente, aunque también, en la literatura se han propuesto diferentes tipos de reglas de sintonización que permiten llevar a cabo una sintonización delicada y fina de los controladores PID en el sitio, ya que tal vez en muchas situaciones específicas el control PID básico no aporte un control óptimo [11]. Por lo cual, existen compensadores PID modificados, así como diversas técnicas de sintonización, que ayudan a mejorar la respuesta de los sistemas de control [15]. Un ejemplo de ello es el trabajo realizado por O'Dwyer [19], donde ha compilado 242 reglas de sintonización [20]. Por otro lado se tiene como ejemplo un método empírico práctico para ajustar un controlador PID que a veces se usa en la industria y se llama Ziegler-Nichols (Z-N). El método Z-N se aplica al observar la respuesta escalonada del sistema en condiciones controladas. A partir de las observaciones, las ganancias de PID se pueden seleccionar para proporcionar una respuesta rápida del sistema con sobrepaso y oscilación mínimos [13].

Los métodos de sintonización de controladores PID se clasifican en dos categorías principales [15]:

- Métodos de lazo abierto: Se refieren a métodos que ajustan el controlador cuando se encuentra en estado manual y la planta opera en lazo abierto.
- Métodos de lazo cerrado: Se refieren a métodos que ajustan el controlador durante el estado automático en el que la planta está funcionando en lazo cerrado.

Por lo tanto, en la aplicación de los controladores PID, los ingenieros deben diseñar el sistema de control, donde, primero tienen que decidir qué modo de acción elegir (control P, PI, PD, PID o modificado) y luego ajustar las ganancias de control (constantes K_p , K_i y K_d).

Capítulo 3 Sistema de control digital

3.1 El compensador PID digital

Para implementar un controlador PID en un sistema físico real, el modelo se reemplaza por hardware real, y el controlador debe construirse como un circuito analógico o con un sistema basado en un microprocesador que ejecute software digital. Un sistema de control digital es diferente de un controlador analógico porque requiere una cantidad de tiempo discreta para realizar actualizaciones de control. Durante cada ciclo de actualización, se adquiere la señal del sensor, se calcula la salida del controlador y se emite la señal de control [13].

Para implementar un controlador PID digital, la diferenciación y la integración deben ser discretizadas. Si las muestras sucesivas de la señal de error se refieren como $e_1, e_2, e_3, \dots, e_{i-1}, e_i, e_{i+1}, \dots$, podemos acumular una aproximación a la integral con la siguiente ecuación [13]:

$$I_i = I_{i-1} + \Delta t e_i \quad (3.1)$$

donde $I_0 = 0$ y Δt es el ciclo de tiempo del lazo de control.

La derivada puede aproximarse con una aproximación de diferencia finita [13]. Por ejemplo:

$$D_i = \frac{e_i - e_{i-1}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

De forma alternativa, tomando en cuenta las Ecuaciones 3.1 y 3.2, podemos escribir la ley de control del compensador PID en forma digital de la siguiente manera:

$$y[n] = K_p e[n] + K_i a[n] dt + K_d \frac{e[n] - e[n - 1]}{dt} \quad (3.3)$$

donde:

$y[n]$ = señal de control

$a[n]$ = $\sum e[n]$

$e[n]$ = error actual = (referencia[n] - salida[n])

$e[n - 1]$ = error del ciclo anterior

$a[n]$ = suma algebraica de los errores pasados

dt = retardo de tiempo correspondiente al ciclo del lazo de control

3.1.1 Conversión analógica a digital y digital a analógica

Para poder ingresar datos analógicos a un circuito digital o microprocesador, los datos analógicos deben transformarse en valores digitales codificados. El primer paso es evaluar numéricamente la señal en instantes discretos en el tiempo. Este proceso se llama muestreo, y el resultado es una señal discreta compuesta por valores discretos correspondientes a cada muestra, como se ilustra en la Figura 3.2. Por lo tanto, una señal discreta es una secuencia de números que es una aproximación a una señal analógica [13].

Caso contrario a la conversión digital a analógica, la cual es inmediata, el proceso de conversión de analógico a digital implica conceptualmente dos pasos: cuantificación y codificación. La cuantificación se define como la transformación de una entrada analógica continua en un conjunto de estados de salida discretos y la codificación es la asignación de una palabra o número de código digital a cada estado de salida [13]. En la Figura 3.1 se muestra un diagrama de bloques de un sistema de control PID digital, en donde se puede apreciar el cambio de señal analógica a digital y viceversa.

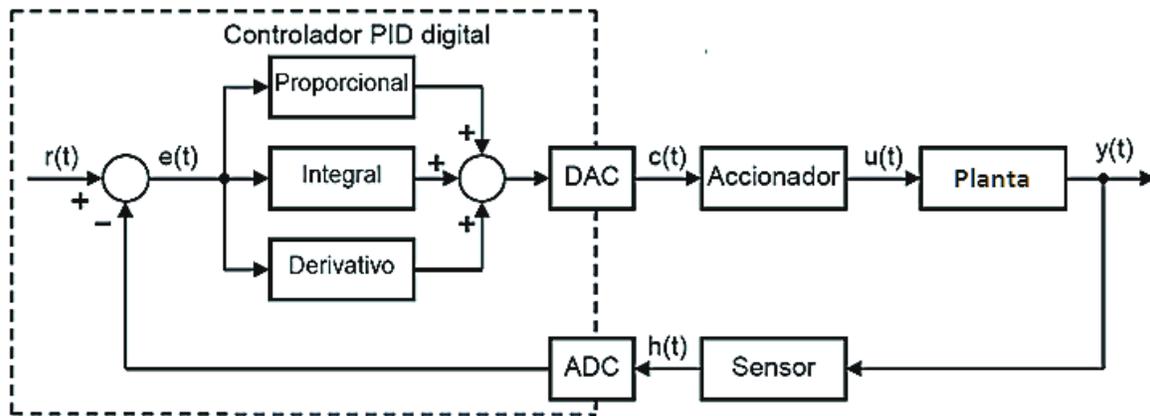


Figura 3.1 Sistema de control control PID digital, donde DAC es el *Convertidor Digital a Analógico* y ADC es el *Convertidor Analógico a Digital*.

Dado que una señal analógica se puede recuperar a partir de una secuencia de muestras, la frecuencia de muestreo f es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una señal discreta. De modo que, el periodo de muestreo T es el valor del intervalo de tiempo entre muestras. Por el teorema de muestreo de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos el doble que la máxima frecuencia de la señal muestreada [13].

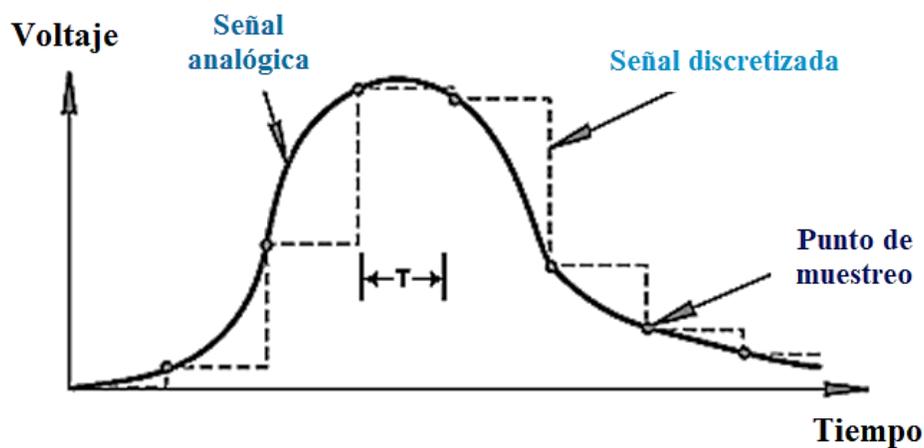


Figura 3.2 Señal analógica y muestreo equivalente, donde T corresponde al periodo de muestreo [13].

Es conveniente que el periodo T sea lo suficientemente pequeño para que:

- La aproximación empleada en la discretización sea correcta.
- No se pierda información de la señal muestreada.
- No se afecte la estabilidad del lazo.

Sin embargo, el período de muestreo no puede ser reducido todo lo que se “quiera” ya que existen, entre otras, limitaciones debidas a la velocidad de cálculo del procesador digital y dificultades debidas al “redondeo” en las operaciones.

3.1.2 Eliminación del efecto windup

El control integral es la suma de los errores de cada ciclo, y puede llegar a acumular valores muy altos, corriendo el riesgo de saturar la salida para valores de error relativamente grandes o para cambios bruscos de la entrada y/o salida. Como se ilustra en la Figura 3.3, la consecuencia es un largo transitorio y sobrepaso en la variable a controlar. Por lo tanto, la eliminación o reducción del windup se logra aplicando la integral sólo en valores cercanos a la referencia [18].

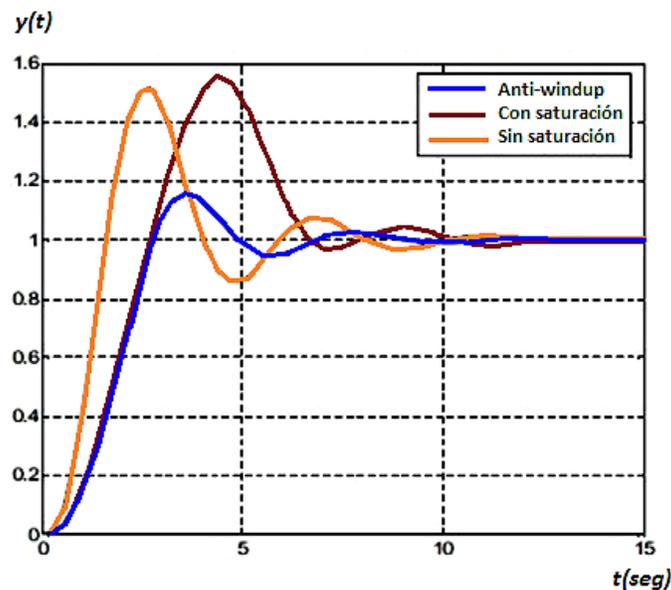


Figura 3.3 Ejemplo de la respuesta de un sistema de control empleando la técnica anti-windup (curva azul).

3.1.3 Diagrama de flujo de programación del control PID digital

Una vez teniendo programado el algoritmo de control PID en un controlador digital, conviene realizar un conteo para saber cuánto tiempo le toma al controlador en ejecutar instrucciones y/u operaciones digitales que abarcan desde la conversión de entrada (ADC), el cálculo de la señal de control, hasta la conversión de salida (DAC), y de esta manera establecer el parámetro de retardo dt . El tiempo de cada ciclo de actualización se conoce como retardo de tiempo y este afecta la respuesta del sistema, de tal manera que el desempeño del lazo cerrado dependerá de este valor, ya que si este es demasiado lento, el sistema puede volverse inestable, pues los valores de cada ciclo no se actualizarían lo suficientemente rápido [12].

En el siguiente diagrama de flujo de programación, se expone el algoritmo básico de un control PID basado en la ley de control discreta de la Ecuación 3.3 y tomando en cuenta las consideraciones mencionados en este capítulo. El algoritmo de control de la Figura 3.4 fue la base de la programación que se implementó en el control automático de fuerza y velocidad del tribómetro coaxial.

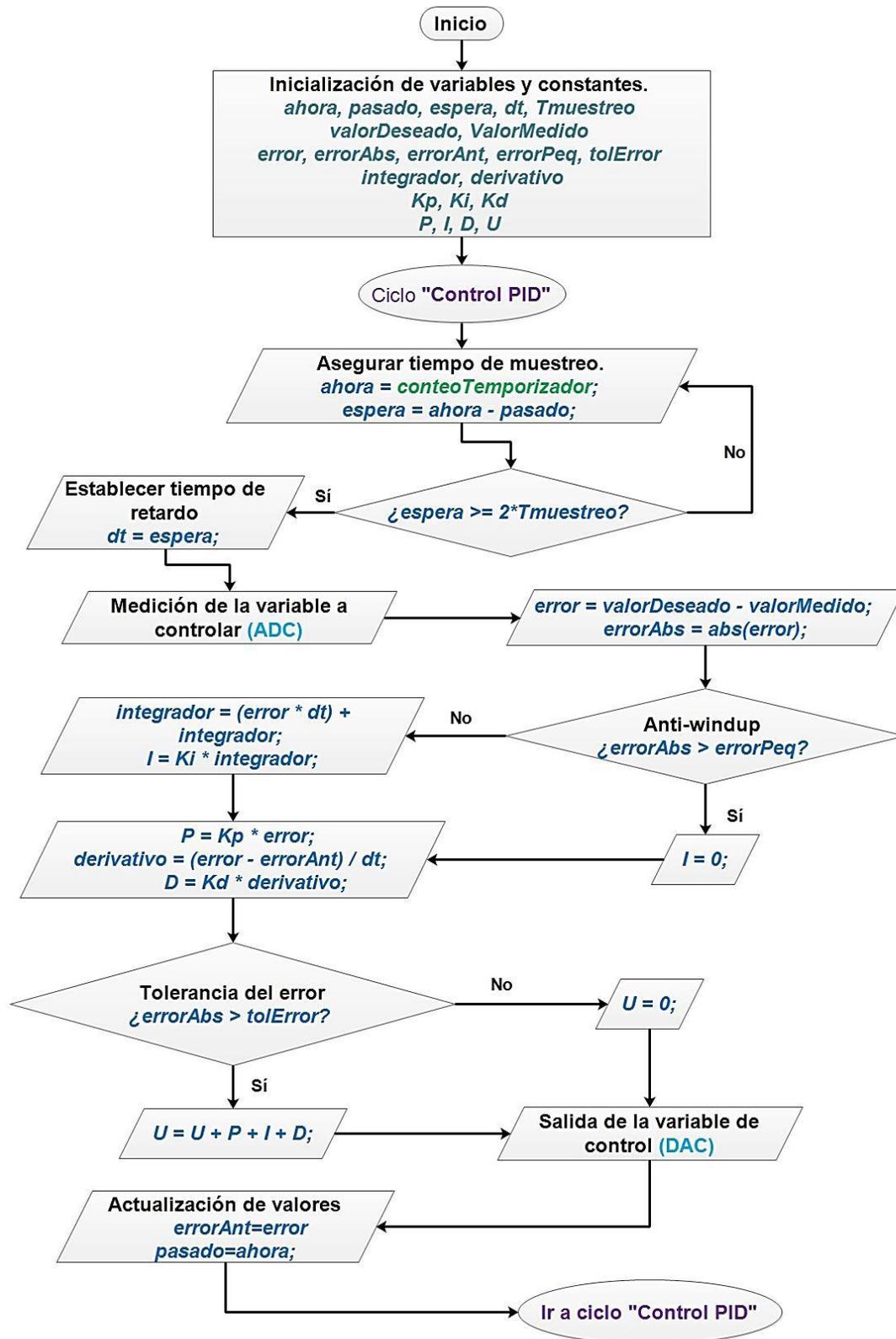


Figura 3.4 Diagrama de flujo de programación del algoritmo de control PID empleado para el control automático de fuerza y velocidad en el tribómetro coaxial.

Capítulo 4 Control de fuerza

4.1 Control manual de carga

El control manual de carga en el tribómetro coaxial se lleva a cabo mediante desplazamientos del eje de un actuador lineal. Este proceso se manipula haciendo uso del controlador digital Galil DMC 1425 por medio de un programa realizado en el software GalilTools, el cual es un software utilizado para los controladores actuales de la empresa Galil [21]. En dicho programa se tienen rutinas (tanto para desplazamiento frontal como reversa y con sus respectivos límites de carrera, como se ilustra en la Figura 4.1) que al ser elegidas por comandos provocan un avance en el eje del actuador lineal, colocando al eje en una posición absoluta, es decir, la nueva posición se convierte en un nuevo punto de referencia con valor cero. Estos desplazamientos hacen que el portamuestra se desplace hacia el perno con velocidad, aceleración y desaceleraciones programadas, distancias que pueden ir desde decimas de milímetros hasta centímetros, dependiendo la rutina elegida.

La muestra al ser impedida en su movimiento por el perno (como se aprecia en la Figura 1.5), se ejerce fuerza a compresión dando como resultado una carga en la pieza a evaluar. De esta manera, una vez que la muestra está en contacto con el perno, la carga resultante es directamente proporcional a los desplazamientos. Antes de hacer girar al perno, partiendo de una posición inicial se hacen los avances necesarios en el portamuestra hasta que la muestra esté en contacto con el perno y se registre el valor de fuerza deseado. La fuerza ejercida no debe sobrepasar los 1000(N) ya que este valor es la máxima capacidad de la celda de carga. Como se verá más adelante en la Figura 4.2, las señales de control dadas por el DMC 1425 pasan por el módulo de interconexión Galil ICM 1460 para comunicarse al driver EMERSON EN-204, el cual al ser un servoamplificador entrega la potencia adecuada al sistema de desplazamiento lineal para su correcto avance. Una vez que el ensayo ha finalizado, se elige la rutina correspondiente para regresar a la posición inicial del eje del actuador lineal, eliminando la carga y permitiendo retirar la muestra.

El sistema de desplazamiento lineal está conformado por un actuador lineal acoplado a un servomotor mediante una banda de transmisión, donde las características de los elementos mostrados en la Figura 4.1 son las siguientes: *Actuador lineal de tornillos planetarios Exlar*, Serie IM, modelo IM20-0201-FM-P20-M60-L3, carrera 2 (in), paso 0.1 (in), fuerza continua 578 (lbf), fuerza máxima 1156 (lbf), velocidad 8.33 (in/seg); acoplado mediante montaje en paralelo 2:1 a un *servo motor sin escobillas Exlar*, Modelo SLM060- KBGS-AM1-138-50, torque nominal de 0.83 (Nm) y torque pico 1.66 (Nm), velocidad máxima 5000 (rpm), sin freno [3].

