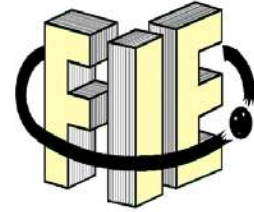




**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Diseño de Controladores PI y Retroalimentación de Estados
en Bond Graph**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O E L E C T R I C I S T A

PRESENTA:

ENRIQUE HUANTE HERNANDEZ

ASESOR:

Doctor en Ingeniería Eléctrica

Gilberto Gonzales Avalos

Morelia, Michoacán, Agosto de 2014.

AGRADECIMIENTOS:

Primero quiero empezar dando un sincero y principal agradecimiento a dios por permitirme realizar mis logros y acompañarme hasta donde hora estoy.

Agradezco a la facultad de ingeniería eléctrica, así como a la Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo, institución educativa que me dio la oportunidad de forjarme ajo sus aulas y así obtener lo mejor de ella, mi educación.

A mi familia por su importante apoyo tanto económico como moral, que han invertido sobre mi dentro de esta gran institución, a ellos mil gracias por su apoyo.

Un sincero agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. Gilberto Gonzales Avalos, por su atención, enseñanzas y asesorías prestadas para l realización de este proyecto de tesis

A los profesores sinodales, al ingeniero Ignacio franco Torres y al maestro Enrique Manuel Báez García por las grandes enseñanzas que obtuve de ellos durante el transcurso de la carrera y que al final se concluyeron con las observaciones y correcciones que me hicieron de este presunto trabajo de tesis.

Agradezco también a todos los compañeros y amigos por su apoyo incondicional dentro y fuera de la institución.

A todos y cada uno de los profesores que me han compartido sus enseñanzas sobre esta área de la educación, que gracias a ellos me han permitido ser cada día mejor.

DEDICATORIA:

Dedico este trabajo de tesis a toda mi familia que fue parte muy importante en mi formación durante toda una gran etapa de mi vida hasta ahorita, pero en especial a mis padres Mario Huante y María Margarita por nunca dejarme solo y siempre acompañarme en los momentos más difíciles y por las enseñanzas y principios adquiridos, que me han guiado por el buen camino de la vida y me han ayudado para salir adelante.

También quiero agradecer a mi hermano Mario Huante y todos mis amigos que conocí en la universidad así como en la primaria y secundaria.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo con mucho orgullo Nuestra Alma Mater.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica que me formo para poder participar en la construcción eléctrica de este gran país que tenemos que es México. Como profesionista estoy seguro que la facultad de ingeniería eléctrica puede sentirse orgullosa porque siempre he trabajado con honestidad y humildad para ganarme el pan de cada día.

También agradecer a dios que si el esto no sería posible

Finalmente a todos, gracias, muchas gracias.

CONTENIDO

Agradecimientos:	ii
Dedicatoria:	iii
Contenido	iv
Resumen	vi
Palabras Clave:	vi
Abstract:	vii
Keywords	vii
Índice de Figuras	viii
Lista de Tablas	ix
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Controladores Automáticos	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Justificación	1
1.4 Metodología	2
1.5 Estructura de la tesis	2
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE BOND GRAPH	3
2.1 Introducción	3
2.2 Bond Graph	3
2.3 Componentes básicos de un Bond Graph	3
2.3.1 Puertos -1 Pasivos	4
2.3.2 Puertos -1 Activos o Fuentes	5
2.3.3 Elementos ideales puertos-2	6
2.3.4 Los elementos de unión, puertos-3	7
2.4 Causalidad	8
2.5 Procedimiento para la asignación de causalidad en un multipuerto	9
2.6 Causalidad derivativa en un Bond Graph	9
2.8 Estructuras de unión en sistemas multipuerto	11
2.8.1 Vectores clave o vectores significativos	11
2.8.2 Relaciones de Campo y Ecuación de Estados	12
CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONTROLADORES EN BOND GRAPH	14

