

UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA

FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO

Nº DE RADICACIÓN: _____

INFORMACIÓN EJECUTORES

Ejecutor 1

Nombre (s):	Henry Alexander
Apellido (s):	Vargas Toledo
Código:	20161375008
E-mail:	Havt26731@hotmail.com
Teléfono fijo:	5679383
Celular:	3195302363



Ejecutor 2

Nombre (s):	Andrés Felipe
Apellido (s):	Quintero Pastor
Código:	20161375037
E-mail:	Afquintero-92@hotmail.com
Teléfono fijo:	6875080
Celular:	3162803920



INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Título del Proyecto:	Identificación de sistemas para un proceso de intercambio de calor	
Duración (estimada):	10 – 15 semanas	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prestación y Servicios Tecnológicos	<input type="checkbox"/>
	Otro	<input type="checkbox"/>
Modalidad del Trabajo de Grado:	Monografía	
Línea de Investigación de la Facultad*:	Optimización de procesos industriales	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Educación y comunicación en ciencia y tecnología	
Grupo de Investigación:		
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:	Control y Automatización industrial	

INFORMACIÓN PASANTÍA

Nombre de la empresa:	
Dirección:	
Teléfonos:	
Correo electrónico:	
Página Web:	

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Director: (Vo. Bo.)	Luini Leonardo Hurtado Cortes
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)	
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)	

TITULO DEL PROYECTO:

“Identificación de sistemas para un proceso de intercambio de calor”

Henry Alexander Vargas Toledo 20161375008

Andrés Felipe Quintero Pastor 20161375037

Tutor:

Ingeniero Luini Leonardo Hurtado Cortes

Ingeniería Mecánica

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad tecnológica

Bogotá DC

Abril de 2017

Índices de contenido

Resumen	6
1. Introducción	7
2. Planteamiento del problema	8
2.1 Estado del arte	9
2.2. Justificación	18
3. Objetivos	20
3.1 Objetivo General	20
3.2 Objetivos Específicos	20
4. Marco Teórico	21
5. Metodología	28
6. Cronograma.....	29
7. Presupuesto.....	30
8. Bibliografía	31

Resumen

El siguiente trabajo consiste en determinar las funciones de transferencia para un sistema de transferencia de calor de un dispositivo “Thermal Process Control System” que se encuentra en la universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica. La identificación se lleva a cabo mediante la medición de algunas variables seleccionadas, para posteriormente ser procesadas mediante la herramienta de “Identificación de sistemas” que ofrece el software Matlab. El objeto del proyecto es encontrar las funciones de algunos elementos para que pueda ser utilizado a futuro por un sistema de control a nivel industrial o para su posterior nivel de estudio de la investigación del sistema.

1. Introducción

Observando los cambios que se vienen presentando en el entorno industrial durante las últimas décadas, se puede ver como en la mayoría de los procesos industriales se ha estado buscando la forma tener un control en sus procesos. Si se habla de control se tendría que tener en cuenta el significado de esta palabra como: Comprobación, inspección, fiscalización, intervención (Real Academia Española, 2007), si se tienen en cuenta los términos anteriores todos se relacionan con las labores que se deben tener en cuenta en un proceso industrial si se quiere conseguir un producto o resultado óptimo, que mantenga sus especificaciones en cada una de los componentes producidos.

Lograr controlar un sistema implica conocer el comportamiento dinámico del proceso determinando cuales son las variables que intervienen en torno a este, con el fin de adoptar una serie de medidas que se ajusten a las variaciones que tiene el proceso durante su estado de actividad.

Una de las formas de predecir el comportamiento de un determinado proceso es buscar un modelo que represente el funcionamiento del sistema para determinar los cambios que presenta a lo largo de tiempo y de esta manera intervenir en un punto determinado; la función se puede conseguir mediante un método matemático o mediante mediciones directas al sistema, este permite tener una aproximación mayor al encontrado por el método matemático, ya que obtiene información real de la situación del sistema que se esté analizando.

Es en este tipo de obtención de modelos matemáticos donde se encuentra una herramienta o método conocida como identificación de sistemas la cual emplea la medición de variables de un sistema dinámico (entradas, salidas, perturbaciones) para la obtención de modelos matemáticos. La utilidad de la identificación de sistemas es que logra determinar funciones de transferencia en sistemas en donde no es fácil encontrar el modelo matemático de forma analítica. La determinación de una función de transferencia acorde a la actividad del sistema analizado facilita el diseño de sistemas de control que brinden mayor calidad en el funcionamiento de los procesos.

2. Planteamiento del problema

La selección y estudio del sistema de intercambio de calor se lleva a cabo por su importancia dentro de los procesos industriales, en el que es necesario el enfriamiento o calentamiento de sustancias como el agua para distintas labores que se requieren en una empresa, en la mayoría de casos se utilizan sistemas similares al utilizado para realizar las mediciones, con la diferencia es que el sistema se realiza a gran escala.