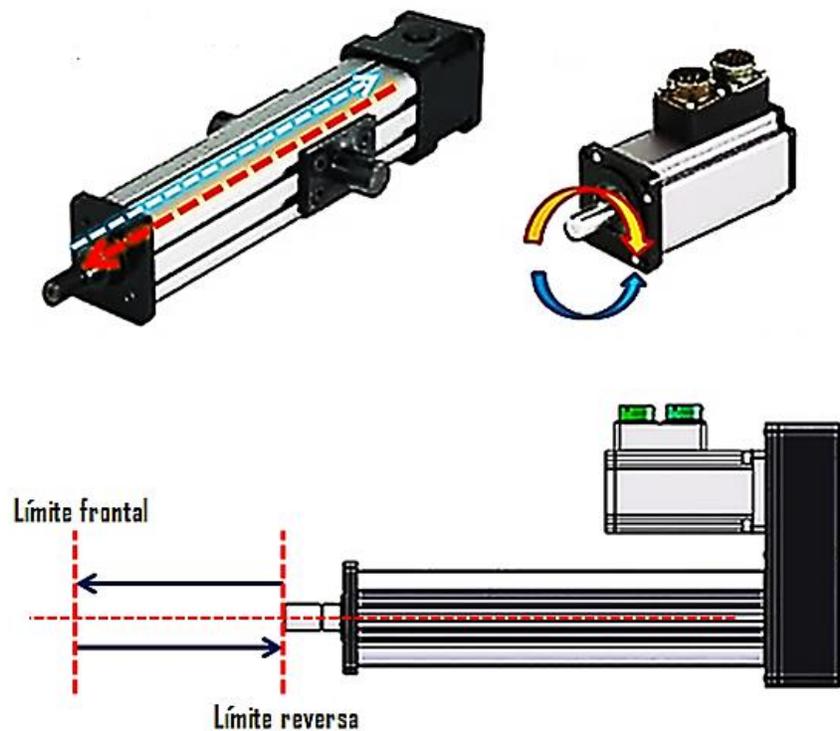


Figura 4.1 Sistema de desplazamiento lineal con sus respectivos límites de carrera, siendo el elemento de la parte superior izquierda el actuador lineal de tornillos planetarios y el de la parte superior derecha el servo motor sin escobillas.

Para la medición de fuerza se usa como sensor la celda de carga Burster 8524-6001 y para la medición del torque se usa el sensor Futek TRS300. Las señales eléctricas emitidas por los sensores son recibidas por el equipo de adquisición de datos de NI (National Instruments) [22], el cual se usa como módulo de interconexión entre las señales eléctricas de los sensores y el software LabVIEW 8.5, donde este último es un software de NI para

leer, interpretar y visualizar las señales eléctricas codificadas que proporciona el módulo de interconexión. Dicho equipo de adquisición de datos está conformado por el chasis NI SCXI-1000 y dos módulos conectados a éste: NI SCXI-1102 y NI SCXI-1303. El valor de las variables se visualiza en tiempo real con indicadores y graficas en la computadora mediante un programa realizado en LabVIEW. Para su posterior análisis, los valores numéricos generados se guardan digitalmente en un archivo de texto en una tabla de tiempo contra fuerza y torque.

4.1.1 Diagrama esquemático del sistema de control de carga

Una vez comprendido el proceso del control manual de carga, así como de la función de cada uno de los elementos que lo conforman, se transformó el sistema físico en diagrama esquemático, presentado en la Figura 4.2, logrando tener una mejor visualización de la conexión entre los elementos que integran al sistema de control de carga en el tribómetro coaxial.

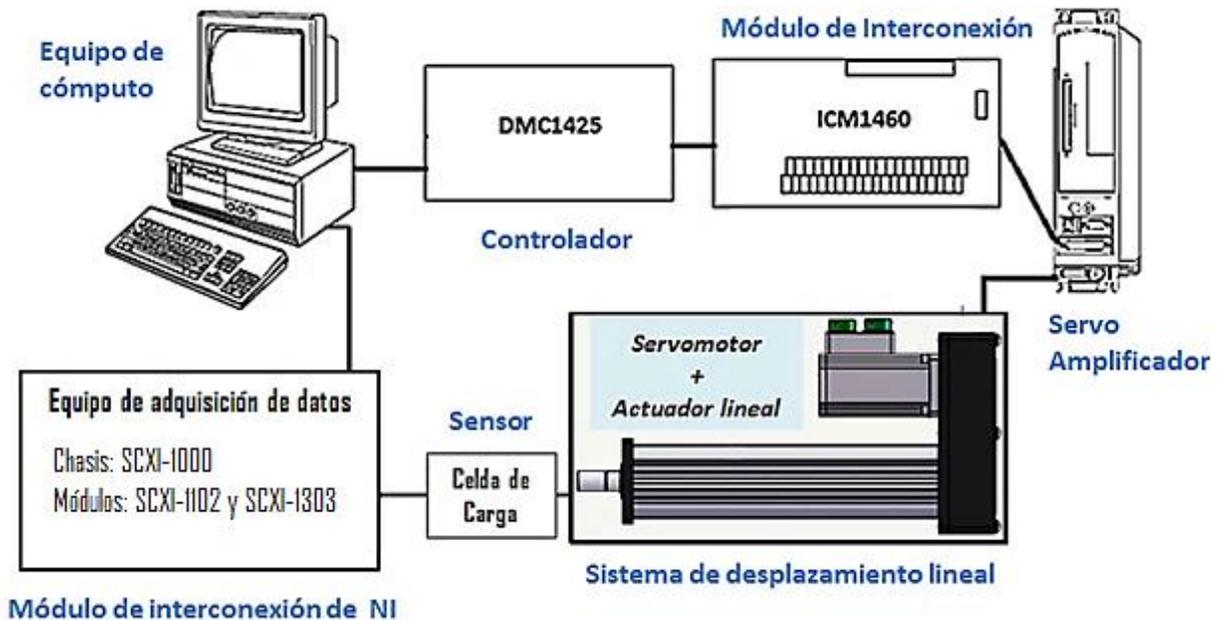


Figura 4.2 Diagrama esquemático de los elementos que conforman al sistema de control de carga del tribómetro coaxial.

4.1.2 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga en lazo abierto

Con el propósito de poder analizar de mejor forma el comportamiento de las variables involucradas en este proceso y tomar decisión en cómo dar paso al sistema de control en lazo cerrado para aplicar la técnica de control automático PID, partiendo de la Figura 4.2 se elaboró el diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga, el cual aparece en la Figura 4.3. Cabe resaltar que hasta este punto, se tenía un sistema de control en lazo abierto, donde no había retroalimentación y la fricción generada entre el perno y el material de prueba es la principal perturbación externa.

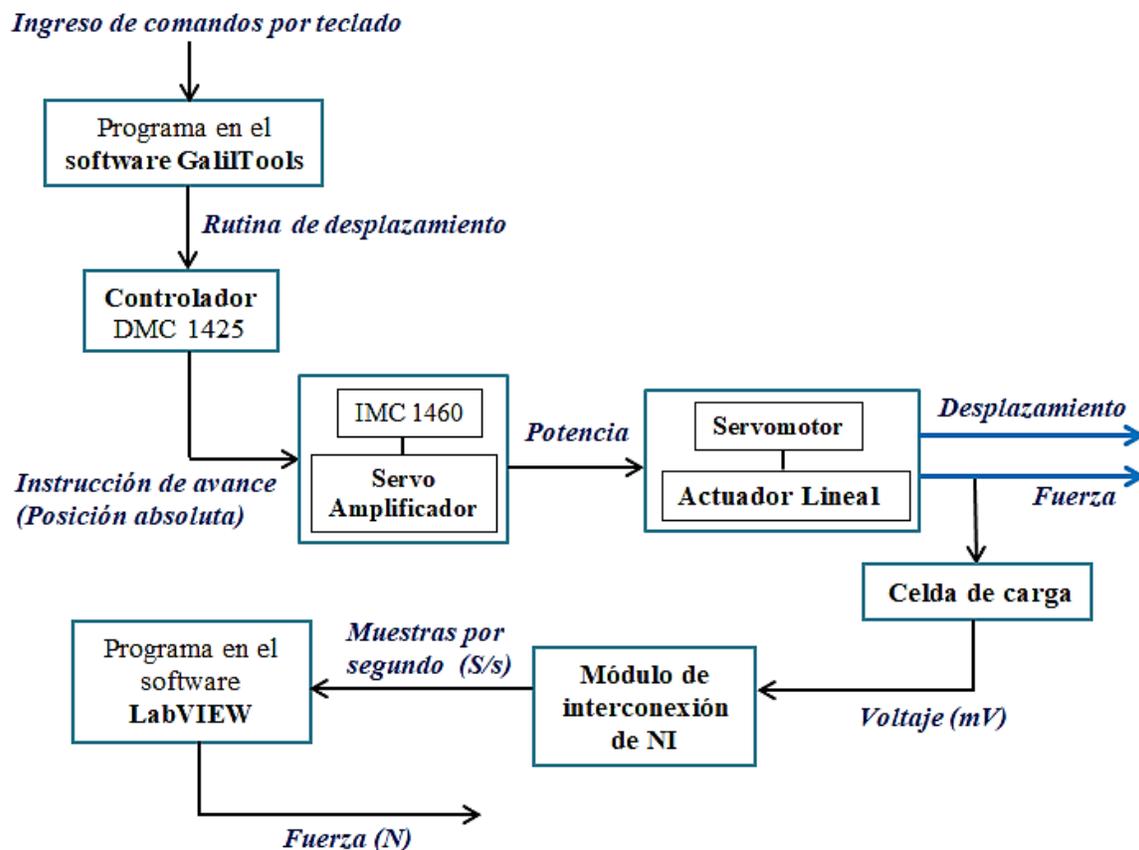


Figura 4.3 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga.

4.2 Control automático de fuerza

Para el control automático de fuerza se propuso usar el mismo principio que el proceso de control manual, controlando la carga mediante desplazamientos del eje del actuador lineal, pero esta vez, dicho control se lleva a cabo de forma automática y con posiciones relativas en el eje, donde cada nueva posición tiene un mismo punto de referencia fijo.

Como se puede observar en la Figura 4.2, el sistema de control de carga del tribómetro coaxial cuenta con los siguientes elementos para la implementación de un control con retroalimentación:

- ✓ **Planta:** Sistema de desplazamiento lineal (Servomotor + Actuador lineal).
- ✓ **Etapas de potencia:** (IMC 1460 + Servoamplificador).
- ✓ **Controlador digital:** Galil DMC 1425.
- ✓ **Medición de la variable a controlar:** (Celda de carga + Módulo de interconexión de NI + software LabVIEW).

Sin embargo, no hay retroalimentación entre la medición de la variable de fuerza con el controlador digital Galil DMC 1425, el cual controla los movimientos del actuador lineal y es un dispositivo donde se puede programar el algoritmo de control PID. Después de investigar en la página web oficial de la empresa Galil [21], se encontró que existen diferentes métodos para desarrollar aplicaciones con LabVIEW que puedan comunicarse con un controlador de Galil. Por lo tanto el DMC 1425 es compatible para ser controlado por medio del software LabVIEW. Por consiguiente, se dio la propuesta de cerrar el lazo de control al establecer comunicación entre LabVIEW y el controlador DMC 1425. Ésta solución es la más práctica, pues ya no hay que agregar ningún elemento más al sistema de control de carga, basta con hacer uso de programación en LabVIEW.

Además, ya que LabVIEW cuenta con una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería [22], también se propuso usarlo para desarrollar una interfaz entre este software y el operario, consiguiendo tener un panel frontal con botones, indicadores, cuadros de diálogo y gráficas, para el control de los pasos

o etapas de los ensayos tribológicos. Cabe señalar que LabVIEW usa un lenguaje de programación llamado lenguaje G, donde se tienen dos áreas para su operación:

- Panel frontal: Controles, indicadores, entradas y salidas.
- Diagrama de bloque: Programa de acompañamiento para el panel frontal y componentes “cableados” entre sí.

Por otro lado, en el lenguaje de GalilTools se usan mnemónicos, los cuales consisten de una palabra que sustituye a un código de operación.

4.2.1 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga en lazo cerrado

Teniendo la propuesta de control con realimentación, se realizó el diagrama de flujo de señales correspondiente al sistema de control de carga en lazo cerrado del tribómetro coaxial, expuesto en la Figura 4.4, con lo cual se dio paso a la implementación.

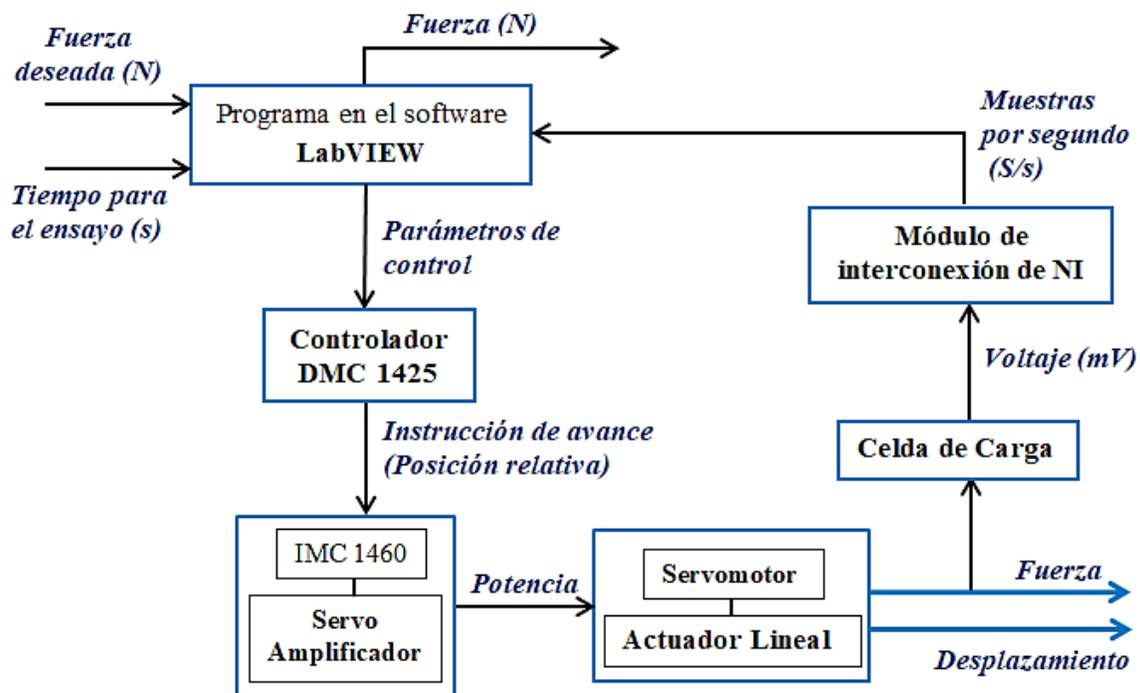


Figura 4.4 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de carga en lazo cerrado.

4.2.2 Implementación del sistema de control de carga en lazo cerrado

En la página web de la empresa Galil se encuentra la información necesaria (instrucciones, pasos, métodos, descargas, ejemplos, etc.) que se deben aplicar para lograr la comunicación entre un controlador de Galil y LabVIEW. Esta solución ofrece tres métodos para establecer la comunicación mencionada [21]:

1. DMCWin32 Library and Galil developed VI's
2. Active X Toolkit
3. GalilTools Communication Library.

La tercera opción, Biblioteca de Comunicación de GalilTools, es el método recomendado para todas aquellas aplicaciones nuevas que se están desarrollando con LabVIEW. La Biblioteca de Comunicación GalilTools (clase Galil) aporta métodos para la comunicación con un controlador de movimiento Galil a través de Ethernet o RS-232 [21].

De acuerdo al tercer método, la programación correspondiente al establecimiento de comunicación entre LabVIEW y el DMC 1425 consiste de dos lenguajes de programación, la primera está basada en diagramas de bloques haciendo uso de las propias herramientas de LabVIEW (librerías, subVI's, etc.) y la segunda parte es la integración a LabVIEW de un bloque de código de programación en el lenguaje de GalilTools. En este bloque se programa todo lo referente al control de los movimientos del eje del actuador lineal, por lo tanto también el algoritmo de control PID y movimientos adicionales. Con esta interfaz, se elimina el uso del software GalilTools, usando únicamente el software LabVIEW. El código o algoritmo en lenguaje de GalilTools se integra a la programación de LabVIEW escribiéndolo en un *bloque de cadena de texto* (bloque con contorno rojo que aparece en la Figura 4.5) y cableándolo al bloque *Invoke Node*.

Más adelante, en los acápites 4.2.6 y 4.2.7 se verá por separado la finalidad de la programación realizada tanto en el LabVIEW como en lenguaje de GalilTools, que en conjunto logran llevar a cabo el control automático de carga y de los pasos o etapas del ensayo tribológico.

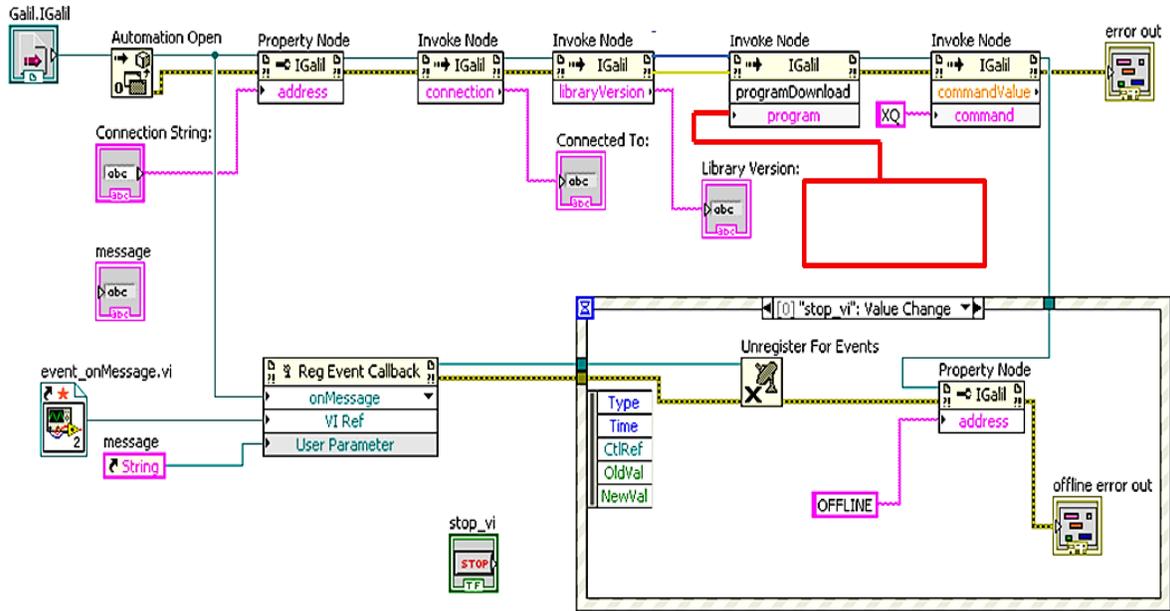


Figura 4.5 Programación en LabVIEW para establecer la comunicación entre este software y el controlador DMC 1425 [21].

4.2.3 Estabilidad del sistema de desplazamiento lineal

De acuerdo con los criterios de estabilidad vistos en el acápite 2.1.3, el sistema de desplazamiento lineal es un sistema lineal e invariante con el tiempo, estable y del tipo SISO (*Una Entrada – Una Salida*), pues al aplicarle cualquier entrada acotada, el sistema de desplazamiento cumple con los siguientes criterios:

- ✓ Produce una salida acotada ante cualquier entrada acotada.
- ✓ La respuesta libre tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito, dejando únicamente la respuesta forzada.