3.1	Introducción	14
3.2	Retroalimentación de estados.....	14
3.2.1	Asignación de polos	16
3.3	Retroalimentación de estados en Bond Graph.....	17
3.4	Control proporcional integral derivativo	18
3.4.1	Control proporcional.....	18
3.4.2	Controlador proporcional integral (PI).....	19
3.4.3	controlador proporcional derivativo(pd)	21
3.4.4	Controlador proporcional integral derivativo (PID).....	21
3.5	Control proporcional integral derivativo (PID) en Bond Graph	23
3.5.1	Control proporcional (P)	23
3.5.2	Control proporcional integral (PI).....	24
3.5.3	Controlador proporcional integral derivativo (PID).....	26
CAPÍTULO 4	CASOS DE ESTUDIO	29
4.1	Introducción	29
4.2	Control de un motor de corriente directa (CD).....	29
4.2.1	Resultados de la simulación del motor de CD en lazo abierto	30
4.2.2	Retroalimentación de estados.....	33
4.2.3	Controlador PI para el motor de corriente directa (CD)	35
4.3	Control de un Sistema de nivel de líquido.....	41
4.3.1	Sistema de nivel de líquido en lazo abierto	42
4.3.2	Sistema de nivel de líquido con retroalimentación de estados	44
4.3.3	Controlador proporcional integral para el sistema de nivel de líquido.....	48
CAPÍTULO 5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	55
5.1	Conclusiones.....	55
5.2	Recomendaciones.....	56
5.3	Bibliografía.....	57

RESUMEN

En este trabajo de tesis se describe el diseño de controladores y retroalimentación de estados aplicados a diferentes casos de estudios para dar a comprender las diferentes aplicaciones que pueden llegar tener estos diseños en la industria, y aplicando dichos conocimientos en la en las áreas de electrónica y eléctrica donde pienso que los electricistas tenemos grandes posibilidades de practicar en un ambiente laboral los conocimientos que se adquieren en la universidad

Con este trabajo primero se pretende que tanto el estudiante como cualquier lector aprenda los fundamentos básicos de Bond Graph para así poder llegar a modelar y diseñar sistemas que en otros programas podrían ser más complicados de analizar,. Y así conociendo esta herramienta puede ser de mucha utilidad para los estudiantes o aun lector en general.

Principalmente los casos de estudio que analizaremos son un motor de corriente directa y un sistema de nivel de líquido de dos tanques, a los cuales veremos su comportamiento con diferentes referencias que se les darán a los sistemas diseñados y modelados en el software 20-sim

También mencionar que no se trata de comparar la retroalimentación de estados con el controlador proporcional integral, ya que cada uno tiene su función bien establecida y esto lo analizaremos ya en los capítulos 3 y 4

Quiero también hacer referencia que en el tiempo que estuve dando mis prácticas profesionales en la central termoeléctrica PDT. Plutarco Elías Calles observe y analice un controlador proporcional integral (PI) aplicado al control de regulación de voltaje en las unidades 3, 4, 5 y 6 donde esta función así como muchas otras era parte importante del proceso para obtener el voltaje deseado a la salida de cada unidad

PALABRAS CLAVE:

Bond Graph, Controlador, Retroalimentación, Ganancias, giradores.

ABSTRACT:

In this thesis project design state feedback controllers and applied to different case studies to understand the different applications that may come to have these designs in the industry is described, and applying that knowledge in the areas of electronics and electrical electricians where I think we have a good chance to practice in a workplace the knowledge acquired at university

This work was first intended that both the student and any reader learn the basics of Bond Graph in order to get to model and design systems that other programs might be more complicated to analyze. And knowing this tool can be very useful for students or even general reader.

Mainly discuss case studies are a DC motor and a system of two liquid level tanks, to which we will see different behavior with references that will be given to systems designed and modeled in 20-sim software

Also mention that this is not to compare the state feedback controller with proportional integral, since each has its well-established function and this and discuss in Chapters 3 and 4

I would also like to refer to in the time I was giving my internship at the power plant PDT. Plutarco Elias Calles observe and analyze a proportional integral (PI) controller applied to the control voltage regulation in units 3, 4, 5 and 6 where this function as well as many other important part of the process was to get the desired output voltage each generating unit