En los procesos de intercambio de calor intervienen distintas variables como es el caso de la presión, la temperatura, la conductividad térmica y la sustancia que se desea utilizar en el sistema; todas estas variables se deben tenerse bajo control ya que dependiendo la escala del proceso pueden llegar a presentar peligro para su entorno, la manera de tener un control de estos sistemas es mediante herramientas de monitoreo que predicen el funcionamiento característico del sistema que se puede traducir a una función matemática que predice bajo qué condiciones funciona generalmente el proceso.

En esta investigación se busca encontrar el modelo matemático de un sistema de transferencia de calor, más específicamente se quieren obtener algunas funciones de transferencia del sistema, dichas funciones permite relacionar matemáticamente las señales de salida, entrada y posibles perturbaciones características del comportamiento del proceso que se esté analizando, la búsqueda de este tipo de funciones se realiza por la importancia que tiene estas, en el diseño de sistemas control de una situación en particular.

El propósito de este trabajo es encontrar la función de transferencia del sistema mencionado anteriormente mediante mediciones, con la finalidad de encontrar una representación matemática del sistema lo más cercana posible con la ayuda de un software que evite involucrar errores que de por sí mismo introduce la medición, todo esto se realiza con el fin de que posiblemente en un futuro se pueda introducir este tipo de tecnologías de control y automatización en la industria nacional y así poder competir con las industrias mundiales en calidad y producción.

2.1 Estado del arte

Para la realización de esta propuesta, se tuvieron en cuenta algunas investigaciones que se han desarrollado con temas similares al tema tratado en este proyecto, para este caso se buscaron documentos que relacionaran temas de búsqueda de función de transferencia para distintos tipos de sistema mecánico, así como medición de transferencia de calor que serán los temas relevantes para el desarrollo de este proyecto.

1. Control del ángulo de cabeceo de un helicóptero como benchmark de diseño de controladores (García-sanz, Jorge, & Igor, 2006)

En este documento se desarrolla un benchmark o estándar de comparación (WordReference, 2017) de la metodología de diseño de control para el desarrollo de controladores PID para el manejo del ángulo de cabeceo de un helicóptero de dos rotores.

El desarrollo del proyecto se realiza utilizando el prototipo a escala de un helicóptero de dos rotores, la maqueta tiene tres ángulos de libertad (Ángulo de alabeo, Ángulo de cabeceo, Ángulo de guiñada) con sensores para la adquisición de datos de los cuales se enfocó únicamente en el ángulo de cabeceo

- **Ángulo de cabeceo (pitch):** giro en torno a un eje perpendicular a la dirección de avance

El helicóptero se gobierna desde un ordenador, utilizando una tarjeta de adquisición de datos y el software MATLAB (aplicación Real time workshop), estas herramientas leen los datos recolectados por los sensores y transmiten órdenes a los actuadores desde un entorno *Simulink*.

La configuración del helicóptero para la obtención de datos es la siguiente: Los actuadores son dos motores eléctricos de tensión continua acoplados a los ejes que accionan las dos hélices del helicóptero, produciendo una fuerza proporcional a la tensión de entrada, las hélices y los motores forman lo que se denomina cuerpo del sistema. Éste está unido por medio de una barra a un punto fijo alrededor del cual está permitido el giro, además dispone de un contrapeso para aliviar el esfuerzo de los motores.

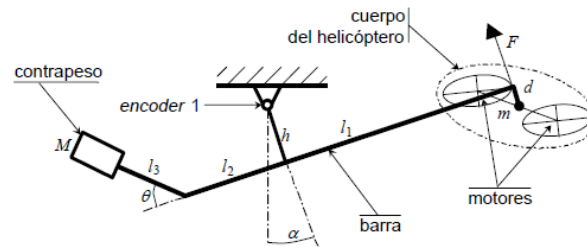


Figura 1. Diagrama variables helicóptero

El análisis se enfoca únicamente en el ángulo de cabeceo α , por lo que el control de los ángulos restantes está implementado. El análisis matemático se realiza teniendo en cuenta las fuerzas F_1 y F_2 generadas por los dos motores y sus hélices generando una salida de ángulo α .

A partir de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas de las hélices, se puede estimar una fuerza resultante F , la cual es proporcional a la tensión eléctrica aplicada a los motores (K), estas dos variables son las que intervienen en el control del ángulo de cabeceo (α) por las que se les relaciona mediante la función de transferencia que relaciona el ángulo de cabeceo α (radianes) y la tensión eléctrica v (voltios)

$$\frac{\alpha(s)}{v(s)} = \frac{k \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n s + \omega_n^2}$$

Posteriormente, al encontrar la función de transferencia que relaciona el ángulo de cabeceo y el voltaje de los motores, se pueden realizar simulaciones con el fin de

caracterizar el controlador PID más óptimo para que controle este movimiento del helicóptero.