Para esta prueba de estabilidad, sin que el eje del actuador lineal presentara oposición alguna para su desplazamiento, se realizó un programa en específico en el cual, la entrada fue del tipo escalón ($u(t) = D$ para $t > 0$ y 0 para $t < 0$), donde D corresponde a un valor de distancia, consiguiendo que el sistema responda desplazando el eje a dicho valor. Cuando este último termina su avance llegando al punto solicitado, la energía cinética tiende a cero, dejando únicamente la respuesta forzada, es decir, el nuevo valor de

distancia. Por lo tanto, el sistema de desplazamiento lineal es útil para ser controlado. Cabe resaltar que se está hablando únicamente de la estabilidad del sistema de desplazamiento lineal, el cual en conjunto con la oposición del perno, se usa para generar una carga deseada en la muestra a evaluar.

4.2.4 Requerimientos y especificaciones para el control de carga

Los requerimientos cuantitativos y especificaciones para este proyecto son para necesidades específicas, es decir, fueron solicitados por un experto de tribología para ensayos en particular. Estos valores pueden variar de acuerdo al criterio del operario y/o en base a protocolos de ensayos tribológicos.

➤ **Requerimientos cualitativos:**

- Aplicar una carga deseada en la muestra a evaluar y una vez estabilizada iniciar el ensayo tribológico tratando de mantener constante el valor de fuerza establecida.

➤ **Requerimientos cuantitativos:**

- Control de carga para un rango de 30 a 600 (N).

➤ **Especificaciones:**

En los ensayos tribológicos no se tiene preestablecido un valor fijo para el tiempo de asentamiento, pues este dependerá de las características y propiedades del material a evaluar. Además, este transitorio es importante para el estudio del comportamiento de cada material; por lo tanto este parámetro no es como tal una especificación de control, sino más bien un resultado que se usará para el análisis del estudio del material. Las especificaciones que sí aplican en la parte del control de carga son las siguientes:

- El sobrepaso máximo una vez establecida la carga deseada debe ser menor o igual al 20(%).
- El valor de fuerza en estado estable no debe superar su valor ± 15 (N).

4.2.5 Diagrama de bloques del sistema de control de carga en lazo cerrado

Partiendo de la Figura 4.4 se elaboró el diagrama de bloques del sistema de control de carga en lazo cerrado, siendo punto de partida para aplicar la programación del algoritmo de control PID (Figura 3.4) en el lenguaje de GalilTools e incorporarlo a la programación de LabVIEW.

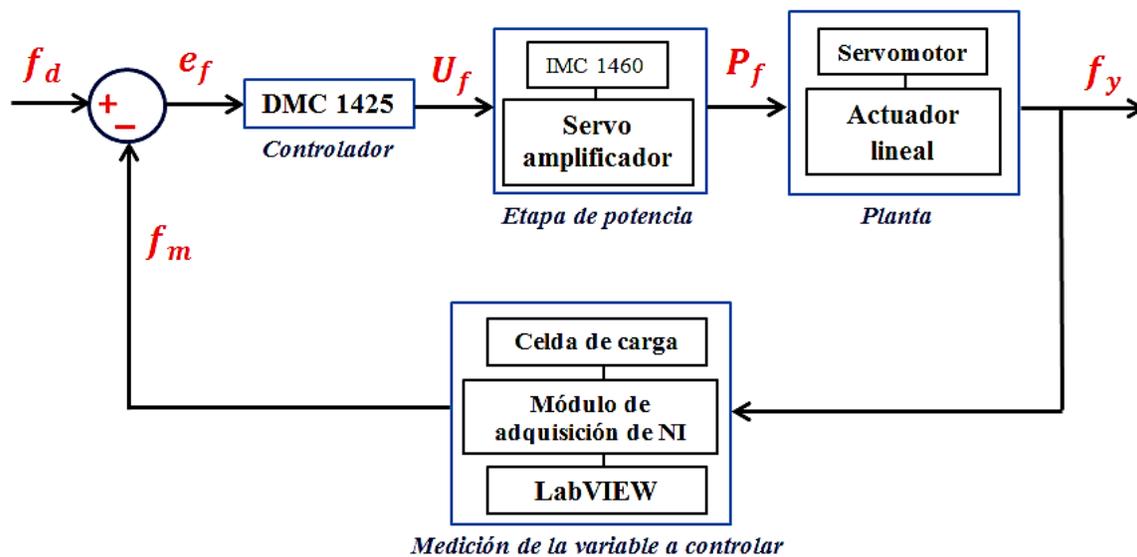


Figura 4.6 Diagrama de bloques del sistema de control de carga en lazo cerrado, donde las variables involucradas están en función del tiempo (s).

Donde:

- f_y = Fuerza: Variable controlada
- f_d = Fuerza deseada (Newtons)
- f_m = Fuerza medida (Newtons)
- e_f = Error: ($f_d - f_m$)
- U_f = Señal de control: Posición relativa
- P_f = Potencia entregada al servomotor

4.2.6 Programación en LabVIEW

La estrategia del algoritmo de programación en LabVIEW se llevó a cabo haciendo uso de la herramienta *Estructura Plana Secuencial*, la cual consiste en subdiagramas o marcos que se ejecutan secuencialmente. Cada marco cuenta con su programación para cumplir operaciones y funciones específicas. Algunos subdiagramas cambian incondicionalmente al siguiente subdiagrama, es decir, ejecutan su programación y pasan al siguiente marco sin que se requiera acción alguna del operador. A continuación, en la Tabla 4.1 se expone la programación de la *Estructura Plana Secuencial*.

Tabla 4.1 Descripción de la función de cada subdiagrama empleado en la programación de LabVIEW.

<p>Fuera de la <i>Estructura Plana Secuencial</i>: Inicialización de variables y constantes, reinicio de botones, limpieza de gráficas e indicadores.</p> <p>Cambio incondicional al primer subdiagrama.</p>
<p>1° Subdiagrama: Mostrar cuadro de dialogo para indicar que se ingresen los parámetros de control: tiempo y fuerza.</p> <p>Cambio incondicional al siguiente subdiagrama.</p>
<p>2° Subdiagrama: Esperar a que el botón <i>Parámetros Listos</i> sea oprimido.</p>
<p>3° Subdiagrama: Apertura de la ventana de controladores encontrados, indicando que es momento de seleccionar el controlador DMC 1425.</p> <p>Cambio incondicional al siguiente subdiagrama una vez seleccionado el controlador.</p>
<p>4° Subdiagrama: Programación de la Figura 4.5</p> <ul style="list-style-type: none"> - Integración de la clase Galil y la Biblioteca de Comunicación de GalilTools. - Gestión de eventos con LabVIEW. - Búsqueda de la dirección del controlador de Galil y conexión. - Detección de errores de comunicación. - Despliegue de la información del controlador en el panel frontal de LabVIEW - Descarga e instrucción de ejecución del programa en código de GalilTools en el controlador DMC 1425. <p>Cambio incondicional al siguiente subdiagrama.</p>
<p>5° Subdiagrama: Esperar en el panel frontal de LabVIEW el mensaje: “En CASA”, el cual indica que el eje del actuador lineal ha llegado automáticamente a la posición de inicio.</p>
<p>6° Subdiagrama: Esperar a que el botón <i>En CASA >Calibrar Sensores</i> sea oprimido.</p>
<p>7° Subdiagrama: Esperar a que el botón <i>Calibración Lista >>Iniciar Avance 1</i> sea oprimido.</p>
<p>8° Subdiagrama: Envío de comando al DMC 1425 para dar instrucción de realizar el primer avance del portamuestra hacia el perno.</p> <p>Cambio incondicional al siguiente subdiagrama.</p>

9° Subdiagrama: Se hace uso de la herramienta *Estructura Ciclo While*, la cual ejecuta la programación dentro de éste marco cada t (ms) hasta que se cumpla una condición del tipo booleana. El contenido de la programación de la estructura *Ciclo While* es el siguiente:

Generación de indicadores y gráficas.
Condición booleana de los botones: <i>Parámetros Listos, En CASA >Calibrar Sensores, Calibración Lista >>Iniciar Avance 1, Carga Estabilizada >>>INICIAR ENSAYO y Paro de Emergencia.</i>
Lectura de muestras del sensor de fuerza y torque. Uso de la herramienta <i>Asistente DAQ</i> , para configurar el equipo de adquisición de datos de NI. -Modo de adquisición: Muestras continuas -Muestras a leer: 10 -Velocidad (Hz): 100 -Unidad de escala: Volts -Rango de la señal de entrada: -5 a 5 (V)
Filtro para eliminar el ruido eléctrico (Uso de la herramienta <i>Filtro</i>). -Tipo de filtro: Smoothing (El filtro de suavizado de paso bajo sólo permite que aparezcan pequeños cambios incrementales en el proceso de salida del filtro y, como resultado, produce una salida suave) -Especificaciones del filtro: Media móvil y rectangular -Mitad del ancho de la media móvil: 60
Conversión de los datos recibidos por los sensores, realizada mediante offset y factor de conversión. [Volt → Newton]
Concatenación de cadenas de texto para el envío de datos (señal de parámetros listos, fuerza deseada, fuerza medida, señal de calibración lista, señal de primer avance, señal de paro de emergencia, señal digital de inicio y fin de ensayo, entre otras) al DMC 1425.
Escritura digital de los datos generados a un archivo del software Excel, en tabla: Tiempo vs Fuerza y Torque.
Temporizador para indicar el tiempo transcurrido en el ensayo tribológico. La cuenta comienza una vez que el botón <i>Carga Estabilizada >>>INICIAR ENSAYO</i> es oprimido.
Condición booleana para salir de la <i>Estructura Ciclo While</i> . La condición se cumple cuando se presiona el botón <i>Paro de Emergencia</i> , cuando se sobrepasa el límite de carga o cuando finaliza el tiempo establecido para el ensayo.

Como producto de la programación desarrollada en el software LabVIEW, se obtuvo como resultado la interfaz gráfica: **Operario – LabVIEW – DMC1425**. En la Figura 4.7 se muestra el resultado gráfico.

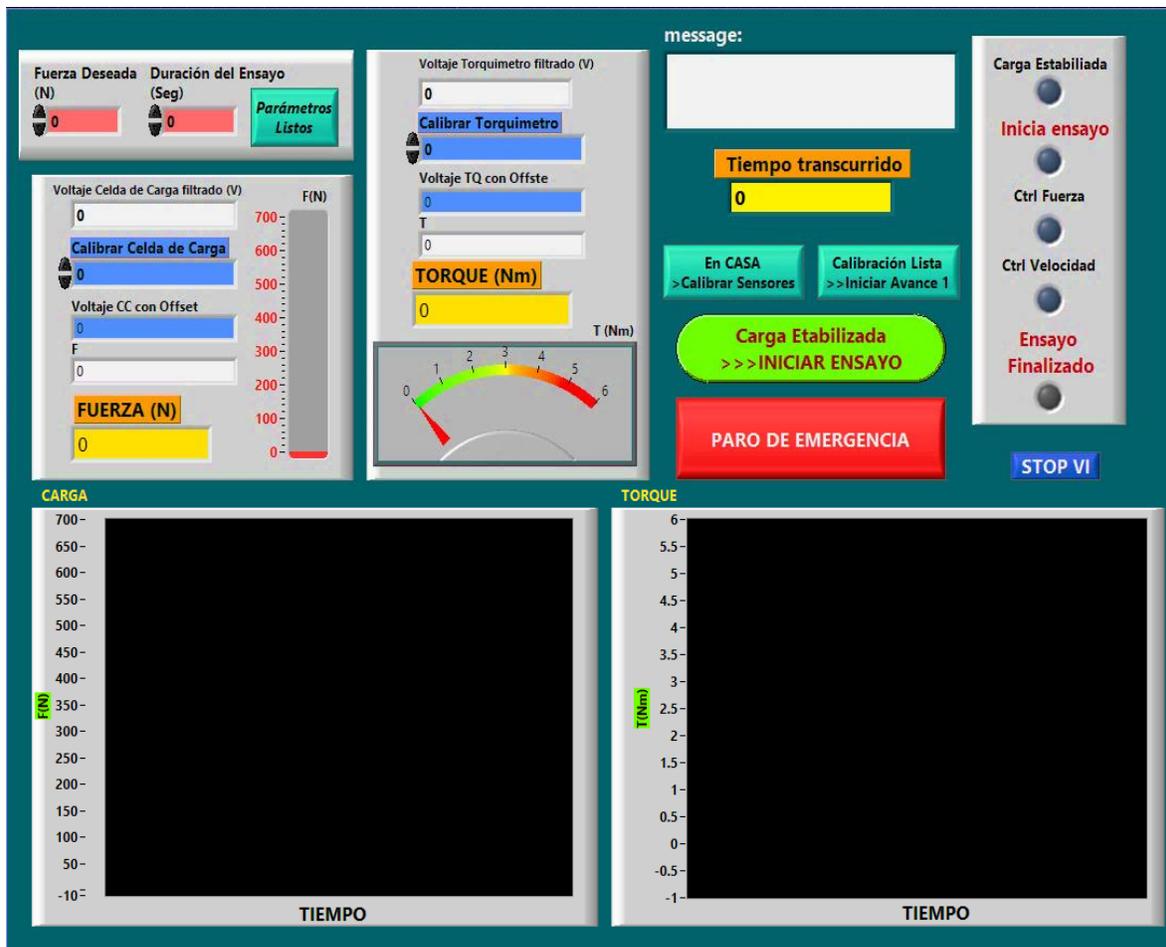


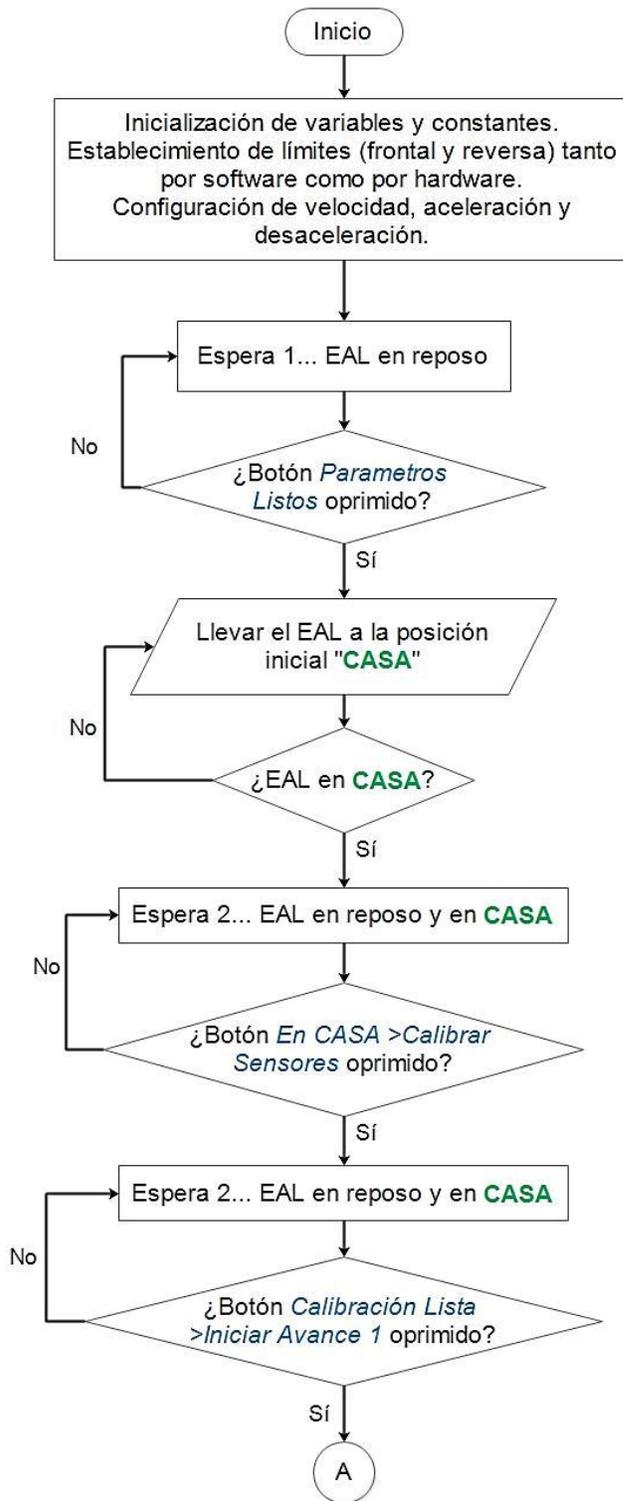
Figura 4.7 Panel frontal en LabVIEW donde se desarrolló la interfaz gráfica para el control automático de carga.

4.2.7 Programación en el lenguaje de GalilTools

Esta programación tiene como fin controlar los movimientos del actuador lineal y es el código que se descarga en el controlador DMC 1425 desde LabVIEW. La estrategia del algoritmo de programación fue mediante rutinas, de tal manera que se ejecuten de forma cíclica, secuencial o que salten de una rutina a otra en su debido momento. Cada una de ellas tiene programado operaciones y funciones específicas. A continuación, en la Tabla 4.2, se muestra la función y descripción que tienen dichas rutinas, dentro de las cuales se controlan los diferentes movimientos del EAL (Eje del Actuador Lineal), por lo tanto, la programación del control PID. Posteriormente, se muestra el diagrama de flujo de programación correspondiente a los movimientos del EAL.

Tabla 4.2 Descripción de la función de cada rutina empleada en la programación en el lenguaje de GalilTools.