KEYWORDS

Bond Graph, controller, feedback, Earnings, rotators

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Representación de un Bond	3
Figura 2 Tetraedro de estado.....	5
Figura 3 Puertos -1 Activos a) fuente 1	6
Figura 4 Bond Graph del transformador.....	6
Figura 5 Bond Graph de un girador.....	7
Figura 6 union-0.....	7
Figura 7 union-1	7
Figura 8 Causalidad para un Bond.....	8
Figura 9 Circuito eléctrico en causalidad derivativa.....	10
Figura 10 Elemento C2 en causalidad derivativa	10
Figura 11 Simplificación de bonds.....	11
Figura 12 Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph	11
Figura 13 Estructura del controlador por retroalimentación de estados	15
Figura 14 Lazo abierto de un sistema	15
Figura 15 Lazo cerrado de un sistema	16
Figura 16 Diagrama de bloques de un bond graph en lazo cerrado	18
Figura 17 Esquema general de un sistema con controlador.....	18
Figura 18 Controlador proporcional	19
Figura 19 Controlador proporcional integral	20
Figura 20 Controlador proporcional integral derivativo (PID).....	22
Figura 21 Control proporcional en Bond Graph	24
Figura 22 Controlador proporcional integral	26
Figura 23 Controlador proporcional integral derivativo.....	28
Figura 24 Motor de corriente directa controlado por armadura.....	30
Figura 25 Modelo del motor de cd en lazo abierto.....	30
Figura 26 Respuesta en lazo abierto del motor de cd	33
Figura 27 Retroalimentación de estados para el motor de cd	33
Figura 28 Respuesta para retroalimentación de estados del motor de cd	35
Figura 29 Diseño del controlador PI para el motor de corriente directa en Bond Graph	36
Figura 30 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 0.4	39
Figura 31 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 4.....	40
Figura 32 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 40	40
Figura 33 Tanques acoplados	41
Figura 34 Modelo del sistema de nivel de líquido en lazo abierto	42
Figura 35 Sistema de nivel de líquido lazo abierto.....	44
Figura 36 Sistema de nivel de líquido con retroalimentación de estados.....	44
Figura 37 Respuesta del sistema de nivel de líquido con retroalimentación de estados	47
Figura 38 Controlador proporcional integral para el sistema de nivel de líquido.....	48
Figura 39 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 2.....	52
Figura 40 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 20.....	52
Figura 41 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 200.....	53
Figura 42 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 2000.....	53

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Variables generalizadas para sistemas físicos.....	4
Tabla 2 Relaciones constitutivas	5
Tabla 3 Consideraciones causales para multipuertos básicos.....	9

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTROLADORES AUTOMÁTICOS

Un sistema automático de control es un conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir, sin intervención de agentes exteriores (incluido el factor humano), corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

Actualmente, cualquier mecanismo, sistema o planta industrial presenta una parte actuadora, que corresponde al sistema físico que realiza la acción, y otra parte de mando o control, que genera las órdenes necesarias para que esa acción se lleve o no a cabo. Para explicar el fundamento de un sistema de control se puede utilizar como ejemplo un tirador de arco. El tirador mira a la diana, apunta y dispara. Si el punto de impacto resulta bajo, en el próximo intento levantará más el arco; si la flecha va alta, en la siguiente tirada bajará algo más el arco; y así sucesivamente, hasta que consiga la diana. El tirador sería el elemento de mando (da las órdenes de subir o bajar el brazo) y su brazo el elemento actuador.

Un ejemplo sencillo de sistema automático lo constituye el control de temperatura de una habitación por medio de un termostato, en el que se programa una temperatura de referencia que se considera idónea. Si en un instante determinado la temperatura del recinto es inferior a la deseada, se producirá calor, lo que incrementará la temperatura hasta el valor programado, momento en que la calefacción se desconecta de manera automática.

1.2 OBJETIVO

El objetivo general de este trabajo de tesis es aplicar los controladores PI y retroalimentación de estado en conjunto a un motor de corriente directa y a un sistema de nivel de líquido, utilizando el enfoque de Bond Graph para la representación de los modelos, posteriormente analizar qué el sistema se mantiene estable.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Se estima que más de la mitad de los controladores utilizados actualmente en la industria son los controladores PID o alguna de sus modificaciones aunque la retroalimentación de estados se puede considerar más eficiente y estable en su proceso. También señalando que la herramienta de Bond Graph ha mostrado su

eficiencia en gran número de aplicaciones, para el diseño de sistemas, simulación y determinación de las leyes de control.