2. Identificación de parámetros de sistemas dinámicos (Oscar, Paola, & Leonardo, 2002)

En este proyecto se diseña e implementa un prototipo, con el objetivo de identificar sistemas por medio del toolbox Ident del programa MATLAB, Este proyecto es una aproximación experimental, en el cual se desarrollan algunos experimentos en el proceso y se determina un modelo. Para poder construir un modelo, se deben tener datos observados o datos experimentales.

Se utilizó para el desarrollo el modelo denominado sistemas de identificación tiene relación directa con la experimentación, las señales de entrada y la salida del sistema, estas se guardan en el computador para ser analizadas y encontrar el modelo adecuado.

El software utilizado para la recolección de los datos fue el programa Labview para su posterior análisis en Matlab, logrando la obtención del respectivo modelo, estas mediciones se hicieron en el laboratorio de automatización de la UMNG. El prototipo se caracteriza por ser una herramienta didáctica, ya que posee diferentes puntos de prueba en los modelos de sistema de control de primero y segundo orden; de esta forma se permite la verificación de las señales de entrada, salida y alimentación. Además, parámetros como el factor de amortiguamiento, frecuencia natural del sistema (w) y ganancia, pueden ser variados para obtener diferentes respuestas con el mismo modelo. El esquema general del prototipo se fundamenta en los tres sistemas descritos con sus respectivas etapas, como se muestra en la figura 2.

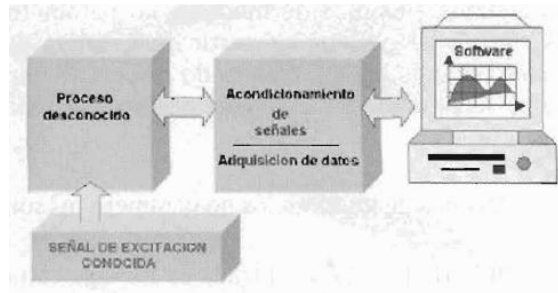


Figura 2. Fases del proyecto

El modelo planteado para la realización del proyecto fue un sistema giro con un motor DC como lo muestra la figura 3:

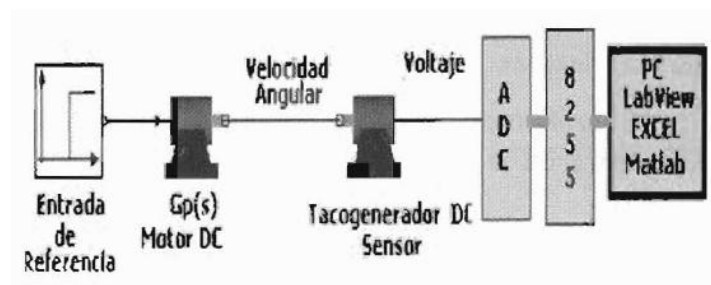


Figura 3. Esquema montaje motor DC

Se realizó la obtención del gráfico de la respuesta de entrada de una entrada escalón de 1,98V y a partir de ahí se hizo el modelamiento, mediante la herramienta de software para la adquisición de datos, posteriormente se utilizó en el desarrollo del proyecto el instrumento de Excel para la observación de los datos obtenidos, finalmente se hace uso de la aplicación toolbox ident del programa Matlab.

3. Modelo matemático para un robot móvil (Luis & Maximiliano, 2008)

En este artículo se desarrolla el modelo matemático de un robot móvil tipo diferencial. Para el desarrollo del modelo se consideran las características cinemáticas, dinámicas y eléctricas del motor. El modelo se desarrolla con base en los datos de la plataforma móvil

PMETIN. Se realizan algunas simulaciones empleando Simulink para comprobar el correcto funcionamiento del modelo.

Los Robots móviles se pueden construir basándose en diferentes diseños de plataformas, que se diferencian por los diversos sistemas de tracción que utilizan. Las plataformas más comunes utilizan el sistema de tracción diferencial, estas utilizan motores independientes para cada una de las ruedas pero situados sobre el mismo eje, además utiliza ruedas locas o puntos de sostenimiento para proporcionar estabilidad a la plataforma.

La figura 5 presenta un esquema simplificado de un robot móvil de dos ruedas independientes o de tracción diferencial.

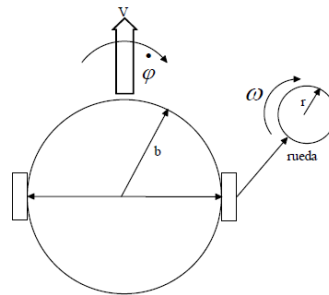


Figura 4. Diagrama Variables robot móvil

Las variables que intervienen en el funcionamiento son las siguientes:

$V =$ velocidad lineal que posee el cuerpo,

$\dot{\varphi} =$ velocidad angular que posee el cuerpo,

$\omega_{1-2} = \dot{\theta}_{1-2}$ velocidades angulares de las ruedas

La obtención del modelo relaciona tanto ecuaciones cinemáticas como dinámicas, debido a su funcionamiento continuo, que tiene que estar relacionado entre sí, las ecuaciones cinemáticas son aquellas que relacionan la velocidad de giro de cada una de las ruedas con las variables de posición del robot: (x, y, φ) . Se obtiene una función de transferencia del modelo del motor que es equivalente al sistema real físico. Las ecuaciones

características de los motores D.C de imanes permanentes los cuales actúan como elementos transformadores.