<p>Rutina #INICIO</p> <ul style="list-style-type: none"> - Inicialización de constantes y variables. - Establecer por software y hardware los límites de carrera del EAL. - Establecer velocidad, aceleración y desaceleración. <p>Pasa incondicionalmente a la rutina #CASA</p>
<p>Rutina #CASA</p> <p>Cuando el programa se descarga y ejecuta en el DMC 1425 desde LabVIEW, el EAL se desplaza con cierta velocidad, aceleración y desaceleración hasta colocarse en una posición inicial, la cual se establece por límites tanto por hardware como por software. Un indicador en el panel frontal de LabVIEW señala cuando el portamuestra está siendo llevado a la posición de inicio “En CASA” y cuando ha llegado a esta.</p> <p>Esta posición de inicio es prácticamente la misma que la establecida en el control manual, de tal manera que no haya colisión con ningún elemento del tribómetro coaxial, además es favorable para maniobrar al sujetar o quitar la pieza del portamuestra.</p> <p>Cuando el EAL está “En CASA”, se espera a que el botón <i>En CASA >Calibrar Sensores</i> sea oprimido para pasar a la rutina #ESPERAR EAL EN CASA</p>
<p>Rutina #ESPERAR EAL EN CASA</p> <p>Ésta rutina asegura que efectivamente el EAL está en la posición de inicio “En CASA” y por lo tanto en reposo, con lo cual es tiempo para calibrar los sensores de fuerza y torque desde el panel frontal.</p> <p>Cuando el botón <i>En CASA >Calibrar Sensores</i> sea oprimido, se pasa a la rutina #CALIBRAR SENSORES.</p>
<p>Rutina #CALIBRAR SENSORES</p> <p>En esta rutina, mientras el EAL está en reposo, se calibran los sensores de fuerza y torque desde el panel frontal de LabVIEW, consiguiendo la eliminación del offset.</p> <p>Cuando los sensores han sido calibrados, se presiona el botón <i>Calibración Lista >>Iniciar Avance 1</i> dando paso al primer avance del portamuestra hacia el perno, donde este último avanzará hasta que entre en contacto con el perno.</p>
<p>Rutina #AVANCE 1</p> <p>En esta rutina se tiene programado un control P (Proporcional) para poner en contacto a la muestra con el perno y superar ligeramente los 20(N). Esta rutina se realizó para que no haya inconveniente al acercar una muestra hasta el perno sin importar su tamaño, espesor o forma, teniendo en cuenta que no debe sobrepasar la distancia entre el perno y el portamuestra de la posición de inicio.</p> <p>Cuando la fuerza es igual o apenas sobrepasa los 20(N), se pasa de forma incondicional a la rutina #CTRL PID donde se ejecuta de inmediato el control PID.</p>
<p>Rutina #CTRL PID</p> <p>Ejecución del control PID para alcanzar la carga deseada y estabilizarla. Una vez teniendo estabilizada la carga, se da señal desde LabVIEW presionando el botón <i>Carga Estabilizada >>>INICIAR ENSAYO</i> para dar inicio al ensayo tribológico.</p> <p>Una vez iniciado el ensayo, cuando el tiempo determinado para este es alcanzado, se sobrepasa el límite de seguridad de carga o se presiona el botón <i>Paro de Emergencia</i>, se salta a la rutina #CASA, donde el EAL automáticamente se colocará en la posición de inicio “CASA”, eliminando la carga, y así poder quitar la muestra del portamuestra.</p>



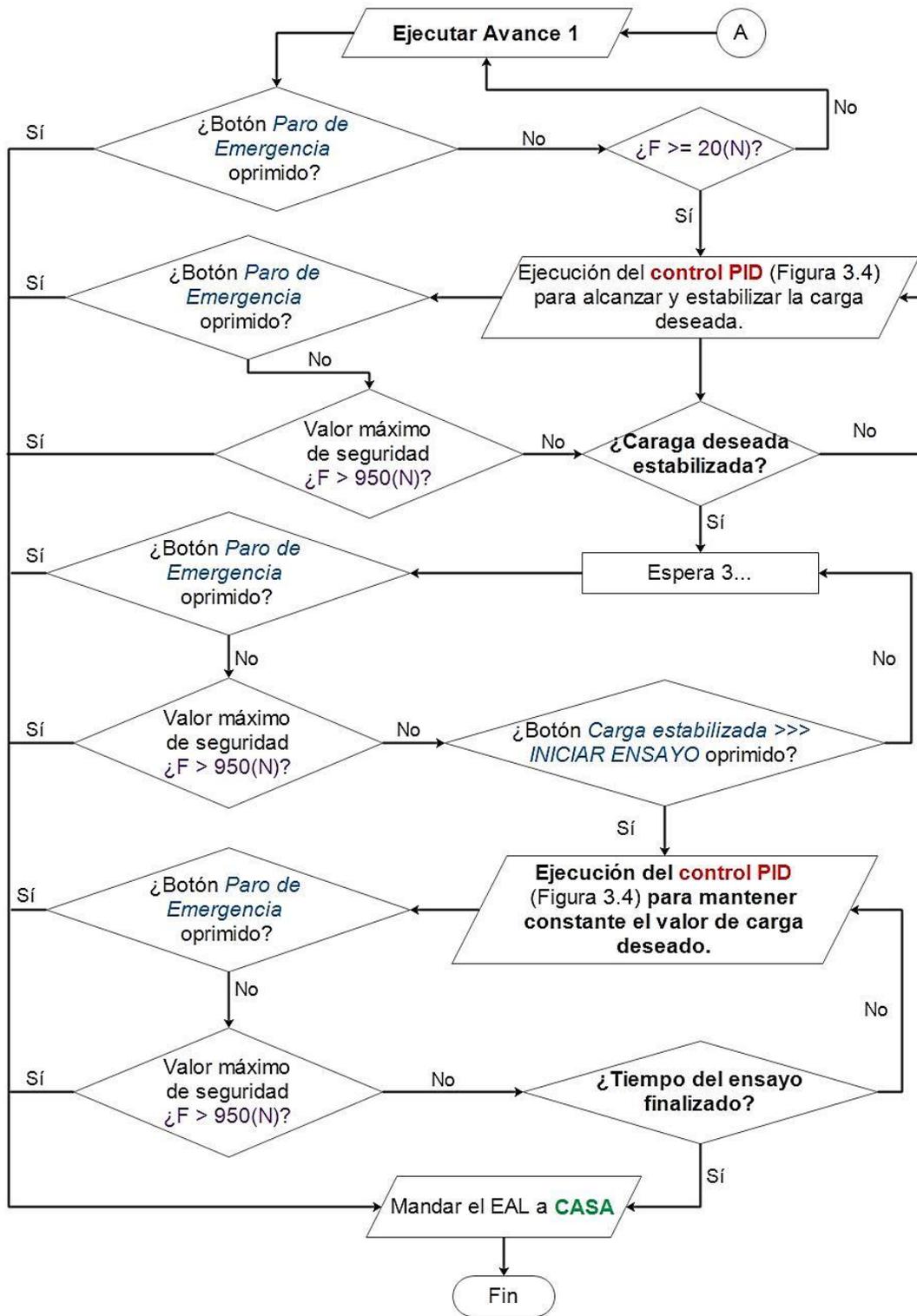


Figura 4.8 Diagrama de flujo de programación para controlar los movimientos del EAL (Eje del actuador Lineal).

Capítulo 5. Control de velocidad

5.1. Control manual de velocidad

El sistema de control de velocidad del tribómetro coaxial cuenta con un motor de corriente directa BALDOR CDP3330, de cuyo eje está acoplado el disco encoder, el sensor de torque y el perno de desgaste (véase Figura 1.6). Las características generales de este motor se enlistan en la Figura 5.1.



- Propósito general
- Imán permanente
- Norma del motor: NEMA 56C
- Potencia: 0.5 (HP)
- Voltaje en la armadura: 90 (volts)
- Corriente en la armadura: 4.8 (amps)
- Velocidad base: 1750 (rpm)

Figura 5.1 Motor de corriente directa BALDOR CDP3330 con especificaciones generales [23].

La velocidad del motor se controla por medio de su respectivo driver, el variador de velocidad BALDOR DC DRIVER BC140. Sus valores eléctricos generales se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores eléctricos del variador de velocidad BC140 [23].

Voltaje de línea de CA (\pm 15%, 50/60 Hz) (Volts CA)	Voltaje del motor (Volts CD)	Corriente de línea de CA (RMS Amps)	Corriente de carga CD (Prom. Amps)	Caballos de Fuerza (HP, (kW))
115	90-130	12	6	0.75, (0.6)
230	180	12	6	1.5, (1.1)

El driver BC140 cuenta con seis trimpots (resistencias variables) en su circuito de potencia, con los cuales se puede ajustar la aceleración, desaceleración, velocidad mínima, velocidad

máxima, límite de corriente y compensación de voltaje del motor, La función que tienen estos trimpots se describe en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Ajuste de los trimpots del circuito de potencia del BC140 [23].

Trimpot	Función
ACCEL	Se proporciona para permitir un arranque suave durante un período de tiempo ajustable cada vez que se aplica la alimentación de CA o el potenciómetro de velocidad principal se ajusta a la velocidad más alta.
DECEL	Controla la cantidad de tiempo de aceleración cuando el potenciómetro principal de velocidad se ajusta a la velocidad más baja.
MIN	Ajusta la velocidad mínima del motor cuando el potenciómetro principal de velocidad está ajustado completamente en el sentido contrario de las agujas del reloj.
MAX	Ajusta la velocidad máxima del motor cuando el potenciómetro de velocidad principal está ajustado completamente en el sentido de las agujas del reloj.
CL	Se utiliza para limitar la corriente máxima (torque) al motor.
IR	Establece la cantidad de voltaje de compensación requerido para mantener constante la velocidad del motor bajo cargas variables.

Al girar la perilla, la cual está sujeta al potenciómetro principal del BC140, como se observa en la Figura 5.2, se da salida al voltaje y corriente con las características de configuración de los trimpots ya mencionados. Por lo tanto, la velocidad del motor es proporcional al ángulo de giro de la perilla, la cual tiene acotaciones de porcentaje de velocidad.

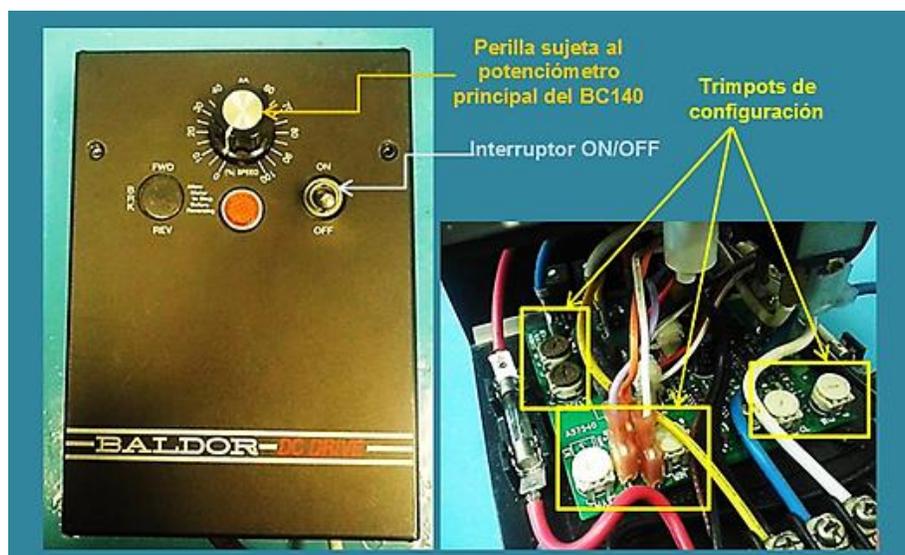


Figura 5.2 BALDOR DC DRIVER BC140 y su circuito interno de potencia.

Los ensayos tribológicos se han llevado a cabo con una configuración preestablecida de los trimpots, dando buenos resultados para controlar la velocidad del motor bajo una carga aplicada, de tal manera que cuando la muestra ejerce fuerza a compresión sobre el perno con una carga de no más de 990(N), el BC140 proporciona al motor la potencia necesaria para hacer girar al perno y llevarlo a la velocidad deseada. La medición del régimen de revoluciones se realiza por medio de un tacómetro implementado por un colaborador anterior, el cual está conformado por un disco encoder de 8 dientes, un sensor óptico de herradura con su respectivo circuito de acondicionamiento y un microcontrolador ARDUINO UNO, donde este último tiene programado un algoritmo que se encarga de proporcionar la medición de velocidad del perno en RPM (Revoluciones Por Segundo), visualizando dicho valor en la computadora por medio del monitor serial del microcontrolador.

Para el proceso de control de velocidad en el perno en el tribómetro coaxial, primero sin que el perno esté en contacto con la muestra, se establece el régimen de giro encendiendo el BC140 y girando la perilla hasta llegar a un ángulo tal, que el tacómetro registre el valor de RPM deseado. Una vez que la velocidad ya es constante se apaga el variador de velocidad. Luego se hacen los desplazamientos necesarios de la muestra hacia el perno para establecer la carga deseada. Una vez que la carga se encuentra estabilizada se enciende el BC140 provocando que el perno tenga prácticamente la velocidad deseada. En el momento en que se enciende por segunda vez el variador de velocidad es cuando comienza el ensayo tribológico, donde se debe ajustar la velocidad cuando se requiera. Una vez que el tiempo establecido para el ensayo termina, se apaga el BC140 y se manda el portamuestra a su posición inicial para eliminar la carga y poder retirar la muestra.

5.1.1 Diagrama esquemático del control manual de velocidad

Para tener una mejor visualización de la conexión de los elementos que conforma el sistema de control velocidad del tribómetro coaxial, se transformó el sistema físico a un diagrama esquemático, el cual se muestra a continuación en la Figura 5.3.

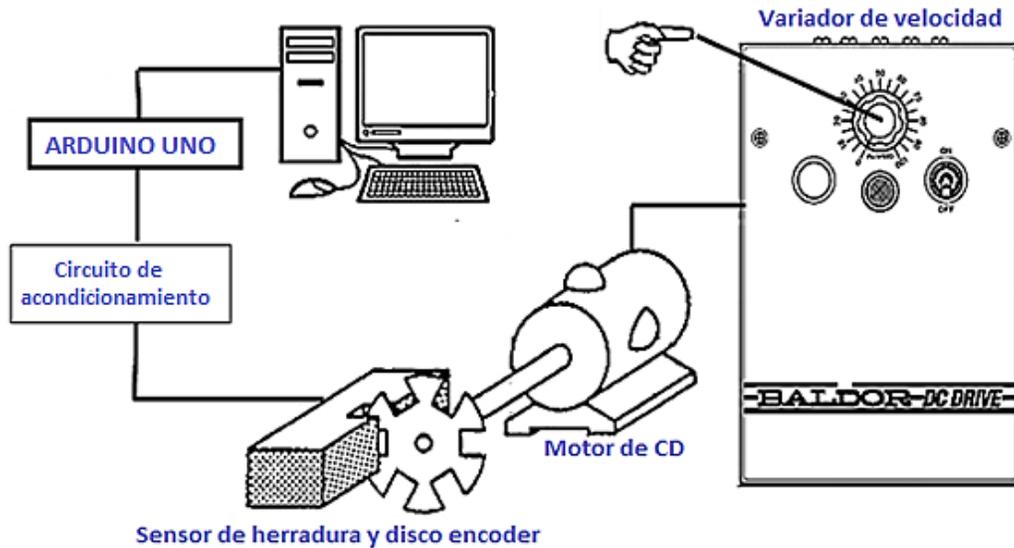


Figura 5.3 Diagrama esquemático de los elementos involucrados en el control manual de velocidad.

5.1.2 Diagrama de flujo de señales del sistema de control de velocidad en lazo abierto

Partiendo del esquema de la Figura 5.3, se elaboró un diagrama de flujo de señales del control manual de velocidad, presentado en la Figura 5.4. De esta manera se puede visualizar y comprender el comportamiento de las variables involucradas en este proceso y poder analizar cómo proceder para contar con un sistema en lazo cerrado, ya que el sistema de control de velocidad hasta el momento correspondía a un sistema de control en lazo abierto, donde la fricción generada entre el perno y el material de prueba es la principal perturbación externa. Cabe mencionar que, para los ensayos tribológicos, la curva resultante de torque generada al vencer la fricción y llegar a un estado estable es de gran importancia para conocer las propiedades y comportamiento del material, ejemplo de ello el cálculo del coeficiente de fricción [3].

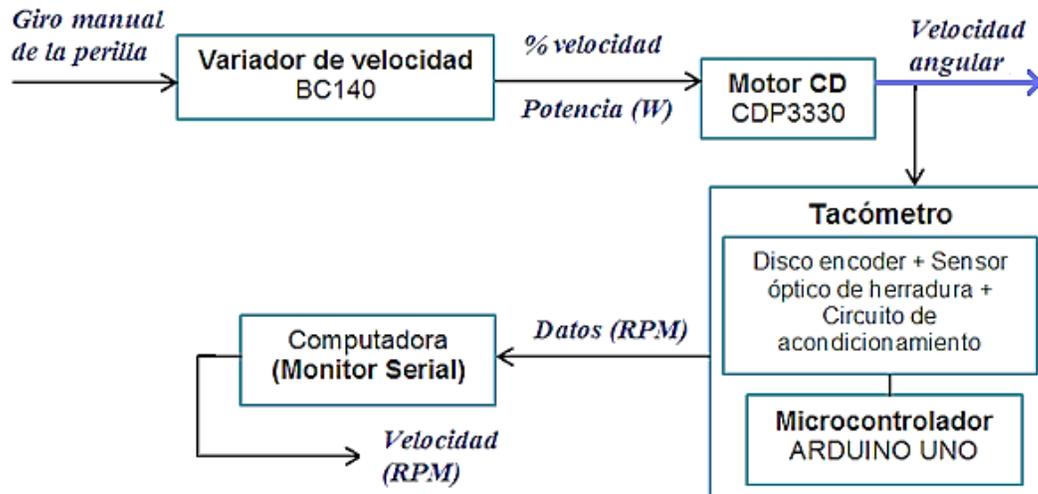


Figura 5.4 Diagrama de flujo de señales del control de velocidad en lazo abierto.

5.2 Control automático de velocidad

Los controladores de velocidad electrónicos son de dos tipos: amplificadores lineales y moduladores de ancho de pulso. Los controladores de modulación de ancho de pulso tienen la ventaja de que manejan transistores bipolares de potencia, actuando como interruptores que rápidamente cierran o abren un circuito, actuando entre la región de corte y saturación [13], siendo ideales para variar el voltaje del motor con fuente de alimentación independiente por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) [24], donde la disipación de potencia es pequeña. Los servoamplificadores que utilizan amplificación de potencia lineal son satisfactorios, pero producen mucho calor, debido a que funcionan en la región lineal del transistor. Tomando como ejemplo la Figura 5.5, el transistor tiene una región de corte (donde no fluye corriente de colector), una región activa (donde la corriente del colector es proporcional a la corriente base) y una región de saturación (donde la corriente del colector está estrictamente controlada por el circuito colector, suponiendo suficiente corriente de base) [13].

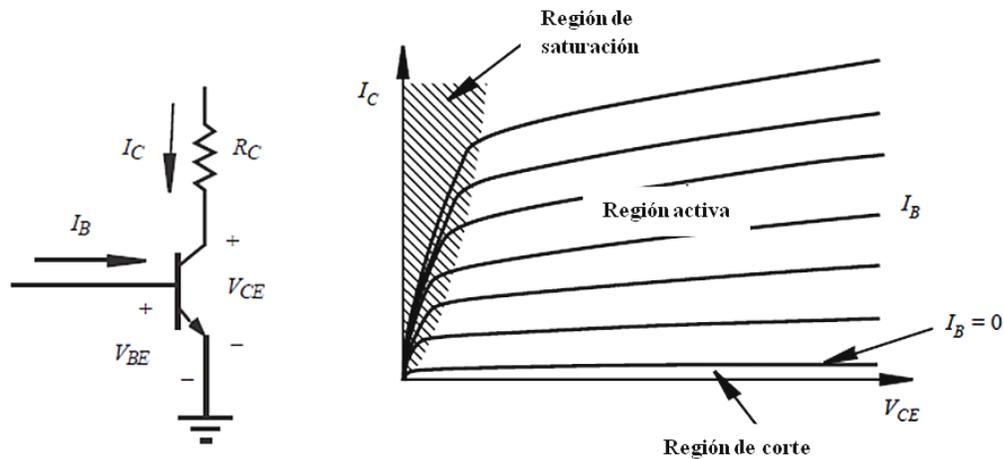


Figura 5.5 Terminales y regiones de un transistor bipolar donde, I_C es la corriente del colector, I_B es la corriente de base, V_{BE} es el voltaje entre la base y el emisor, y V_{CE} es el voltaje entre el colector y emisor [13].