1.4 METODOLOGÍA

En esta tesis vamos implementar el diseño de controladores proporcional integral (PI) y la retroalimentación de estados para los dos diferentes sistemas que son: un sistema de nivel de líquido de segundo orden y un motor de corriente directa en Bond Graph, utilizando el software-20-sim que es el software requerido para la simulación, ya que nos servirá para analizar los diferentes tipos de respuesta que obtendremos a la salida.

1.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El desarrollo del presente trabajo de tesis consta de cinco capítulos descritos a continuación a grandes rasgos. En el capítulo 1 se da una breve introducción del contenido global de la tesis, así como el objetivo de la realización de la presente investigación de este proyecto.

En el capítulo 2 “modelado de sistemas en bond graph” se describe detalladamente como es el método de Bond graph y la importancia que tiene dentro de los sistemas dinámicos esto para la implementación de los modelados de sistemas eléctricos e hidráulicos

En el capítulo 3 denominado “diseño de controladores en Bond Graph” vemos lo que es la retroalimentación de estado y como representarlo modelándolo en Bond Graph, así como el controlador PI (control proporcional integral) que es más común y los resultados obtenidos se comprueban mediante simulaciones utilizando el 20-SI.

En el capítulo 4 llamado “casos de estudios” vamos a dar una pequeña introducción acerca del motor de CD para poder aplicar la retroalimentación de estados y el control PI, así como también analizaremos un control de un sistema de nivel de líquido aplicando de igual manera ambos tipos de control.

Finalmente en el capítulo 5 se da una serie de conclusiones, recomendaciones y comentarios finales acerca de los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo de tesis.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE BOND GRAPH

2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo del análisis de un sistema dinámico es obtener su modelo encontrando sus ecuaciones matemáticas que representa el comportamiento del mismo. Para obtener dicho modelo matemático se puede seguir la metodología de una función de transferencia o variables de estado que son los más comunes, una función de transferencia se emplea en los sistemas lineales aunque el método de variables de estado puede manejarse en sistemas no lineales, pero en esta tesis vamos a enfocar los métodos de control proporcional integral (PI) y retroalimentación de estado, enfocado al método de Bond Graph que es más sencillo y que se puede manejar tanto en los sistemas lineales como en los no lineales.

2.2 BOND GRAPH

Un Bond Graph es una representación gráfica de un sistema dinámico donde los componentes hacen un intercambio de energía a través de los puertos.

La metodología del Bond Graph fue inventado por Henry Paynter. El término "Bond Graph" viene del hecho de que muchos de estos gráficos se parecen a los bonos de la química. El intercambio de potencia es descrito a través de los diferentes componentes que interactúan con puertos de energía formando así lo que se le conoce como Bond Graph. Más tarde la teoría fue desarrollada por muchos investigadores como Karnopp (1983), Breedveld (1984), Rosenberg (1990) y Thomas (1991), etc. Quienes trabajaron bajo esta técnica en el modelado de varios sistemas.

2.3 COMPONENTES BÁSICOS DE UN BOND GRAPH

El componente fundamental del Bond Graph es el bond de energía representada en la figura 1 utilizado para acoplar los puertos de energía de los componentes del sistema. En bond es representado por una semiflecha que está indicando la dirección de esta como fluye la energía entre los puertos al cual esta conectado.

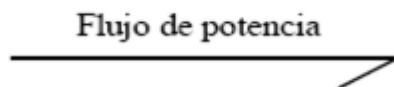


Figura 1 Representación de un Bond

Dentro del mismo Bond transmite una potencia instantánea variable en el tiempo y esta es expresada por el producto de dos variables: el esfuerzo $e(t)$ y el flujo $f(t)$ estando ambas en función del tiempo, como se muestra en la expresión 2.1.

$$Potencia = e(t) * f(t) \quad (2.1)$$

En sistemas que almacenan energía es necesario definir palabras que representen el estado del sistema llamadas variables de energía, denominadas momento $p(t)$ o esfuerzo acumulado $e_a(t)$ desplazamiento $q(t)$ o flujo acumulado $f_a(t)$ donde $q(t)$ y $p(t)$ son denominadas variables energéticas o dinámicas.