La función de transferencia se encuentra a partir del modelo obtenido por las ecuaciones cinemáticas y dinámicas se obtiene la función de transferencia del motor La función de transferencia del sistema que se está estudiando es de segundo orden y se expresa como:

$$H(S) = \frac{K_t \cdot r_2}{(L_a S + R_a)(J_{eq} S + b_{eq}) + K_t \cdot K_v \cdot r_2}$$

En la figura 6 se muestran los valores obtenidos para las salidas del sistema (x, y, φ) al excitar el motor derecho con 5 Voltios y el motor izquierdo con 0 Voltios, la salida es una

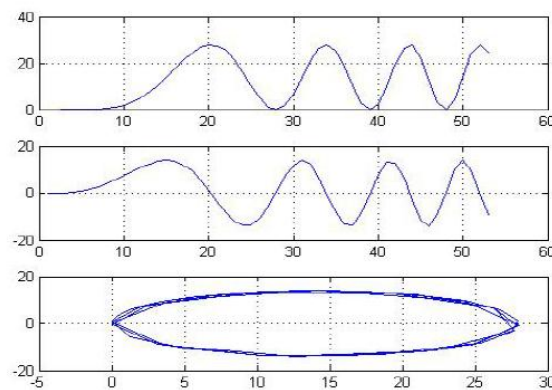


Figura 5. Trayectoria obtenida con excitación del motor

Introducción a la identificación de sistemas (Javier & José, 2005)

¿Qué es la identificación?

Podemos definir la identificación de sistemas, como los estudios de técnicas que persiguen la obtención de modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de mediciones realizadas en el proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y perturbaciones (figura 7).

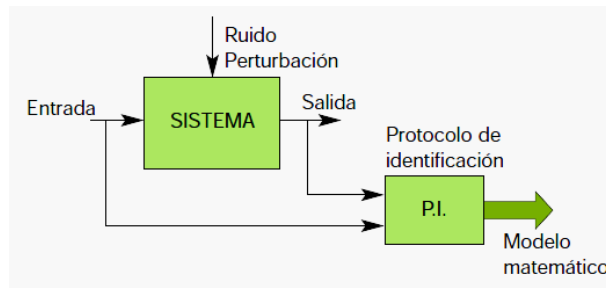


Figura 6. Proceso de identificación sobre un sistema para la obtención de un modelo matemático, mediante la realización de mediciones y captura de datos del sistema

Existen varias formas de catalogar los modelos matemáticos: deterministas o estocásticos, dinámicos o estáticos, de parámetros distribuidos o con centrados, lineales o no lineales, y de tiempo continuo o tiempo discreto:

Modelos no paramétricos: Se caracterizan mediante gráficos, diagramas o representaciones que describen las propiedades dinámicas mediante un número no finito de parámetros, respuesta al impulso, al escalón, o en frecuencia.

Modelos paramétricos o matemáticos Describen las relaciones entre las variables del sistema mediante expresiones matemáticas, ecuaciones diferenciales en sistemas continuos y ecuaciones de diferencias en sistemas discretos.

El enfoque de la identificación se puede realizar en función de la estructura del modelo, y del comportamiento físico o no del mismo. Podemos distinguir:

Black-box: los parámetros del modelo no tienen una interpretación física. Un modelo basado en leyes fundamentales es muy complicado o se desconoce.

Gray-box: algunas partes del sistema son modeladas basándose en principios fundamentales, y otras como una caja negra. Algunos de los parámetros del modelo pueden tener una interpretación física; a este tipo de modelos también se les conoce como "Tailor-made", estimando sólo los parámetros no conocidos.

White-box: la estructura del modelo se obtiene a partir de leyes fundamentales. Los parámetros tienen una interpretación física.

Análisis de la respuesta transitoria: consiste en obtener la respuesta del sistema a un impulso o a un escalón.

Análisis de correlación: pertenece al dominio temporal, se obtiene la función de correlación entre las variables de entrada y salida.

Dado Z^n , datos obtenidos por muestreo, en un sistema lineal y estacionario (SLE), entendiéndose por:

Estacionario. Igual respuesta ante una entrada, independientemente del instante de aplicación.

Lineal. Si la respuesta a una combinación de entradas, es idéntica a la combinación lineal de las respuestas de las entradas.