Para controlar la velocidad del motor de forma automática se propuso controlar el ángulo de giro del potenciómetro principal del variador de velocidad, siendo a su vez la etapa de potencia y alimentación del motor. El BC140 al ser un amplificador de potencia lineal y el respectivo driver del motor, cuenta con las características de configuración y potencia adecuada para responder de buena forma cuando al perno se le aplique fuerza a compresión, es decir, cuando el motor tenga carga. Además, con el BC140 se han realizado una gran variedad de ensayos tribológicos para proyectos de tesis y artículos, como los enlistados en el subcapítulo 1.1, consiguiendo resultados satisfactorios.

Ésta propuesta fue posible gracias a que al desencajar la perilla del eje del potenciómetro principal del BC140, éste último tiene una geometría tal, que se le puede acoplar un servomotor rotatorio mediante el diseño de un cople y una base a la cubierta del driver. Por lo tanto, se propuso acoplarle al potenciómetro principal, mostrado en la Figura 5.6, el eje de un servomotor rotatorio para controlar el ángulo de giro. Se planteó que el servomotor sea controlado por señal PWM (Modulación por Ancho de Pulso), la cual sería la variable de salida del control PID. Haciendo una analogía, el servomotor haría el papel de la manipulación de la perilla del BC140 en vez de la mano del operario, pero con mejor tiempo de respuesta y control.



Figura 5.6 Geometría del eje del potenciómetro principal del variador de velocidad BC140.

Cabe indicar que en un futuro, para el control automático de velocidad, se considera cambiar el variador de velocidad a un sistema completamente digital o bien, a un sistema de lazo cerrado meramente eléctrico. Para una solución a corto plazo y a bajo costo, la propuesta del servomotor rotatorio fue práctica para ser implementada. Sin embargo, como se verá más adelante en la discusión, hay otra solución para el control de la velocidad del motor, que puede resultar con mejor tiempo respuesta y control, involucrando el diseño de un circuito de potencia con una fuente de alimentación independiente, variando el voltaje del motor por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) [24].

Como se puede apreciar del diagrama de la Figura 5.3, con los elementos del tribómetro coaxial involucrados en el control de velocidad, ya se cuenta con los elementos básicos para implementar un control con retroalimentación:

- ✓ **Planta:** Motor de corriente directa BALDOR CDP3330
- ✓ **Etapa de potencia:** Variador de velocidad BC140
- ✓ **Controlador digital:** Microcontrolador ARDUINO UNO
- ✓ **Medición de la variable a controlar:** Tacómetro (Disco encoder + sensor de herradura + circuito de acondicionamiento + ARDUINO UNO)

Ya que el microcontrolador ARDUINO UNO forma parte del tacómetro y es quien recibe los pulsos eléctricos del sensor de herradura, se puede tener retroalimentación de la medición de velocidad con el microcontrolador, mismo que puede usarse para programar el algoritmo de control PID. Además, este dispositivo cuenta con la capacidad de generar

señal PWM [25] para el control del servomotor rotatorio. Dada esta propuesta de sistema de control de velocidad en lazo cerrado, el siguiente paso fue agregar el elemento faltante, el servomotor rotatorio.

5.2.1 Diagrama flujo de señales del sistema de control de velocidad en lazo cerrado

Por cuestiones de programación en ARDUINO UNO y para no modificar el tacómetro ya implementado, se agregó otro microcontrolador del mismo tipo, el cual es de bajo costo y fácil de conseguir. El microcontrolador ya usado en el tacómetro se encarga de proporcionar la velocidad medida en RPM, mientras que el otro ARDUINO UNO que se incorporó al sistema de lazo cerrado se encarga de realizar la programación del control PID (Figura 3.4). Ambos microcontroladores reciben la misma señal de pulsos eléctricos que proviene del sensor de herradura. También, para contar con una mejor resolución en la medición de velocidad, se diseñó un disco encoder de 32 dientes, sustituyendo al de 8 dientes. Partiendo de las consideraciones anteriores, se procedió a realizar el diagrama de flujo del sistema de control de velocidad en lazo cerrado, expuesto en la Figura 5.7.

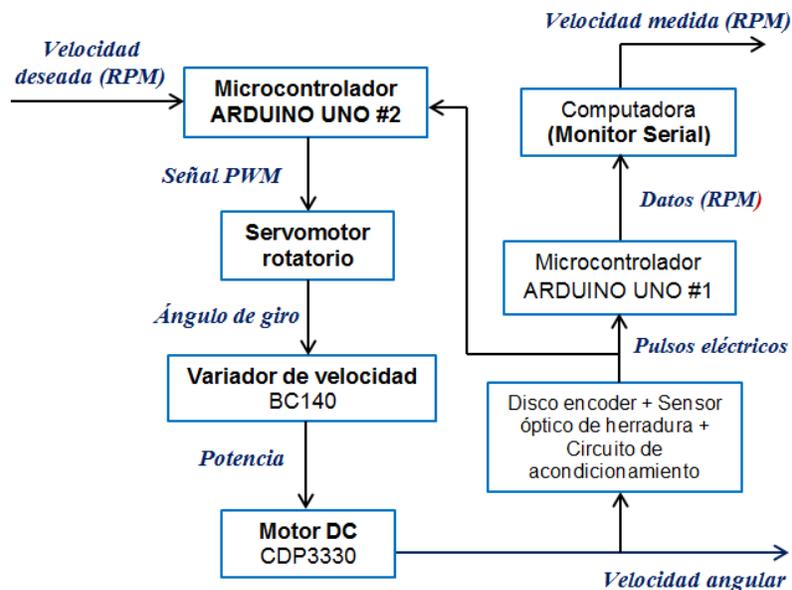


Figura 5.7 Diagrama de flujo de señales del control de velocidad en lazo cerrado. El microcontrolador agregado es el ARDUINO UNO #2.

5.2.2 Implementación del control del servomotor rotatorio

El control del servomotor rotatorio se lleva a cabo por medio de señal PWM, siendo la variable de control. La modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) de una señal, es una técnica que logra producir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital. El ciclo de trabajo describe la cantidad de tiempo que la señal está en un estado lógico alto, como un porcentaje del tiempo total que éste toma para completar un ciclo completo. La frecuencia determina que tan rápido se completa un ciclo y por consiguiente que tan rápido se cambia entre los estados lógicos alto y bajo. Al cambiar una señal del estado alto a bajo a una tasa lo suficientemente rápida y con un cierto ciclo de trabajo, la salida parecerá comportarse como una señal analógica constante cuanto esta está siendo aplicada a algún dispositivo [26]. De esta manera, se puede escribir la ecuación para el ciclo de trabajo como:

$$D = \frac{\tau}{T} * 100\% \quad (5.1)$$

donde:

$D =$ *Ciclo de trabajo*

$\tau =$ *Tiempo en que la señal es positiva o ancho de pulso*

$T =$ *Periodo*

De forma gráfica, esta señal puede representarse como en la Figura 5.8, donde el tren de pulsos en color rojo es la señal PWM, la cual puede variar su ciclo de trabajo de 0% hasta 100%, produciendo una respectiva tensión (voltaje) en corriente continua.

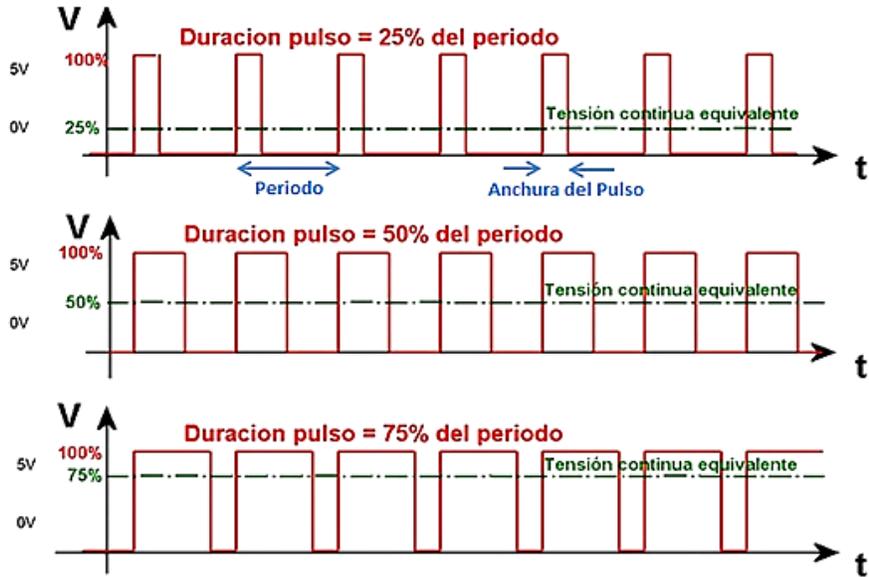


Figura 5.8 Representación gráfica de señal PWM con tres diferentes valores para el ciclo de trabajo y su respectiva tensión (voltaje) continua equivalente.

La manera en la que el servomotor rotatorio responde a la señal PWM como su alimentación, es girando cierto ángulo su eje de transmisión. Mientras más grande sea el ciclo de trabajo de la señal, o bien, la duración del ancho de pulso, el ángulo de giro será mayor. En la Figura 5.9, se puede apreciar un ejemplo del efecto mencionado.

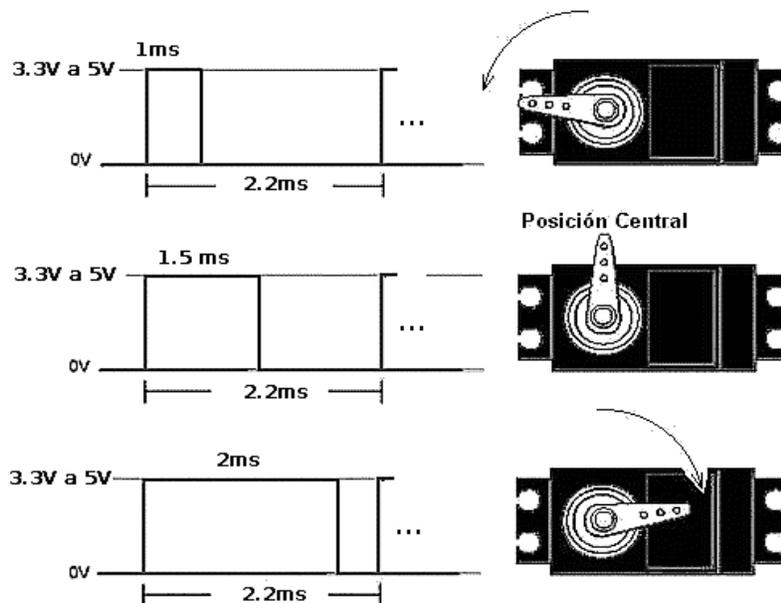


Figura 5.9 Ejemplo del comportamiento del eje de transmisión de un servomotor rotatorio al aplicarle una señal PWM con tres valores distintos para el ancho de pulso con un mismo periodo $T = 2.2(\text{ms})$.

Es importante destacar que el propio servomotor rotatorio se rige bajo un sistema de control de posición en lazo cerrado con modo de acción proporcional. Poniendo como ejemplo el diagrama esquemático de la Figura 5.10, se tiene lo siguiente: La retroalimentación se lleva a cabo por medio del potenciómetro de salida, el cual funge como sensor, obteniendo un cierto valor de voltaje de acuerdo al ángulo de giro del eje del servomotor, ya que estos dos últimos están acoplados mecánicamente. El voltaje medido es llevado al dispositivo de medida del error, donde se restará a al valor de la entrada de referencia (valor de voltaje del potenciómetro de entrada). Al resultado se le aplicará una ganancia K_1 , siendo proporcional al error calculado.

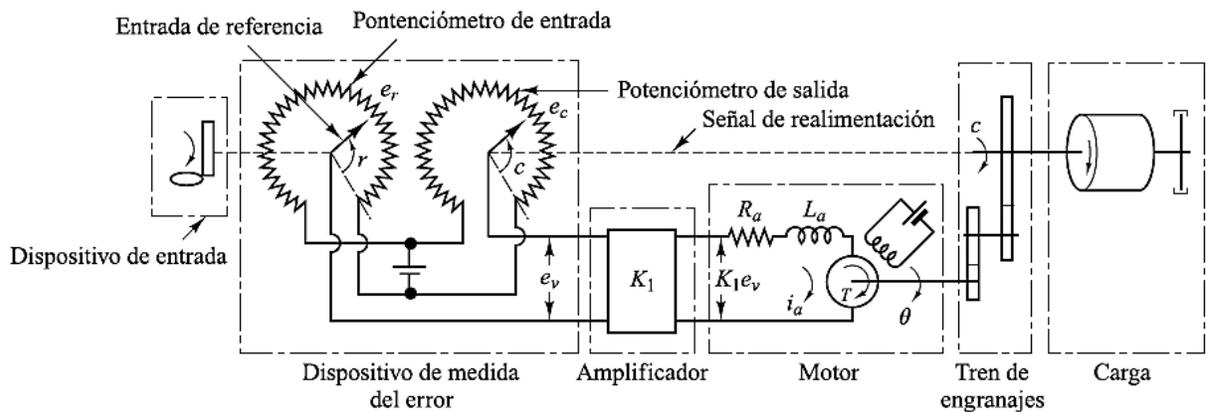


Figura 5.10 Diagrama esquemático de un servosistema controlado por señal PWM [11].

Donde:

- r = Posición angular de referencia
- c = Posición angular de salida
- e_r = Voltaje proporcional a r
- e_c = Voltaje proporcional a c
- e_v = Error de voltaje: $e_r - e_c$
- K_1 = Amplificador de ganancia constante
- i_a = Corriente del inducido
- R_a = Resistencia de la armadura
- L_a = Inductancia de la armadura
- T = Torque generado
- θ = Desplazamiento angular del eje del motor

Por otro lado, para el caso en que el servomotor es controlado por señal PWM, la entrada de referencia pasa a ser la misma señal PWM. El lazo cerrado tendría una construcción como en la Figura 5.11, donde el circuito eléctrico realiza la función de dispositivo de medida y de amplificador, aplicando la acción de control proporcional. Tal configuración es la que conforma al servomotor rotatorio del tipo HD1501MG de 17 Kg-cm de torque, con engranes metálicos y velocidad de operación de 0.14 sec/60° a 6 (V); siendo este servomotor el que se usó para el control del ángulo de giro del potenciómetro principal del BC140, cuyos elementos principales se señalan en la Figura 5.12.

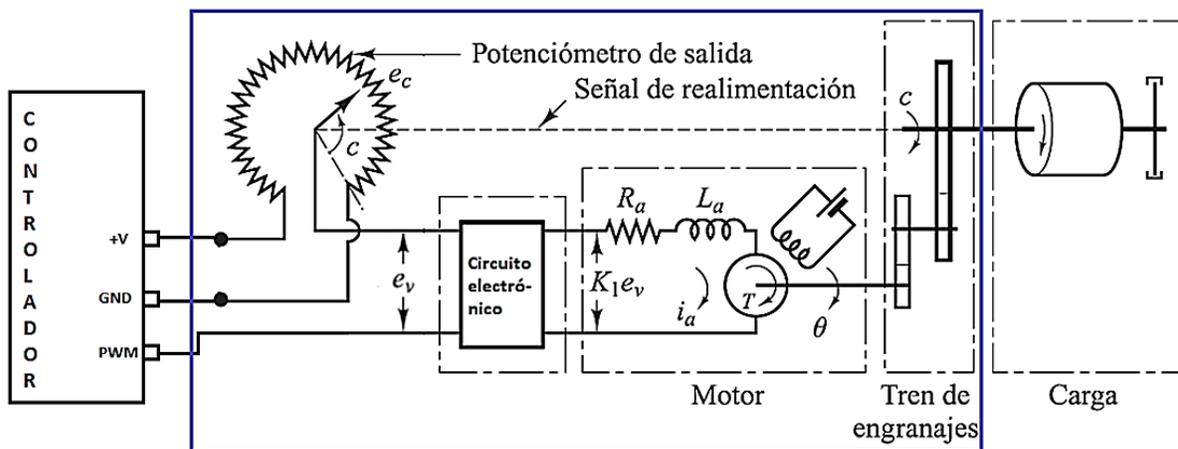


Figura 5.11 Diagrama esquemático que muestra el control de posición de un servomotor rotatorio alimentado con señal PWM.

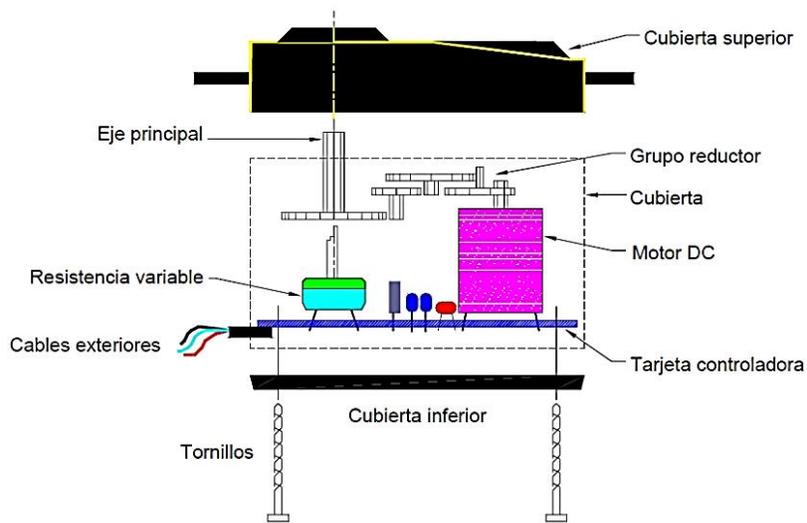


Figura 5.12 Elementos que conforman al servomotor rotatorio del tipo HD1501MG.

5.2.2.1 Acoplamiento del servomotor rotatorio

Para acoplar el eje del servomotor al potenciómetro del BC140, se diseñó el acoplamiento mostrado en la Figura 5.13. Las piezas diseñadas son de acrílico y están ensambladas por medio de tornillos y sus respectivas tuercas. Las geometrías y forma de acople fueron diseñadas para que en caso de querer usar el control manual de velocidad, se pueda quitar con facilidad el servomotor rotatorio junto con su base y cople del BC140.