En la tabla 1 se muestran las variables generalizadas utilizadas por Bond Graph para las ecuaciones matemáticas que representan el modelado de diferentes sistemas físicos.

Tabla 1 Variables generalizadas para sistemas físicos

Variable	General	Electrico	Mecanico Traslacional	Mecanico rotacional	Hidraulico
Esfuerzo	$e(t)$	$v(t)$ Voltaje	$F(t)$ Fuerza	$\tau(t)$ par	$P_e(t)$ Presión
Flujo	$f(t)$	$i(t)$ Corriente	$V(t)$ Velocidad	$W(t)$ Velocidad angular	$Q(t)$ Caudal
Momento	$p(t) = e(t)dt$	$\lambda(t)$ Enlace de Flujo	$P_R(t)$ Momento rotacional	$H(t)$ Momento angular	$P_p(t)$ Integral de presión
Desplazamiento	$q(t) = \int f(t)dt$	$q(t)$ Carga	$X(t)$ Distancia	$\ell(t)$ angulo	$V(t)$ Volumen
Potencia	$p(t) = e(t)i(t)$	$V(t)i(t)$	$F(t)V(t)$	$\tau(t)w(t)$	$P_e(t)V(t)$
Energia	$E(p) = \int f(p) d(p)$ $E(q) = \int e(q) d(q)$	$\int i(\lambda)dp$ $\int edq$	$\int V(P_R)dp$ $\int F(x)dq$	$\int w(H)dH$ $\int \tau(\theta)d\theta$	$\int Q(P_p)dP_p$ $\int P_e(V)dV$

También se deben conocer diferentes elementos que ayudan para el análisis de modelado con la técnica de Bond Graph los cuales describimos a continuación.

2.3.1 PUERTOS -1 PASIVOS

Consideramos elementos ideales, los cuales representan disipación de potencia y dos formas de almacenamiento de energía; estos son la resistencia, capacitor e inductor. En la tabla 2 se muestran elementos de disipación R, de almacenamiento de flujo C y de almacenamiento de esfuerzo I para sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos.

Tabla 2 Relaciones constitutivas

Elemento	Relación	Eléctrico	Mecánico	Hidráulico
R	Lineal	$v(t)=R(i)$	$F(t)=bV(t)$	$\Delta P_r(t)=RQ(t)$
	No lineal	$V=\Phi(i)$	$F=\Phi V$	$\Delta P=\Phi(Q)$
C	Lineal	$v(t)=\frac{1}{C}\int idt$	$F(t)=k\int Vdt$	$P_r=C\int \Delta Qdt$
	No lineal	$V=\Phi(q)$	$F(t)=c(x)$	$P_r(t)=\Phi(v)$
I	Lineal	$i(t)=\frac{1}{L}\int vdt$	$V(t)=\frac{1}{M}\int Fdt$	$Q(t)=I\int \Delta P_r dt$
	No lineal	$i(t)=\Phi(Y)$	$V(t)=\Phi(P)$	

En la figura 2 se muestra el esquema llamado tetraedro de estado, el cual se observa cómo se relacionan las variables generalizadas por tres puertos-1 pasivos.

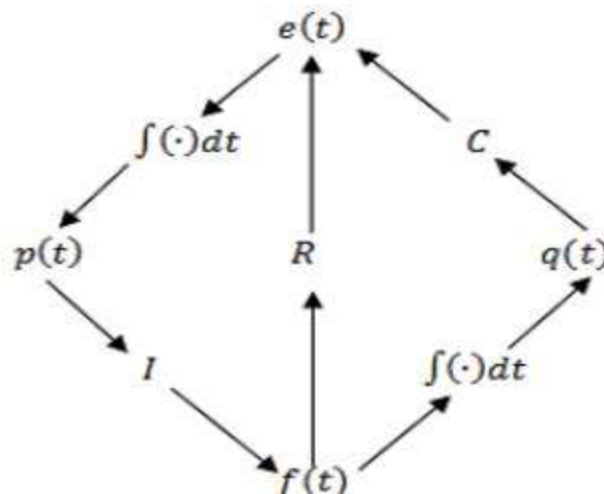


Figura 2 Tetraedro de estado

2.3.2 PUERTOS -1 ACTIVOS O FUENTES

Los elementos que introducen energía al sistema son llamados fuentes. Existen dos tipos de fuentes, fuente de esfuerzo y fuente de flujo denotadas MSe y MSf , representados en la figura 3