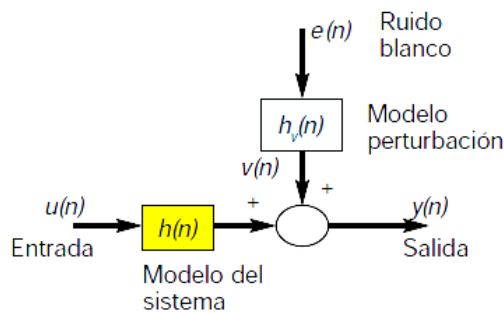


Figura 7. Esquema del sistema lineal invariante en el tiempo con un modelo de perturbación

El proceso de identificación consta de una serie de pautas y decisiones (figura 8), con el objeto de que el modelo final sea representativo del modelo identificado; éstas son:

– **Diseño de experimentos:** para la obtención de datos de entrada-salida, deberán realizarse experimentos informativos, los datos de un grupo M^* de modelos pueden ser discriminados entre dos modelos del grupo; para ello, debe excitarse el sistema con señales lo suficientemente ricas, insistentemente excitadas; $u(t)$ es persistentemente excitada de orden n , si $\phi_u(\omega)$ (espectro de $u(t)$), es diferente de n puntos del intervalo $-\pi < \omega \leq \pi$

La elección de las señales se hará teniendo en cuenta:

1. Las propiedades asintóticas de la estima (bias y variance) sólo dependen del espectro de entrada y no de la forma de onda de la señal. Error + variance.

– **Bias (desvío):** errores sistemáticos causados por características de la señal de entrada, elección de la estructura de modelo (complejidad de la representación) y modo de operación (lazo cerrado o lazo abierto).

– **Variance (varianza):** errores aleatorios introducidos por la presencia de ruido en los datos, que impiden que el modelo reproduzca exactamente la salida. Está afectado por los siguientes factores: número de parámetros del modelo, duración del experimento de identificación, relación señal-ruido.

2. La entrada debe de estar limitada en amplitud.

3. El orden de la señal, persistentemente excitada, tiene que ser mayor o igual al número de parámetros que van a ser estimados.

4. Las señales periódicas tienen ciertas ventajas.

Tipos de entradas: ruido blanco gaussiano, tiene un valor medio igual a cero y varianza σ^2 ; ruido blanco gaussiano filtrado; señal binaria aleatoria, de nivel deseado; señal binaria pseudo aleatoria (PRBS), señal periódica determinista con las

propiedades del ruido blanco; señal multisenos, formada por una suma de senoides, persistentemente excitada de orden $2n$.

Será necesario tener en cuenta: período de muestreo, número de muestras a tomar, número de registros en PRBS, tiempos de conmutación, amplitud y duración de la señal, bandas de frecuencia.

2.2. Justificación

El proyecto se basa en la importancia que tiene investigar e introducir nuevas tecnologías en los procesos productivos que se utilizan ampliamente en la industria, en este caso particular se hace énfasis en un sistema de intercambio de calor que es utilizado en un sin número de procesos en donde es necesario el intercambio de energía en forma de calor con el fin de enfriar o calentar un líquido para posteriores aplicaciones.

Además de ser un interés particular de la industria en general la búsqueda de nuevas tecnologías, hay que observar que es uno de los objetivos fundamentales de la ingeniería según el ingeniero Ricardo Hernández Gaviño considera que una herramienta de gran importancia en el área de la ingeniería es el modelado de sistemas físicos en donde plantea lo siguiente:

Uno de los más importantes de la ingeniería es poder representar un fenómeno físico en forma matemática, ya que así es posible llevar a cabo un análisis cuantitativo del sistema y determinar sus características, su comportamiento y sus limitaciones; además en dado caso, también será posible buscar alternativas para mejorar el funcionamiento del sistema (Gaviño, 2010).

Si se observa la gran utilidad que tiene caracterizar un sistema mecánico mediante un modelo matemático en la rama de la ingeniería es lo que impulsa a realizar un proyecto que involucre este tipo de aspectos, además de esto el proyecto tiene la virtud de ser el escalón inicial para el estudio más profundo de los sistemas de transferencia de calor, ya que al determinar el comportamiento del sistema mediante una función matemática es

posible posteriormente determinar acciones de regularización y mejora de este tipo de sistemas mediante herramientas de automatización y control del proceso mencionado.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Mediante la identificación de sistemas dinámicos, obtener las funciones de transferencia de los dispositivos de un proceso termodinámico.

3.2 Objetivos Específicos

- Describir el funcionamiento del proceso de transferencia de calor
- Determinar los dispositivos para la identificación
- Realizar las mediciones de las variables que intervienen en el dispositivo a identificar
- Realizar el procesamiento de los datos mediante la herramienta de identificación de sistemas que tiene el software matemático Matlab
- Encontrar la función de transferencia del sistema termodinámico, con ayuda del software Matlab

4. Marco Teórico

Componentes básicos de un sistema de control

Los componentes básicos de un sistema de control se puede describir mediante:

- Objetivos de control
- Componentes del sistema de control
- Resultados o salidas

La relación básica entre estos tres componentes se ilustra en la Figura 9. En términos más técnicos, los objetivos se pueden identificar como entradas o señales actuantes, los resultados también se llaman salidas o variables controladas. En general el objetivo de un sistema de control es controlar las salidas en alguna forma prescrita mediante las entradas a través de elementos del sistema de control (Kuo, 1996, pág. 2)



Figura 8. Diagrama sistema de control

También se puede describir un sistema de control como la interconexión de elementos que forman una configuración denominada sistema, de tal manera que el arreglo resultante es capaz de controlarse por sí mismo.