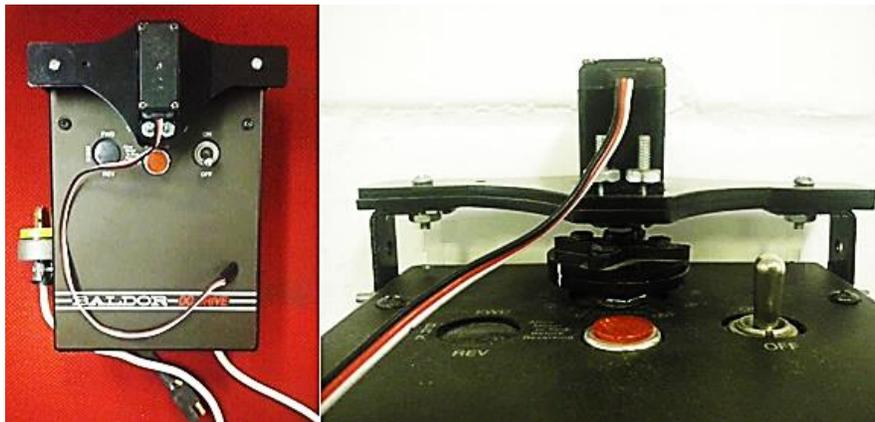


Figura 5.13 Base y cople para unir al potenciómetro principal del BC140 con el eje del servomotor rotatorio.

La manera en la que queda acoplado el eje del servomotor al potenciómetro del BC140 permite que, con un ciclo de trabajo del 0%, este se encuentre posicionado al tope de su sentido levógiro con 0% de velocidad (de acuerdo a la acotación de la Figura 5.6), por lo tanto sin potencia alguna hacia el motor. Además, dado que el eje del servomotor se eligió para que pueda rotar hasta 60°, se tiene un límite mecánico para la velocidad máxima y mínima. Con estos límites mecánicos se consigue que el eje del servomotor rote libremente sin dañar la estructura del potenciómetro principal del driver.

Otro punto a mencionar es que, para que el control tanto de carga y velocidad inicien y finalicen al mismo tiempo, se conectó un puerto digital del microcontrolador ARDUINO UNO #2 a un puerto digital del módulo de interconexión IMC1460, para que cuando desde LabVIEW se dé la señal de iniciar el ensayo tribológico por medio del botón *Carga Estabilizada >>>INICIAR ENSAYO*, se accione el servomotor mediante la respuesta del

control PID de velocidad para llevar al perno hacia el régimen de giro deseado. Cuando el tiempo del ensayo termina, se sobrepasa el límite de seguridad de carga o cuando el botón de paro sea oprimido, el servomotor inmediatamente regresa a su posición de inicio “HOME”, provocando que la velocidad del perno sea cero. Con el fin de aislar las tierras y proteger al IMC1460 de alguna sobrecarga por parte del microcontrolador, la conexión de estos pines digitales se hizo por medio de un optoacoplador.

5.2.3 Estabilidad del sistema de velocidad

En base a los criterios de estabilidad vistos en el acápite 2.1.3, el sistema de velocidad del tribómetro coaxial es un sistema lineal e invariante con el tiempo, estable y del tipo SISO, ya que:

- ✓ Produce una salida acotada ante una entrada acotada.

Para esta prueba, el perno acoplado al motor no tenía contacto con ninguna muestra, es decir, rotaba libremente. La entrada para probar el criterio de estabilidad fue del tipo escalón ($u(t) = B$ para $t > 0$ y 0 para $t < 0$), donde B corresponde a un ángulo de giro de la perilla del BC140, con lo que el sistema de control de velocidad responde llevando al perno a una correspondiente velocidad acotada. Por lo tanto, el sistema de control de velocidad es útil para ser controlado.

5.2.4 Requerimientos y especificaciones para el control de velocidad

Tomando en cuenta las mismas consideraciones con respecto al criterio de selección de los requerimientos cuantitativos y especificaciones vistos en el acápite 4.2.4, se tiene lo siguiente:

➤ **Requerimientos cualitativos:**

- Una vez teniendo la carga estabilizada y al dar señal de inicio del ensayo tribológico, el perno debe de alcanzar la velocidad deseada lo más rápido posible,

no importando si se tiene un leve sobrepaso al inicio, manteniendo el régimen de giro constante el mayor tiempo posible durante el ensayo.

➤ **Requerimientos cuantitativos:**

- Control de velocidad para un rango de 30 a 400 (RPM).

➤ **Especificaciones:**

- El tiempo de retardo debe ser igual o menor a 2.5 segundos.
- El sobrepaso máximo debe ser menor o igual al 25(%).
- El tiempo pico permitido debe ser menor o igual a 3.5 segundos.
- El valor de velocidad en estado estable no debe superar su valor ± 20 (RMP).

5.2.5 Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad en lazo cerrado

Teniendo todos los elementos que conforman el lazo cerrado de control de velocidad, se realizó el diagrama de bloques mostrado en la Figura 5.14, del cual se dio paso para llevar a cabo la programación del algoritmo de control PID (Figura 3.4) en el microcontrolador ARDUINO UNO.

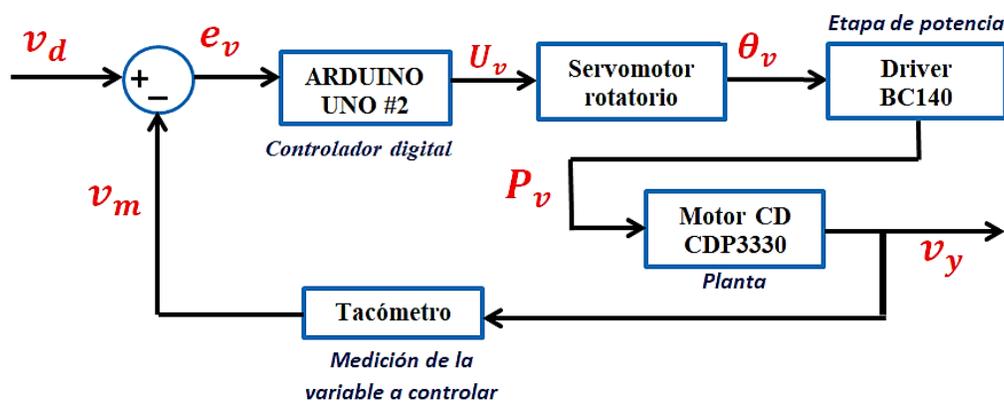


Figura 5.14 Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad en lazo cerrado, donde las variables involucradas están en función del tiempo (s).

Donde:

v_y = *Variable a controlada: Velocidad*

v_d = *Velocidad deseada (RPM)*

v_m = *Velocidad medida (RPM)*

e_v = *Señal de error: ($v_d - v_m$)*

U_v = *Señal de control: PWM*

θ_v = *Ángulo de giro (°)*

P_v = *Potencia entregada al motor*

5.2.6 Programación en ARDUINO UNO

La programación para el control de velocidad se realizó en el IDE de ARDUINO (editor de texto para el código de en el lenguaje de alto nivel basado en C++) [25]. La estrategia de programación fue haciendo uso de librerías, funciones y bucles. Esta programación controla los movimiento del servomotor rotatorio y por consiguiente la velocidad del motor. A continuación, en la Figura 5.15 se presenta el algoritmo de programación realizado para el control automático de velocidad.

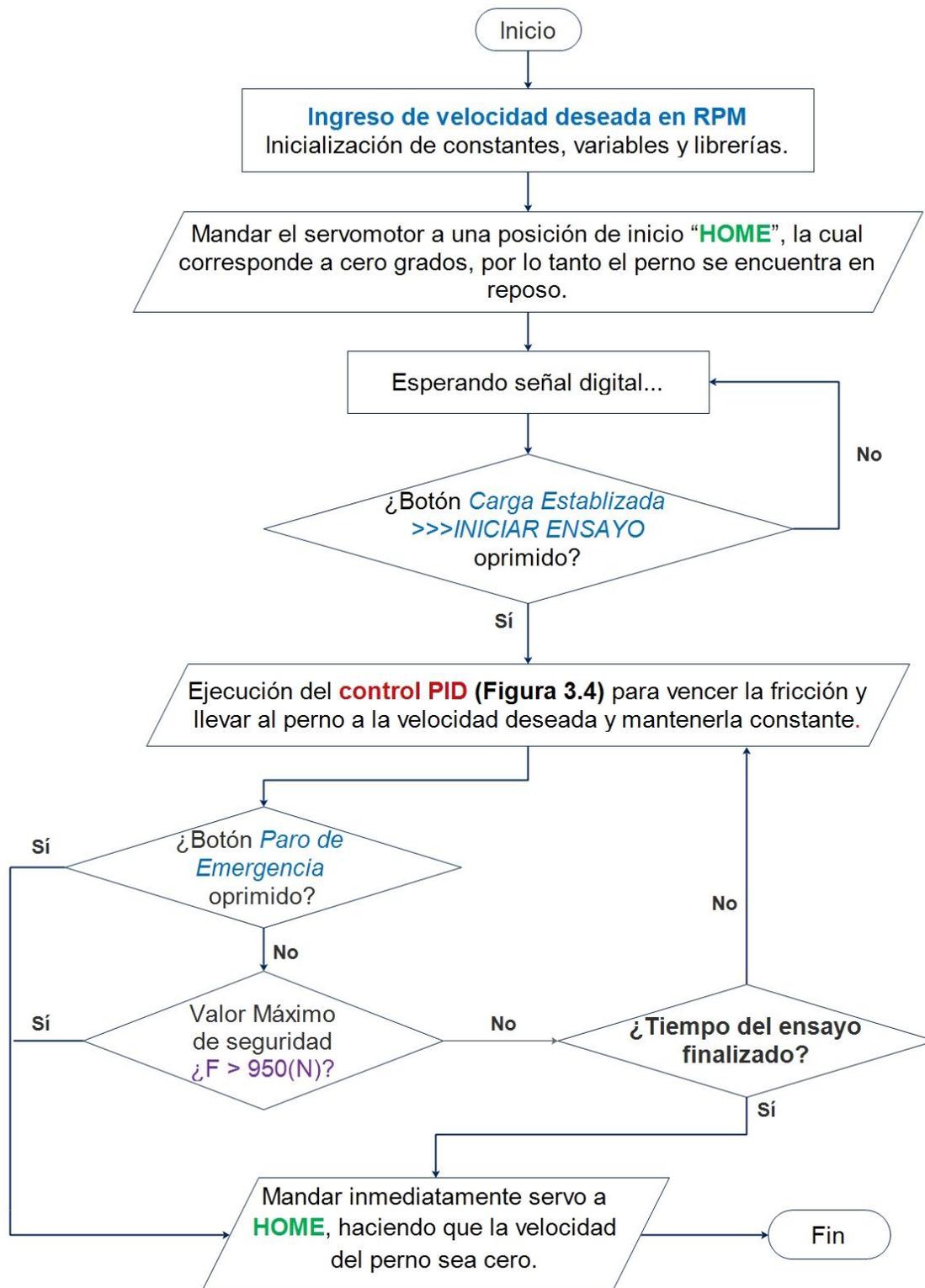


Figura 5.15 Diagrama de flujo de programación para el control de giro del servomotor rotatorio.

Capítulo 6 Pruebas y resultados

6.1 Curvas de fuerza y velocidad obtenidas con el control automático

Para probar el control automático de fuerza y velocidad implementado en el tribómetro coaxial se efectuaron tres ensayos tribológicos con dos materiales distintos. Los parámetros de entrada usados se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Parámetros de entrada en los ensayos realizados.

Ensayo	Material	Tiempo (min)	Fuerza (N)	Velocidad (RPM)
1	SAE783 1mm 300° 30'	2	260	220
2	SAE783 1mm 300° 30'	2	110	140
3	Cu-11.8% Al-0.5% Be	60	400	60

Como se puede ver en la Tabla 6.1, los ensayos se propusieron para corroborar la validez del control automático en dos partes principales:

1. Control de fuerza y velocidad cuando una vez estabilizada la carga deseada se induce el régimen de giro. Aquí, para vencer la fricción entre el perno y la muestra, se presentan los cambios más significativos en las variables involucradas.
2. Control de fuerza y velocidad durante un largo periodo de tiempo, donde el desgaste puede presentarse de manera significativa.

En las gráficas mostradas a continuación, de la Figura 6.1 a la 6.10, se aprecia la manipulación de las variables (fuerza y velocidad) por parte del control PID en base a las características y propiedades del material. La línea recta en color negro que aparece en las gráficas indica la referencia del valor deseado.

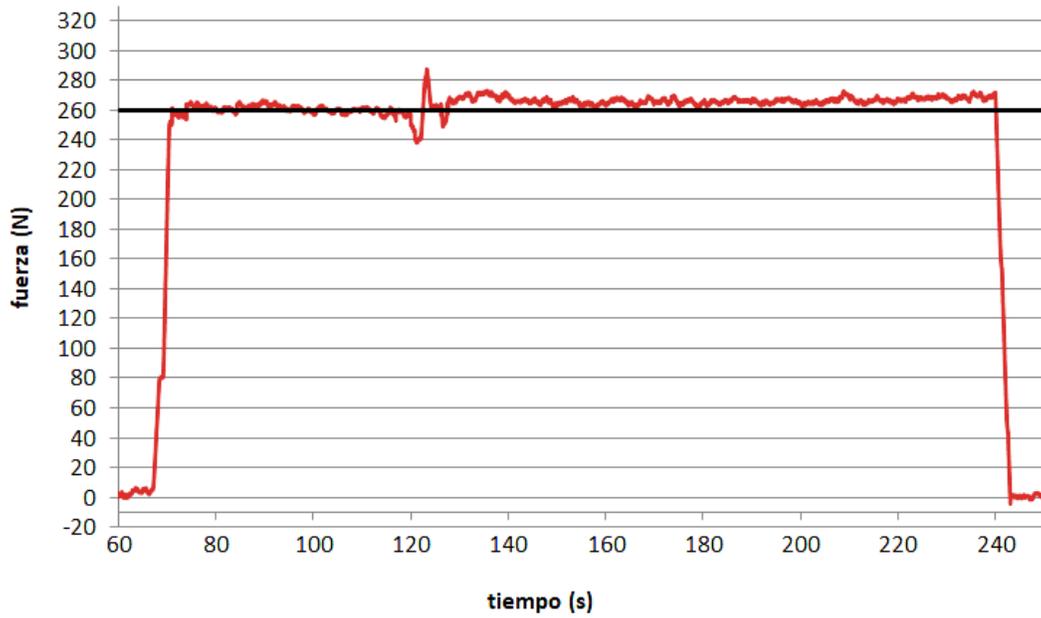


Figura 6.1 Curva de fuerza generada a partir del Ensayo 1, con una carga deseada de 260(N).

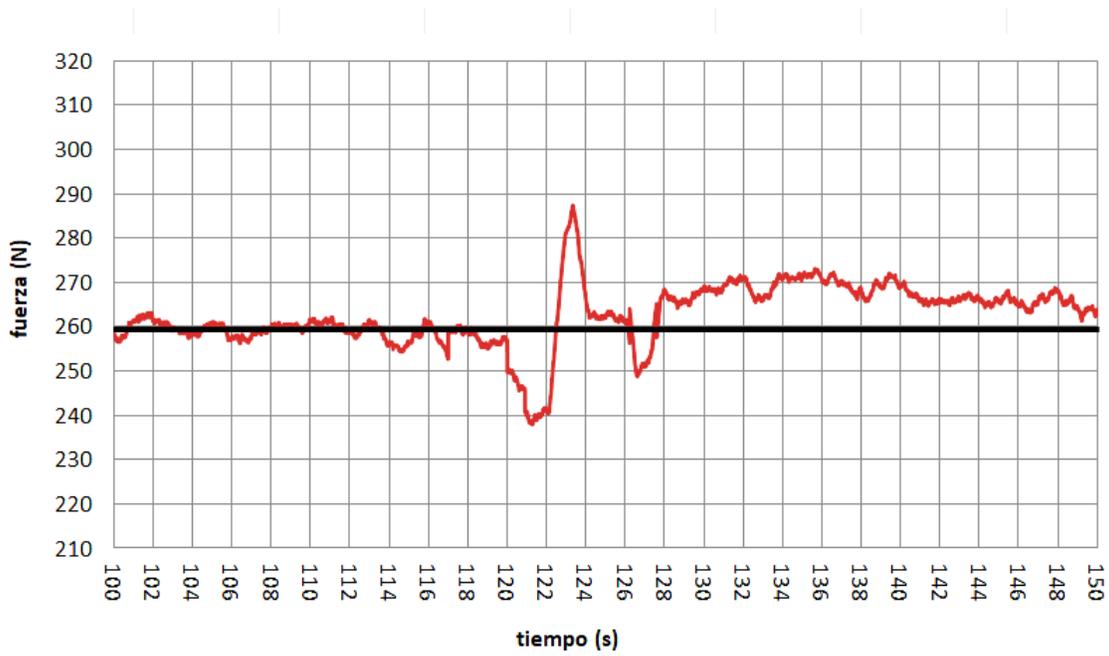


Figura 6.2 Sección de la gráfica de la figura 6.1, donde se observa la respuesta por parte del control PID de carga una vez aplicada la velocidad en el perno en el segundo 120 y llegando al estado estable en el segundo 124.

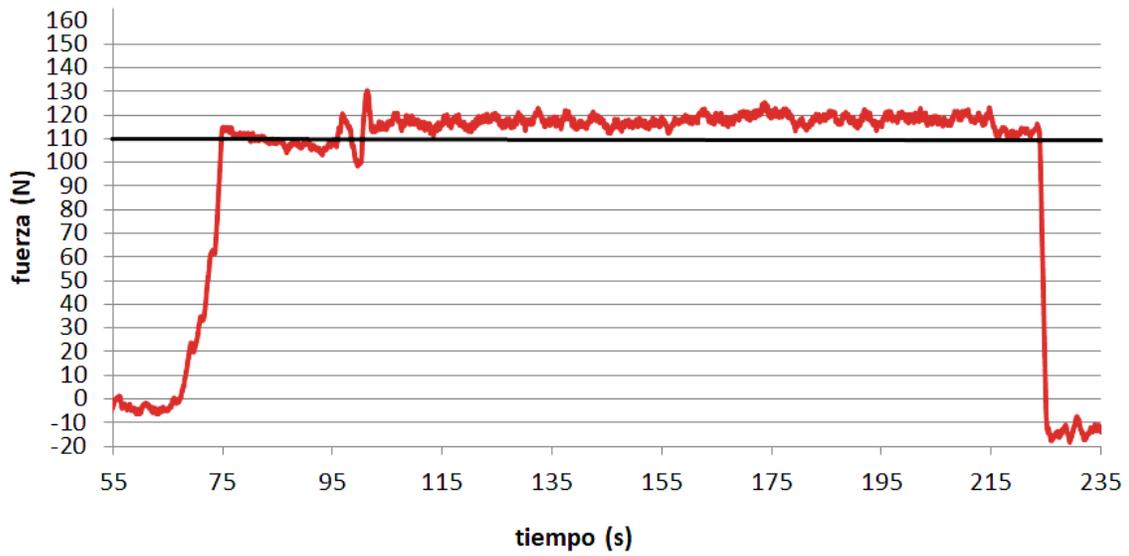


Figura 6.3 Curva de fuerza generada a partir del Ensayo 2, con una carga deseada de 110(N).