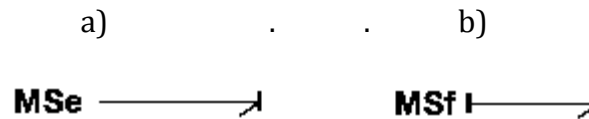


Figura 3 Puertos -1 Activos a) fuente 1

2.3.3 ELEMENTOS IDEALES PUERTOS-2

Consideremos ahora los elementos ideales puerto-2 llamados transformador (TF) y girador (GY), que son sistemas lineales que cambian la relación entre las variables de flujo y esfuerzo. Los bonds que representan al transformador están en la figura 4 donde n es el modulo del transformador.

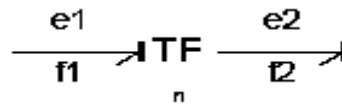


Figura 4 Bond Graph del transformador

Las relaciones de las variables generalizadas para el bond del transformador están dadas por:

$$e_2(t) = ne_1(t) \quad (2.2)$$

$$f_2(t) = \frac{1}{n} f_1(t) \quad (2.3)$$

Un transformador se relaciona el flujo-flujo y esfuerzo-esfuerzo, por el contrario en un girador se establece la relación entre flujo-esfuerzo y esfuerzo flujo, donde r es el modulo del girador mostrándose en la figura 5. Las relaciones de las variables de bond generalizadas están dadas por:

$$e_1(t) = rf_2(t) \quad (2.4)$$

$$f_1(t) = \frac{1}{r} e_2(t) \quad (2.5)$$

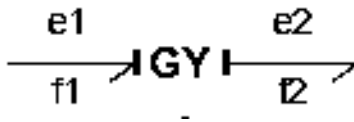


Figura 5 Bond Graph de un girador

2.3.4 LOS ELEMENTOS DE UNIÓN, PUERTOS-3

Estos son utilizados para unir dos o más bonds. Hay dos tipos de uniones, la unión 0 y la unión 1. Ellos conservan la potencia y también representan los dos tipos de conexiones serie y paralelo.

La unión 0, unión de flujo o esfuerzo común para la conexión en paralelo en la figura 6 se muestra la representación de esta unión.

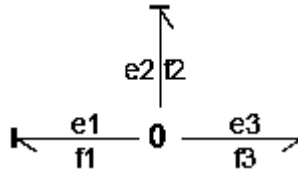


Figura 6 union-0

Las relaciones de interconexiones están dadas por:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (2.6)$$

$$f_1(t) + f_2(t) + f_3(t) = 0 \quad (2.7)$$

La unión 1, unión de esfuerzo o flujo común representa la conexión serie mostrada en la figura 7

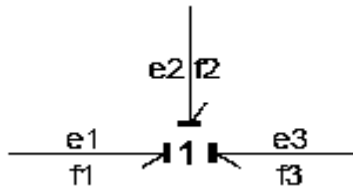


Figura 7 union-1

Las relaciones de interconexión se representan por:

$$e_1(t) + e_2(t) + e_3(t) = 0 \quad (2.8)$$

$$f_1(t) = f_2(t) = f_3(t) \quad (2.9)$$

2.4 CAUSALIDAD

La causalidad define las relaciones de causa y efecto así como las leyes constitutivas de componentes en conjunto con las ecuaciones diferenciales, esta relación de causa y efecto de esfuerzo y flujo son representados en direcciones opuestas, teniendo la dirección de esfuerzo en sentido del trazo causal como se muestra en la figura 8.