Un sistema o componente del sistema susceptible de ser controlado, al cual se le aplica una señal $r(t)$ a manera de entrada para obtener una respuesta o salida $y(t)$, estos sistemas se pueden representar mediante un diagrama de bloques.

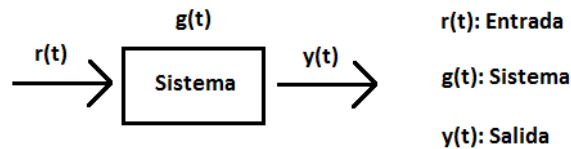


Figura 9. Diagrama elementos de un sistema

El vínculo Entrada-Salida es una relación de causa y efecto con el sistema , por lo que el proceso por controlar (también denominada planta) relaciona la salida con la entrada.

Las entradas típicas aplicadas a los sistemas de control son: escaló, rampa e impulso, estas entradas típicas se pueden ver en la figura.

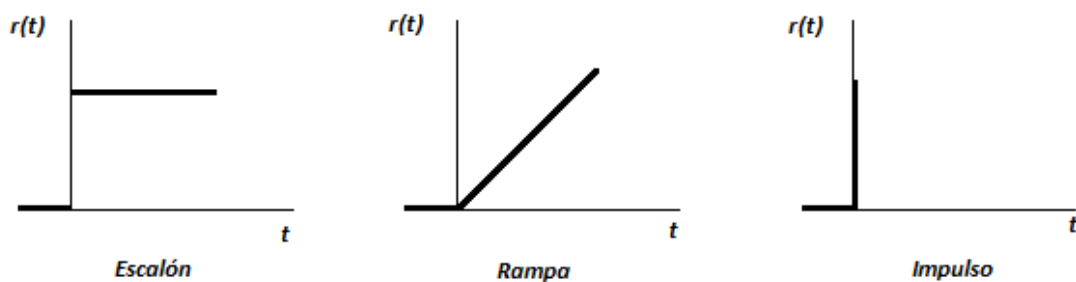


Figura 10. Señales típicas de entrada

La entrada escalón indica un comportamiento o una referencia constantes introducidos al sistema, mientras que la entrada rampa supone una referencia con variación continua en el tiempo, la entrada impulso se caracteriza por una señal de prueba con magnitud muy grande y duración muy corta. La función impulso o función de transferencia es la representación matemática del sistema.

Básicamente, el problema de control consiste en seleccionar y ajustar un conjunto específico de elementos tal que, al interconectarse, el sistema resultante deberá comportarse de una manera específica

Clasificación de los sistemas de control

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto (no automáticos) y sistemas de lazo cerrado (retroalimentados o automáticos). Para llevar a cabo dicha clasificación, se hace la siguiente definición:

Acción de control: es la cantidad dosificada de energía que afecta al sistema para producir la salida o la respuesta deseada.

Sistema de control de lazo abierto:

Es aquel sistema en el cual la acción de control es, en cierto modo, independiente de la salida. Este tipo de sistemas por lo general utiliza un regulador o actuador con la finalidad de obtener la respuesta deseada

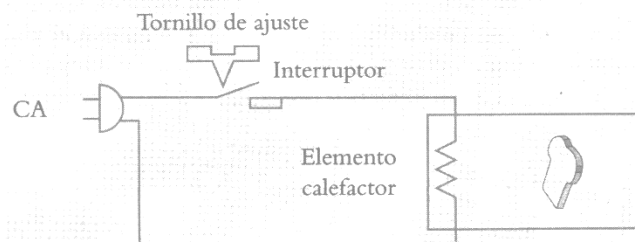


Figura 11. Sistema de lazo abierto

La capacidad que tales sistemas tienen para ejecutar una acción con exactitud depende de su calibración. En general, los sistemas de lazo abierto están regulados por base de tiempo. Como ejemplo de dichos sistemas se citan las tostadoras de pan, las lavadoras y los semáforos convencionales.

Sistemas de control de lazo cerrado:

Es aquel sistema en el cual la acción de control depende de la salida. Dicho sistema utiliza un sensor que detecta la respuesta real para compararla, entonces, con una referencia a manera de entrada. Por esta razón, los sistemas de lazo cerrado se denominan sistemas retroalimentados. El término retroalimentar significa comparar; en este caso la salida real

se compara con respecto al comportamiento deseado, de tal forma que si el sistema lo requiere se aplica una acción correctora sobre el proceso por controlar, en la figura 13 se muestra un diagrama de sistema retroalimentado