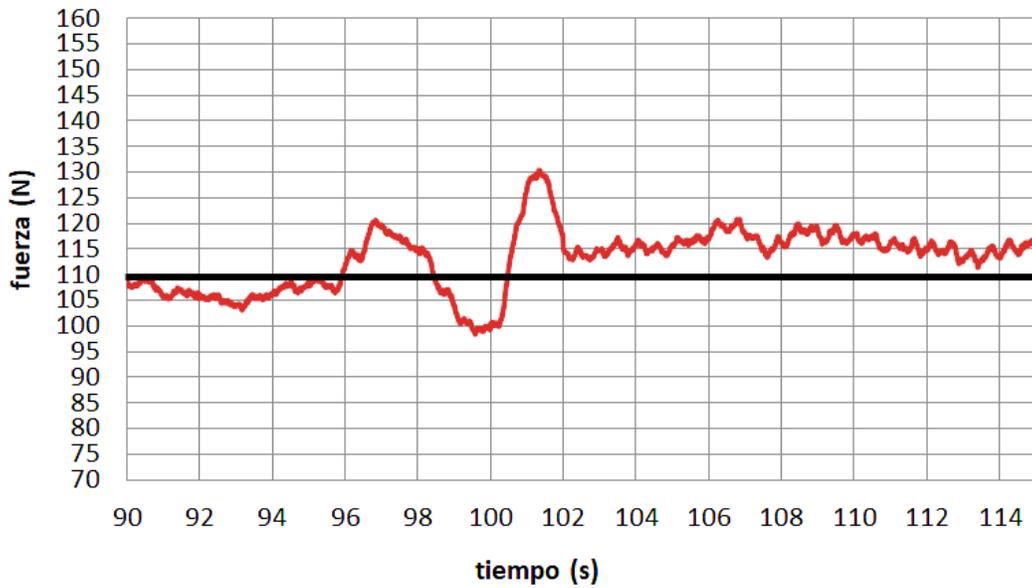


Figura 6.4 Sección de la gráfica de la figura 6.3, donde se observa la respuesta por parte del control PID de carga una vez aplicada la velocidad en el perno en el segundo 96 y llegando al estado estable en el segundo 102.

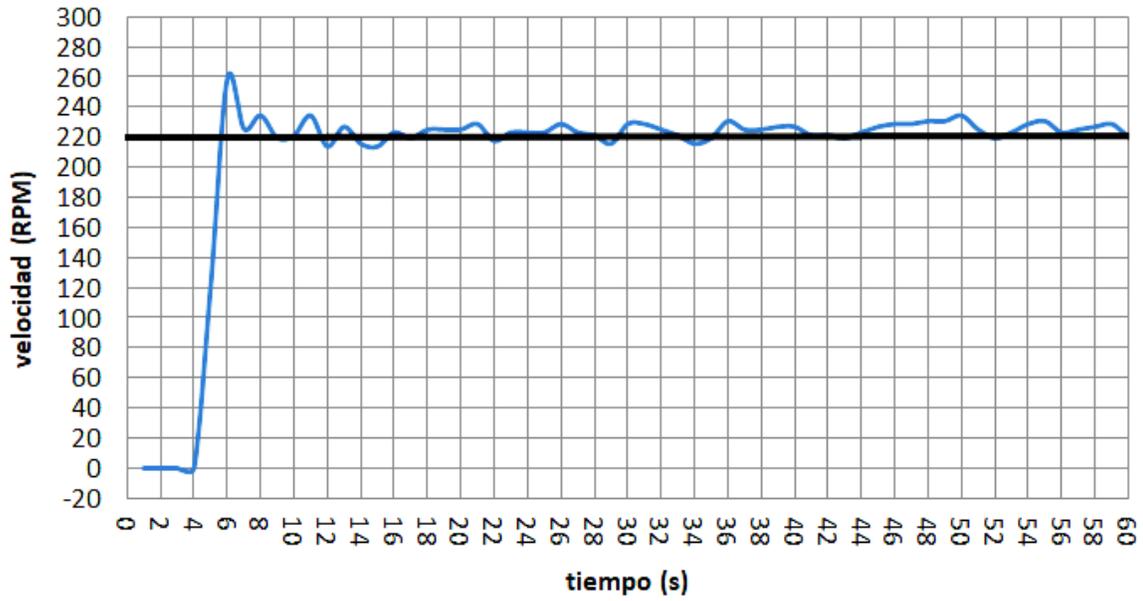


Figura 6.5 Curva de velocidad generada a partir del Ensayo 1, con un régimen de giro deseado de 220(RPM). Se muestra la curva hasta el segundo 60, ya que a partir del segundo 7 se entra en estado estable.

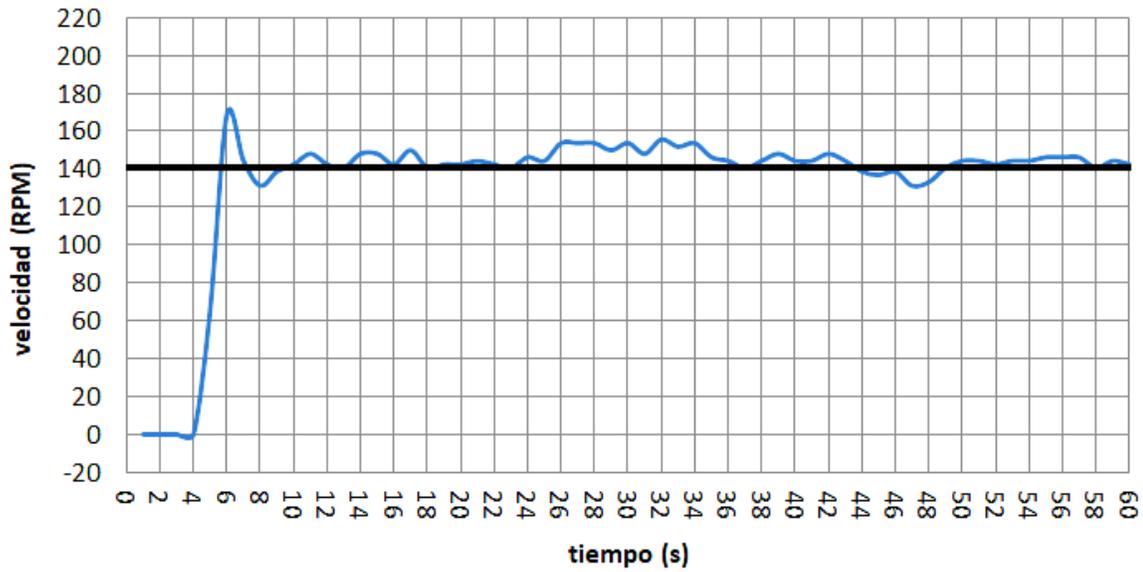


Figura 6.6 Curva de velocidad generada a partir del Ensayo 2, con un régimen de giro deseado de 140(RPM). Se muestra la curva hasta el segundo 60, ya que a partir del segundo 8 se entra en estado estable.

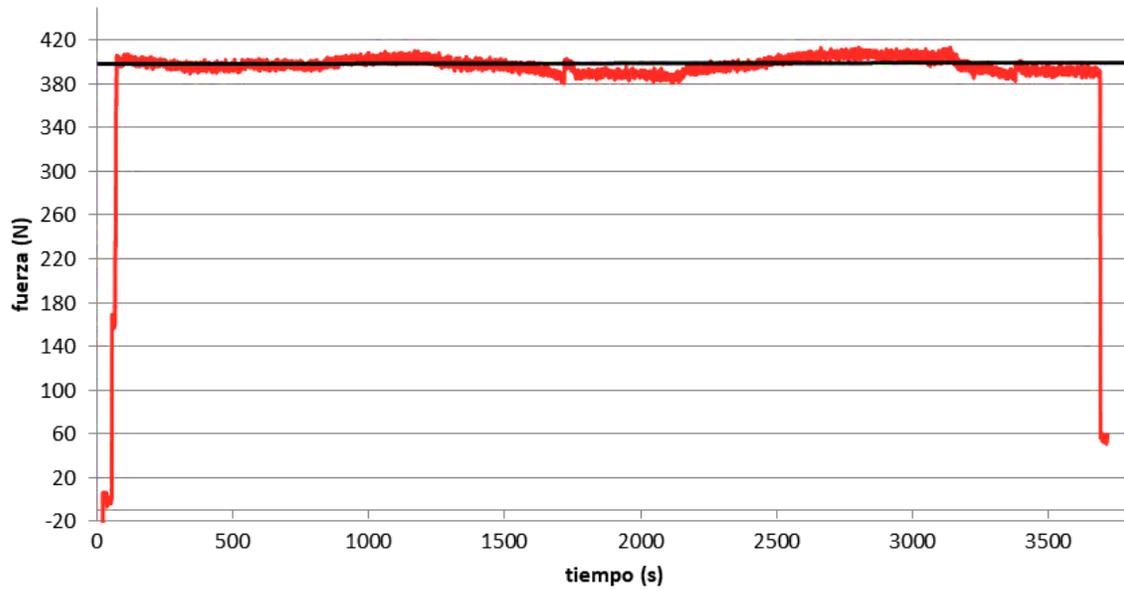


Figura 6.7 Curva de fuerza generada a partir del Ensayo 3, con una carga deseada de 400(N).

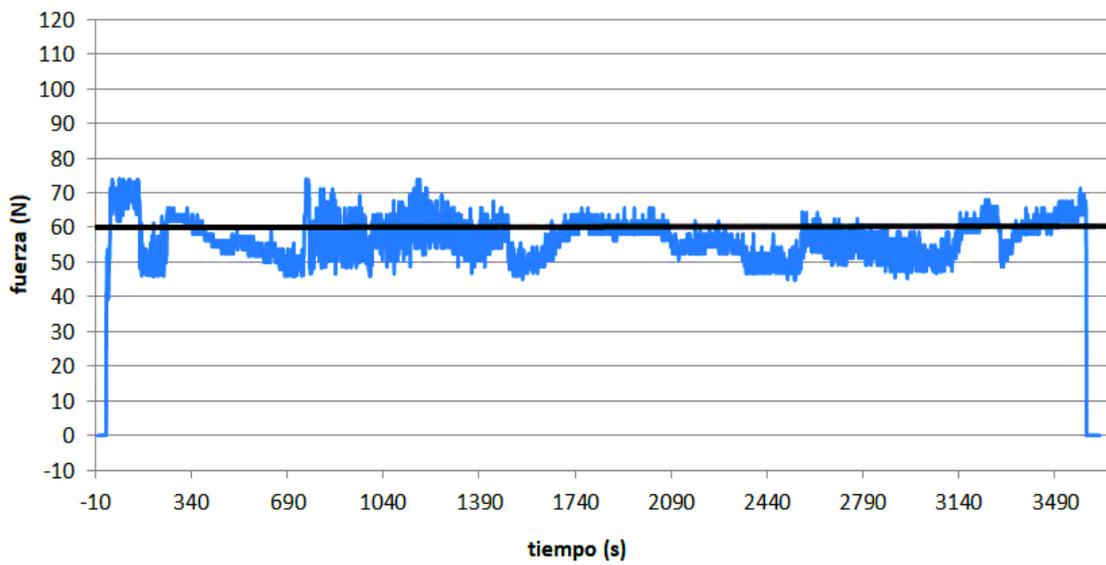


Figura 6.8 Curva de velocidad generada a partir del Ensayo 3, con un régimen de giro deseado de 60(RPM).

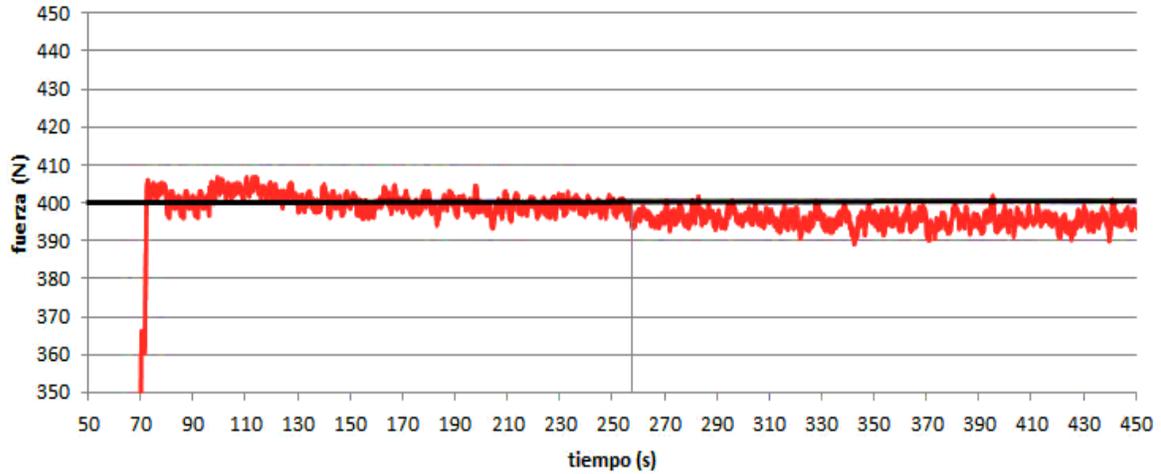


Figura 6.9 Sección de la gráfica de la figura 6.7. El ensayo comienza en el segundo 257 y como se puede observar en la curva, el material presenta propiedades tales que la fricción generada al inicio del ensayo es mínima, por lo cual no altera en gran medida a la carga establecida.

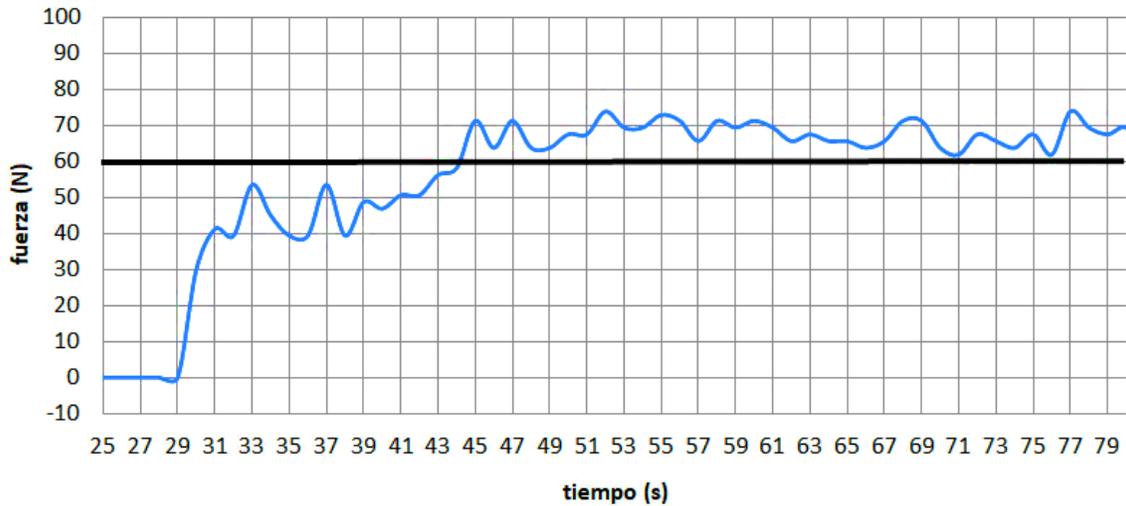


Figura 6.10 Sección de la gráfica de la figura 6.8. Como puede observarse, debido a las propiedades del material, a causa de presentarse muy poca fricción no se tiene un “amarre” al inicio del ensayo, por lo que no se tiene un sobrepaso considerable. Se entra en estado estable en el segundo 31.

6.2 Análisis de resultados

De los datos obtenidos en las gráficas ilustradas en el subcapítulo anterior, se realizó el análisis correspondiente del control automático de fuerza y velocidad, verificando que las especificaciones en base a los requerimientos solicitados se cumplan. Para mostrar la validez del control, se elaboraron las Tablas 6.2 y 6.3, para las cuales, se tomó en cuenta los datos de los parámetros de entrada de la Tabla 6.1, las especificaciones de diseño de los acápites 4.2.4 y 5.2.4, el uso de la Figura 2.7, el uso de la Ecuación 2.1, y la información obtenida de las gráficas del subcapítulo anterior.

Tabla 6.2 Análisis de las especificaciones de diseño solicitadas para el control de carga.

Número de ensayo	1	2	3
Fuerza deseada (N)	260	110	400
F_p (N)	287	131	No aplica
M_p (%)	10.4	19.1	No aplica
$\dot{M}_p \leq 20$ (%)?	Cumple	Cumple	Cumple
t_s (s)	4	6	1
t_p (s)	0.8	5.7	No aplica
$F_{e\ max}$ (N)	275	125	415
$F_{e\ min}$ (N)	245	95	385
$\dot{F}_{e\ min} < c(t_s) < F_{e\ max}$?	Cumple	Cumple	Cumple

Tabla 6.3 Análisis de las especificaciones de diseño solicitadas para el control de velocidad.

Número de ensayo	1	2	3
Velocidad deseada (RPM)	220	140	60
t_d (s)	0.9	1	1
$\dot{t}_d \leq 2.5$ (s)?	Cumple	Cumple	Cumple
t_p (s)	2.1	2.2	No aplica
$\dot{t}_p \leq 3.5$ (s)?	Cumple	Cumple	Cumple
V_p (RPM)	262	173	No aplica
M_p (%)	19.1	23.6	No aplica
$\dot{M}_p \leq 25$ (%)?	Cumple	Cumple	Cumple
t_s (s)	3	3	2
$V_{e\ max}$ (RPM)	240	160	80
$V_{e\ min}$ (RPM)	200	120	40
$\dot{V}_{e\ min} < c(t_s) < V_{e\ max}$?	Cumple	Cumple	Cumple

Donde:

M_p	=	<i>Porcentaje de sobrepaso máximo</i>
t_p	=	<i>Tiempo pico</i>
t_d	=	<i>Tiempo de retardo</i>
t_s	=	<i>Tiempo de asentamiento</i>
$c(t_s)$	=	<i>Valor de la variable a controlar en estado estable</i>
F_p	=	<i>Valor de fuerza en tiempo pico</i>
$F_{e\ max}$	=	<i>Fuerza máxima permitida en estado estable</i>
$F_{e\ min}$	=	<i>Fuerza mínima permitida en estado estable</i>
V_p	=	<i>Valor de velocidad en tiempo pico</i>
$V_{e\ max}$	=	<i>Velocidad máxima permitida en estado estable</i>
$V_{e\ min}$	=	<i>Velocidad mínima permitida en estado estable</i>

Como se observa de la Tabla 6.2 y 6.3, el control automático de fuerza y velocidad cumple con las especificaciones en base a los requerimientos solicitados. Por lo tanto, el análisis del comportamiento y propiedades obtenidas del material ensayado con el control automático implementado es confiable.