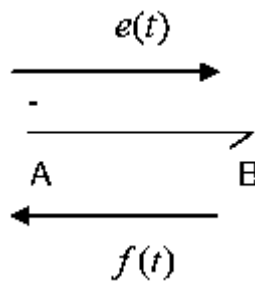
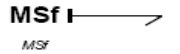
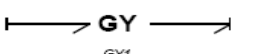
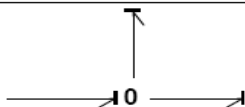
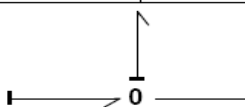
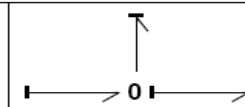
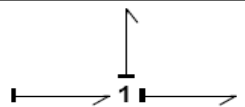
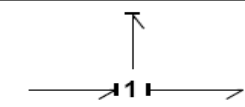
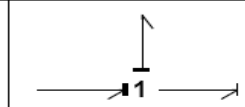
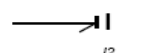
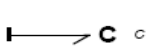
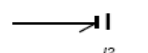
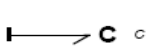
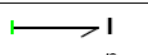
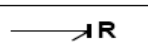
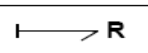


Figura 8 Causalidad para un Bond

Para el trazo causal se debe cumplir las siguientes reglas de la tabla 3

Tabla 3 Consideraciones causales para multipuertos básicos

Causalidad Necesaria	 MSe		 MSf	
	 TF		 $TF1$	
Causalidad restrictiva	 GY		 $GY1$	
	 0	 0	 0	
	 1	 1	 1	
	 $I2$		 C	
Causalidad integral	 $I2$		 C	
Causalidad derivativa	 $I2$		 C	
Causalidad arbitraria	 R		 R	

2.5 PROCEDIMIENTO PARA LA ASIGNACIÓN DE CAUSALIDAD EN UN MULTIPUERTO

A continuación vamos a describir el procedimiento que se enfoca a la tabla 3 para la asignación de causalidad de un multipuerto y que se debe seguir para cualquier modelo de un sistema en Bond Graph.

1. Considerar cualquier Mse o MSf y asignar su causalidad requerida e inmediatamente extender las implicaciones causales, usando las restricciones de 0, 1, TF , GY
2. Asignar causalidad integral a los elementos C e I respetando las restricciones de la tabla 3
3. Escoger cualquier R que no esté asignado y dar una causalidad arbitraria a R. Extender las implicaciones usando 0, 1, TF , GY .

2.6 CAUSALIDAD DERIVATIVA EN UN BOND GRAPH

Esta causalidad se presenta cuando el sistema contiene elementos de almacenamiento de energía que no son dinámicamente independientes.

Esto se presenta por ejemplo, cuando en un sistema eléctrico, dos capacitores en paralelo como se ilustra en la figura 9

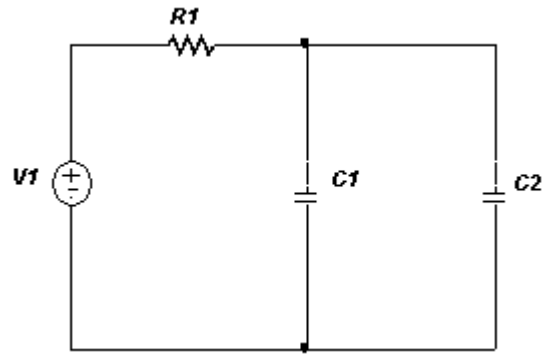


Figura 9 Circuito eléctrico en causalidad derivativa

El número de elementos que almacenan energía en causalidad integral es el número de ecuaciones diferenciales linealmente independientes y el número de elementos almacenadores en causalidad derivativa es el número de ecuaciones diferenciales linealmente dependientes. En la figura 10 vemos un caso de causalidad derivativa.