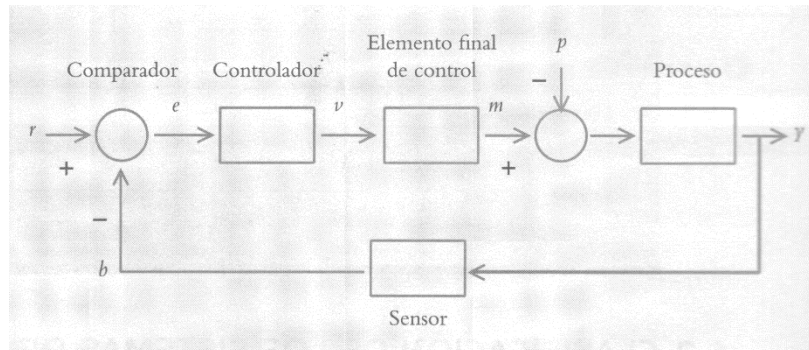


Figura 12. Sistema lazo cerrado

Definamos las siguientes variables:

$r(t) = \text{entrada de referencia}$

$e(t) = \text{Señal de error}$

$v(t) = \text{variable regulada}$

$m(t) = \text{variable manipulada}$

$p(t) = \text{señal de perturbación}$

$y(t) = \text{variable controlada}$

$b(t) = \text{variable de retroalimentación por el sensor}$

Observando la figura anterior se observa la entrada de referencia r que se compara con la variable de retroalimentación b . El comparador lleva a cabo la suma algebraica $r - b$, con lo cual genera la señal de error e variable que ejerce su efecto sobre el controlador. Esto da lugar a la variable regulada v , que se aplica al elemento final de control y produce la variable manipulada m ; la función de dicha variable es suministrar la cantidad de energía necesaria al proceso por controlar. La variable controlada y resulta de ajustar el comportamiento del proceso.

Los bloques comparador y controlador forman parte de una misma unidad, la cual recibe el nombre genérico de controlador. Como ejemplos de sistemas de lazo cerrado se

pueden citar el refrigerador, el control de temperatura de una habitación con termostato así como el calentador de agua.

Para convertir al tostador de pan de lazo abierto a lazo cerrado, de necesario agregar un sensor que detecta las variaciones en el color del pan durante el proceso de tostado, así como un comparador para evaluar el grado de tueste real del pan con respecto al grado de tueste deseado seleccionado por el usuario. De esta manera se hay una diferencia entre las dos cantidades, se efectuará la acción de dosificación de energía requerida hasta que la salida real sea igual al de referencia. Por esta razón se dice que la acción de control aplicada al proceso por controlar es dependiente de la salida.

La figura muestra el tostador convertido a un lazo de control cerrado o automático, ya que se ha agregado un sensor (celda fotoeléctrica) y un comparador. (Gaviño, 2010, págs. 5-7)

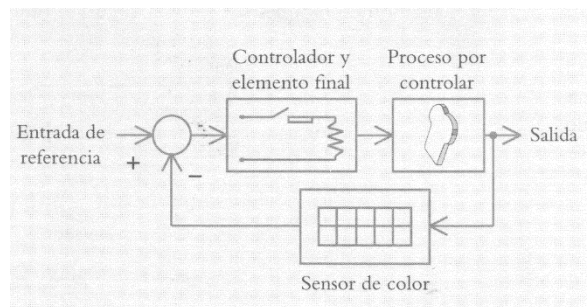


Figura 13. Sistema conversión lazo cerrado

Respuesta al impulso y función de transferencia de sistemas lineales

La forma clásica de modelar sistemas lineales es utilizar funciones de transferencia para representar las relaciones entrada-salida entre variables. Una forma de determinar la función de transferencia es empleando la respuesta al impulso

Respuesta al impulso

Considere un sistema lineal invariable en el tiempo tiene la entrada $u(t)$ y la salida $y(t)$. El sistema se puede caracterizar por su respuesta al impulso $g(t)$, que se define como la salida cuando la entrada es una función impulso unitario $\delta(t)$. Una vez que se conoce la

respuesta al impulso de un sistema lineal, la salida del sistema $y(t)$ para cualquier $u(t)$, se puede encontrar mediante la función de transferencia.

La función de transferencia

La función de transferencia de un sistema lineal invariable con el tiempo se define como la transformada de Laplace de una respuesta al impulso, con todas las condiciones iniciales iguales a cero. Suponga que $G(s)$ denota la función de transferencia de un sistema con una entrada y una salida, con entrada $u(t)$ y salida $y(t)$ y respuesta del impulso $g(t)$, entonces la función de transferencia $G(s)$ se define como:

$$G(s) = \mathcal{L}[g(t)]$$

La función de transferencia $G(s)$ se relaciona con la transformada de Laplace de la entrada y la salida a través de la siguiente relación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Con todas las condiciones iniciales puestas a cero, $Y(s), U(s)$ son las transformadas de Laplace de $y(t)$ y $u(t)$ respectivamente.