De las gráficas obtenidas, el tiempo en el que se llega al estado estable se concluyó con respecto al valor permitido de la tolerancia al error en estado estable, la cual fue bastante flexible. Es por ello que en el caso del tercer ensayo, el tiempo pico, sobrepaso máximo y tiempo de levantamiento no aplican, ya que los valores arrojados una vez iniciado el ensayo, entran en la tolerancia del error en estado estable. La principal razón de la flexibilidad y tolerancia del error en estado estable son las siguientes:

- Con un desplazamiento pequeño, la carga aumenta rápidamente y se eleva a un valor relativamente grande.
- La precisión de la celda de carga al encontrarse en contacto con el movimiento rotacional del perno se ve ligeramente afectada. Además, la sensibilidad de este sensor es alta.
- El redondeo de los resultados en las operaciones y la velocidad de reloj con la que opera el microcontrolador ARDUINO UNO no es favorable.

Otro punto a mencionar es que, la sintonización de las constantes de control PID (K_p , K_i y K_d) para el control de carga y velocidad se realizó en el sitio, de forma manual y mediante el método de sintonización en lazo cerrado, operando con una pieza del material SAE783 (usando piezas cuadradas de 2 x 2 (cm) y 1 (mm) de espesor). El modo de acción para el control de carga fue un PID y para el control de velocidad se usó un PI. Para cumplir con las especificaciones de diseño, bastó con modificar las constantes de control (Tabla 2.1) hasta cumplir con las especificaciones de diseño. Se optó por una sintonización manual y en lazo cerrado, dado que, las condiciones de inicio del ensayo tribológico comienzan con una carga aplicada, lo cual involucra la presencia de un material en específico sobre el cual se le aplique movimiento relativo, por lo que la ganancia debe ser lo suficientemente drástica para vencer la fricción.

Debe tomarse en cuenta que, en ocasiones puede que no se cumplan todas las especificaciones de diseño para el rango de requerimientos establecido, dado que se puede tener un material que al inicio del ensayo presente elevada fricción y para vencerla se demande un sobrepaso mayor al límite establecido, así como un tiempo de levantamiento y tiempo pico mayor; o bien, que en algún momento del ensayo se presente desgaste de manera significativa, provocando que el cambio en la estructura en la superficie del material cause nuevamente perturbaciones, causando que la velocidad en el perno se detenga, provocando nuevamente requerir un sobrepaso y tiempo pico para vencer nuevamente la fricción estática, donde esta podría ser mayor o menor que en el inicio del ensayo.

No obstante, partiendo de la sintonización realizada con la cual se encuentra programado el control automático de carga y velocidad, sirve para hacer comparaciones con distintos parámetros para un mismo material, o bien, mismos parámetros de entrada para distintos materiales, cuyos valores entren dentro de los requerimientos establecidos anteriormente, donde, para el caso en el que las especificaciones no lleguen a cumplirse, la respuesta transitoria obtenida seguirá siendo de gran importancia para el estudio del material. El resultado de tales comparaciones se vería reflejado principalmente en la respuesta

transitoria de curvas superpuestas de torque y de la evolución del coeficiente de fricción. Como ejemplo de tales comparaciones, se muestra la siguiente gráfica en la Figura 6.11.

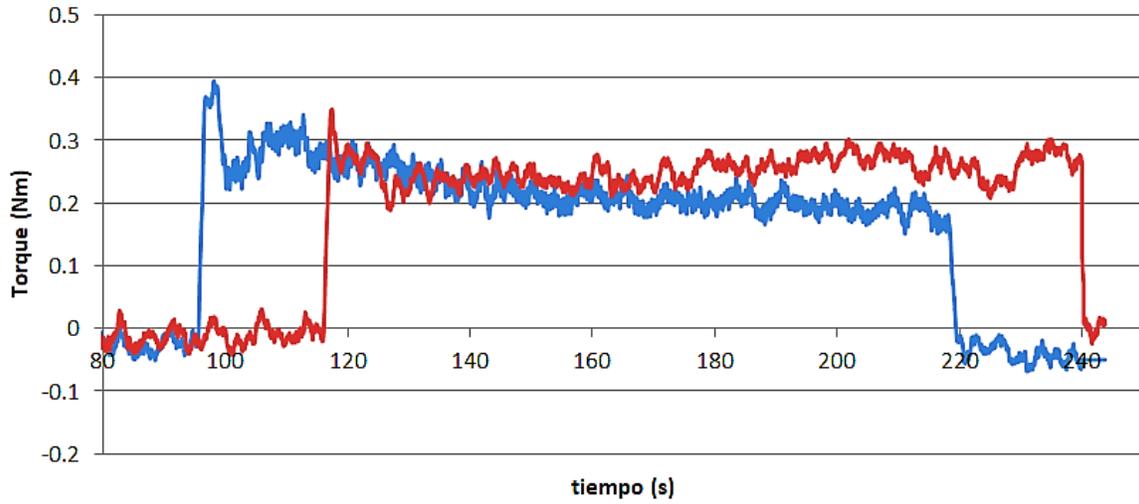


Figura 6.11 Curvas de torque obtenidas de los Ensayos 1 y 2 (color azul y rojo respectivamente).

Discusión

La propuesta de control automático para fuerza y velocidad se eligieron por la facilidad de implementación, bajo costo y la posibilidad de obtener resultados a corto plazo. Durante el desarrollo del proyecto, en todo momento se tomó en cuenta la necesidad de los alumnos que estaban elaborando su proyecto de investigación mediante el uso del equipo. Se puede considerar que el resultado obtenido corresponde a una mejora considerable en términos de la calidad de los resultados obtenidos en dichos proyectos. Sin embargo, se puede mejorar aún más el control automático de los ensayos tribológicos.

La implementación del control automático de carga fue una buena opción, pues bastó con realizar programación correspondiente desde LabVIEW, sin la necesidad de agregar algún elemento al lazo de control, ya que los elementos del sistema de control de carga fueron capaces y funcionales para poder implementar un control PID, realizando la tarea de control de forma satisfactoria. Por otro lado, para el caso del control automático de velocidad, hay que resaltar nuevamente que la propuesta del servomotor rotatorio fue para hacer uso del mismo driver del motor, con el cual se han obtenido buenos resultados en ensayos tribológicos realizados para proyectos de tesis y artículos, con diversos materiales y aplicando variados rangos de carga y velocidad. Pero el uso del servomotor rotatorio acoplado al driver BC140 no es lo más usual para contar con un sistema de control en lazo cerrado.

Para el control de velocidad en un sistema de control en lazo abierto puede ser más conveniente el uso de un amplificador de potencia lineal. Pero para un control en lazo cerrado el método más común consiste en variar el voltaje del motor por Modulación de Ancho de Pulso (PWM) [13]. Las inductancias internas de la señal del motor suavizan estas señales PWM en un nivel de voltaje que es proporcional al ciclo de trabajo PWM [24].

Se plantea que a futuro el lazo cerrado de control de velocidad se lleve a cabo con dispositivos meramente eléctricos y bajo la técnica de control PID, de tal manera que las sintonizaciones permitan extenderse a una variedad de requerimientos y especificaciones para los materiales a evaluar, dado que, con los efectos que se logran al modificar las ganancias del compensador PID, se puede modificar la respuesta transitoria, como los parámetros vistos en la Figura 2.7. A continuación, en la Figura 7.1, se expone un diagrama esquemático donde se involucran dispositivos electrónicos en un sistema de lazo cerrado para el control de velocidad por medio de señal PWM. Tal esquema sería la base para la implementación del hardware requerido en el control automático de velocidad.

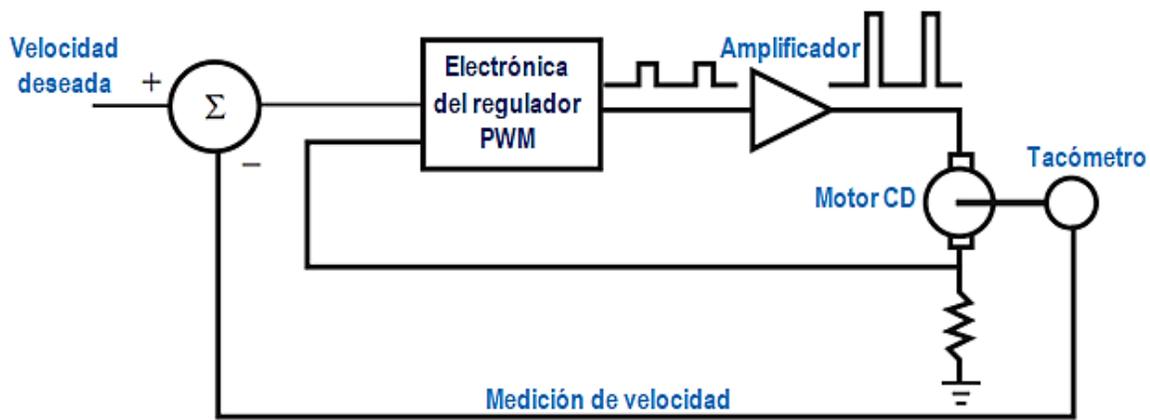


Figura 7.1 Diagrama esquemático para el control de velocidad en lazo cerrado por señal PWM [13].

Se requiere de un estudio en particular de circuitos de potencia, de tal manera que sean funcionales para las especificaciones y requerimientos solicitados. En la literatura existen muchas configuraciones para alimentar y controlar motores de corriente directa mediante señal PWM, haciendo uso de una gran variedad de dispositivos electrónicos y sus tecnologías. Dependiendo la aplicación, se puede hacer uso de dispositivos semiconductores como son los FET, JFET, MOSFET e IGBT, los cuales son dispositivos que pueden describirse como amplificadores de transconductancia, lo que significa que la corriente de salida está controlada por un voltaje de entrada (como puede ser la señal PWM), de tal manera que un voltaje de alimentación de corriente directa se pueda

conmutar rápidamente a una frecuencia fija f entre dos valores (por ejemplo, ON y OFF) y así alimentar a un motor de CD [13]. La señal PWM es ideal para controlar el transistor de potencia con controladores digitales [24].

El método de control más frecuente para los motores de corriente continua es un interruptor lado-bajo con una señal de accionamiento PWM. Como se ilustra en la Figura 7.2, el interruptor lado-bajo se refiere a la colocación del dispositivo semiconductor de conmutación de potencia activa, situado entre el motor y el común [24]. Como ejemplo de un amplificador de transconductancia actuando como interruptor lado-bajo, en Figura 7.2 se tiene que, si la compuerta g está conectada a tierra ($V_g = 0$), no fluye una corriente de drenaje I_d , con lo que el MOSFET entra en la región de corte. Cuando $V_g > V_t \approx V_{dd}$, el MOSFET entra en saturación dando como resultado un voltaje (V_s) casi completo de la fuente de alimentación [13].

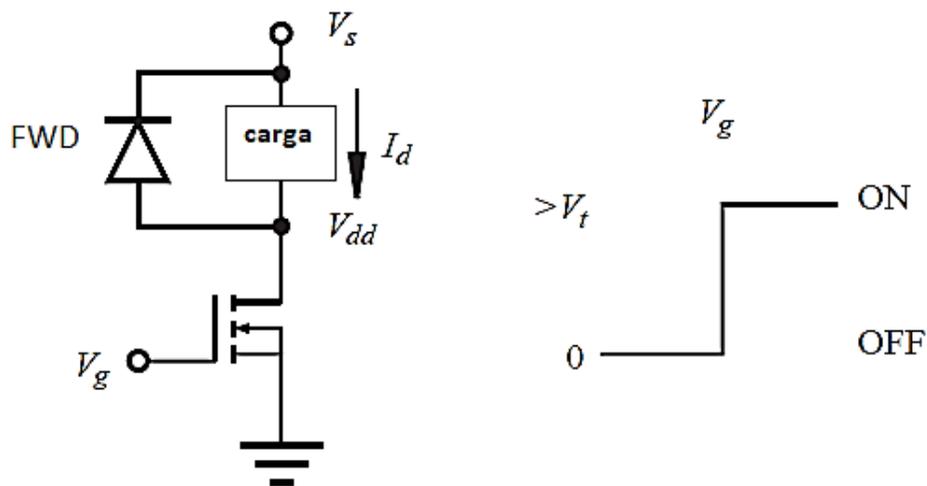


Figura 7.2 Circuito interruptor de potencia del MOSFET [13].

La programación empleada para el control de velocidad usando el servomotor rotatorio sería prácticamente la misma que la que se usaría al implementar la propuesta de control vista en esta discusión, solo que esta vez, la señal PWM sería la señal de control directa del

motor y se tendría una sintonización distinta. Cabe enfatizar que esta solución vendría a la mano de un cambio de controlador digital.

Un último punto a mencionar es que, para el diseño del control automático no se realizó un modelado matemático de las plantas, ya que por la forma en la que se implementaron los lazos cerrados de ambos sistemas, convenía usar procedimientos experimentales para la sintonía de los compensadores PID. Sin embargo, para el control de velocidad a futuro, se plantea obtener un modelo matemático del motor, y haciendo uso de la transformada de Laplace (técnica para que una ecuación diferencial ordinaria se puede transformar en una ecuación algebraica, donde las variables se convierten en funciones de la variable compleja s en lugar del tiempo t , y las derivadas se convierten en potencias de s [13]) obtener una función de transferencia (Esta función de transferencia $G(s)$ relaciona la velocidad de salida del motor $C(s)$ con el voltaje de entrada $R(s)$, donde el polinomio en s en el denominador se conoce como la ecuación característica, determinando el orden del sistema, con lo cual se puede predecir la estabilidad y comportamiento del mismo [13]), ya que el sistema de control de velocidad es del tipo SISO, de modo que se puedan aplicar técnicas de sintonización analíticas o bien, métodos empíricos.

Conclusiones

- Con las implementaciones de control efectuadas se logró resolver el problema de control manual de fuerza y velocidad para llevar a cabo ensayos tribológicos con el tribómetro coaxial de la UDIATEM.
- Se desarrolló la interfaz propuesta para el control de los pasos o etapas del ensayo vía software, donde el ajuste de carga y velocidad se lleva a cabo de manera autónoma, lo cual facilita la realización de los ensayos.
- El control como se encuentra hasta ahora sintonizado, sirve para hacer comparaciones tribológicas con distintos parámetros para un mismo material, o bien, mismos parámetros de entrada para distintos materiales, cuyos valores de entrada entren en los requerimientos señalados anteriormente.
- Ya se cuentan con el análisis del estado actual los dos sistemas de control (sistema de control de carga y régimen de giro) del tribómetro coaxial para mejorar o cambiar el control automático con nuevas propuestas.
- La ventaja de tener un sistema automatizado bajo la técnica de control PID es que, las sintonizaciones permitirían extenderse a una variedad de requerimientos y especificaciones para los materiales a evaluar.

Referencias

1. *Colín Miranda, Alejandro.* (2013). Modelado del efecto de la viscoplasticidad en un ensayo de tribometría coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
2. *García Santaella, José Francisco.* (2014). Análisis de al y Al-Sn ensayados en un tribómetro coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
3. *Lara Paredes, José Gabriel.* (2013). Rediseño de un tribómetro coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNAM.
4. *Iniesta, O. y Márquez, R.* (2007). Diseño y construcción de un tribómetro coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UNAM.
5. *Luna Galaviz, Sergio Eduardo.* (2015). Determinación del protocolo para la obtención de curvas stribeck en ensayo tribológico cilindro sobre bloque. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UNAM.
6. *Figueroa A., Carlos G.* (2011). Caracterización de la compatibilidad tribológica en aleaciones dúctiles mediante un ensayo de tribometría coaxial. Tesis, Maestría. Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales, UNAM.
7. *Andresen, R., Bravo, A., Ramírez, M. A., Durán, H., Ortiz, A., y Schouwenaars, R.* (2009). Formación de una capa tribológica en la aleación SAE-783. Ingeniería mecánica, tecnológica y desarrollo vol. 3 no. 3.
8. *Ramírez, M. A.* (2009). Modelado de la respuesta mecánica de multicapas dúctiles durante el ensayo en un tribómetro coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UNAM.
9. *Ortega Peraya, Ivan.* (2014). Caracterización tribológica de fundiciones de CuMgSn mediante tribometría coaxial. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UNAM.
10. *Barral B., René S. y Cruz L., Pedro.* (2014). Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción. Tesis, Licenciatura en Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería, UNAM.
11. *Ogata, Katsuhiko.* (2010). Ingeniería de control moderna. Quinta edición, PEARSON EDUCACIÓN S.A., Madrid España.
12. *Nise, Norman.* (2011). Sistemas de control para ingeniería. Sexta edición, JohnWiley & Sons, Inc. California State Polytechnic University, Pomona.
13. *Alciatore, David y Hystand, Michael.* (2007). Introduction to Mechatronics and Measurement Systems. Cuarta edición, McGraw-Hill, New York.
14. *Mendez, Ruben y Ramirez, Ricardo.* (2013). Sistemas de control moderno. Volumen I: sistemas de tiempo continuo. Editorial Digital del Tecnológico de Monterrey, México.
15. *Shahrokh, Mohammad y Zomorodi, Alireza.* Comparison of PID Controller Tuning Methods. Department of Chemical & Petroleum Engineering, Sharif University of Technology.
16. *M., Araki.* Control systems, robotics, and automation. Vol. II - PID Control - Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
17. *Kiam Heong Ang, Yun li y Chong, Gregory.* (2006). PID Control System Analysis and Design. IEEE control systems magazine.
18. *Franklin, Gene F.* (1991). Control de sistemas dinámicos con retroalimentación. Addison-wesley, Argentina.

19. *Yu, Cheng-Ching*. (2006). Autotuning of PID controllers : relay feedback approach. Segunda edición, Springer, London.
20. *O'Dwyer, Aidan*. (2006). Handbook of Pi and P I D Controller Tuning Rules. Segunda edición, Imperial College Press, London.
21. Enero 2017. Galil Motion Control. <http://www.galilmc.com/>
22. Enero 2017. National Instruments: Sistemas de Pruebas, Medidas y Embebidos. <http://www.ni.com/es-mx.html>
23. Enero 2017. Home Baldor.com. <http://www.baldor.com>
24. *Valentine, Richard*. (1998). Motor control electronic handbook. McGraw-Hill, New York.
25. Enero 2017. Arduino-Home. <https://www.arduino.cc/>
26. Enero 2017. ¿Que es una Señal Modulada por Ancho de Pulso (PWM) y Para Qué es Utilizada? <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/AA1BDEA4AA224E3E86257CE400707527>