Aunque la función de transferencia de un sistema lineal se define en términos de la respuesta al impulso, en la práctica, la relación entrada-salida de un sistema lineal invariante con el tiempo con entrada en tiempo continuo, se describe a menudo mediante una ecuación diferencial, por lo que es conveniente obtener la función de transferencia directamente de la ecuación diferencial. Considere que la relación entrada-salida de un sistema lineal invariante con el tiempo se describe mediante la siguiente ecuación diferencial de n -ésimo orden con coeficientes reales constantes:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t)$$

Sin embargo desde el punto de vista del análisis y diseño de sistemas lineales, el método que emplea ecuaciones diferenciales en forma exclusiva es bastante molesto. Por lo que las ecuaciones diferenciales de la forma anterior rara vez se emplea en su forma original para el análisis y diseño de sistemas de control. Debe señalarse que, aun cuando existen disponibles subrutinas eficientes en computadoras digitales para la solución de

ecuaciones diferenciales de orden superior, la filosofía básica de la teoría de control lineal es el desarrollo de herramientas de análisis y diseño que eviten la solución exacta de las ecuaciones diferenciales del sistema, excepto cuando se desean las soluciones mediante simulación en computadora para presentación final o verificación. En la teoría clásica de control, la simulación por computadora empieza a menudo con funciones de transferencia en lugar de ecuaciones diferenciales. (Gaviño, 2010, págs. 9-11)

Para obtener la función de transferencia del sistema lineal que está representado por la ecuación anterior, simplemente se toma la transformada de Laplace en ambos lados de la ecuación y se suponen condiciones iniciales cero. El resultado es: (Gaviño, 2010, págs. 77-80)

$$(S^n + a_{n-1}S^{n+1} + \dots + a_1S + a_0)Y(s) = (b_mS^m + b_{m-1}S^{m+1} + \dots + b_1S + b_0)U(s)$$

La función de transferencia entre $u(t)$ y $y(t)$ está dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_mS^m + b_{m-1}S^{m+1} + \dots + b_1S + b_0}{S^n + a_{n-1}S^{n+1} + \dots + a_1S + a_0}$$

5. Metodología

La metodología que se utilizara en el proyecto planteado tendrá fases de realización preestablecidas, sin embargo hay que tener en cuenta que puede estar prevista de modificaciones con el fin de otorgar en mejor comportamiento para los fines del mismo; en este momento se plantea la siguiente metodología de trabajo:

- Investigación y recolección de información a través de documentos relacionados con el tema del proyecto

- Recopilación de información de antecedentes repelentes al proyecto

- Investigación de los instrumentos y procedimientos necesarios para la recolección de información del proyecto

- Preparación del equipo con un estándar base para la realización de las mediciones

- Recolección de los datos de medición

- Observación de los datos, de tal manera que cumplan con características especificadas para cumplir el fin del proyecto

- Análisis de los datos seleccionados mediante la herramienta de software Matlab

- Plantear las conclusiones acerca del análisis realizado al proyecto en general

6. Cronograma

Se realiza este cronograma con el fin de estimar un tiempo aproximado de ejecución del proyecto planteado, el cual se espera que sea de aproximadamente 10 – 15 semanas si se logra cumplir con lo establecido en la siguiente tabla.

Actividades	Semana														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Recopilación información básica	■	■	■												
Investigación del proceso			■	■	■										
Selección de material de apoyo				■	■										
Obtención del material					■	■									
Adecuación de la máquina y elementos						■									
Realización de pruebas de medición						■	■	■							
Medición de variables establecidas							■	■	■	■					
Selección de datos											■	■			
Análisis de la información											■	■	■		
Organización de conclusiones													■	■	■

Tabla 1. Cronograma de desarrollo

7. Presupuesto

El presupuesto realizado es un estimado de los posibles recursos que se incluirán para la realización del proyecto, dicha relación se muestra en la siguiente tabla:

Recursos	Valor económico en \$ (Pesos)
Costos para obtención de información académica	30.000
Herramientas para la toma de mediciones	120.000
Préstamo de banco de prueba para realizar las mediciones	Financiado por la U. Distrital F.J.D.C.
Gastos de papelería	80.000
Costos por préstamo de equipos de software	100.000
Transporte	50.000

Tabla 2. Costos del proyecto

8. Bibliografía

- García-sanz, Jorge, E., & Igor, E. (2006). Control del ángulo de cabeceo de un helicóptero con benchmark de diseño de controladores. *Revista iberoamericana de automática e informática industrial*, 111-116.
- Gaviño, R. H. (2010). *Introducción a los sistemas de control*. Naucalpan de Juárez: Pearson.
- Javier, S., & José, V. (2005). *Introducción a la identificación de sistemas*. México: Técnica industrial.
- Kuo, B. (1996). Sistemas de control automático. En B. Kuo, *Sistemas de control automático* (pág. 2). Naucalpan de Juárez: Prentice Hall.
- Luis, R., & Maximiliano, B. (2008). *Modelo matemático para un robot móvil*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Oscar, A., Paola, N., & Leonardo, S. (2002). Identificación de Parámetros de sistemas dinámicos. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, 41-52.
- Real Academia Española. (2007). *Diccionario práctico del estudiante*. Barcelona: Santillana.
- WordReference. (1 de Abril de 2017). Obtenido de <http://www.wordreference.com/es/translation.asp?tranword=benchmark>