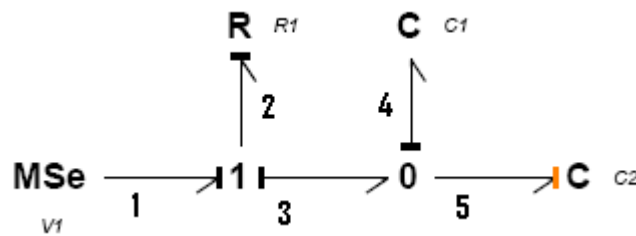


Figura 10 Elemento C2 en causalidad derivativa

2.7 Procedimiento para el modelado de sistemas

Para la representación de los sistemas físicos en general que sea modelado en Bond Graph se tiene la siguiente metodología

- 1) Dibujar una unión-0 para cada punto en el esquema donde las trayectorias paralelas coincidan
- 2) Dibujar una unión-1 para cada componente en una trayectoria serie y conectar el componente apropiado al Bond Graph por un bond en esa unión
- 3) Dibujar bonds entre uniones adyacentes, nuevamente indicando la dirección de flujo de potencia.
- 4) Remover la unión-0 que representa el punto de referencia y remover todos los bonds conectados a esta unión.
- 5) Simplificar la gráfica de acuerdo a las siguientes reglas:

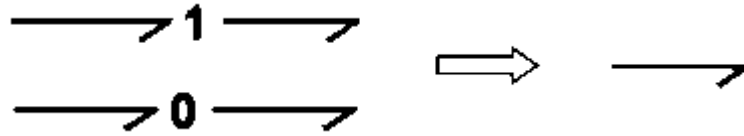


Figura 11 Simplificación de bonds

2.8 ESTRUCTURAS DE UNIÓN EN SISTEMAS MULTIPUERTO

Consideremos algunos tipos de sistemas grandes como campos interconectados, lo cual da una estructura dinámica, así la generación, manipulación y reducción de muchas ecuaciones es hecha sistemáticamente para una implementación exitosa.

2.8.1 VECTORES CLAVE O VECTORES SIGNIFICATIVOS

En Bond Graph en forma convencional, todos los bonds pueden ser clasificados en bonds externos que conectan a los elementos o puertos R , C , L , MSe y MSf , y en bonds internos que conectan a 0 , 1 , TF y GY . Así mismo, los bonds externos pueden ser clasificados de acuerdo a su forma de manifestación de energía. En la figura 12 muestra el diagrama a bloques de una estructura unión de un Bond Graph.

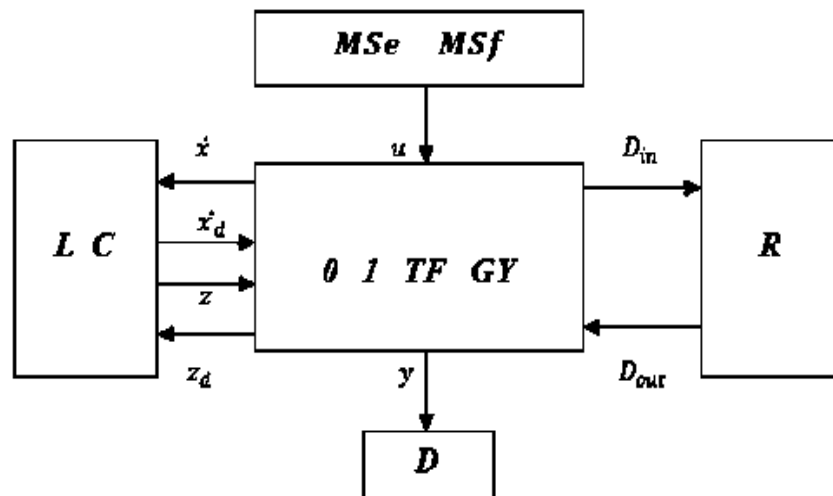


Figura 12 Diagrama de bloques de la estructura de unión de un Bond Graph

Las variables MSe , MSf , L , C y R denominados bonds externos denotan os campos fuente, de almacenamiento y disipación respectivamente, D el detector, 0 , 1 , TF y GY llamados bonds internos representan la estructura de unión con transformadores TF , giradores GY , uniones 0 y 1 .

Los vectores que representan al sistema llamados vectores clave están representados en la figura 12 donde $u(t)$ tiene una dimensión de p que contiene las variables de potencia. Los estados $x(t)$ tiene una dimensión de n y $x_d(t)$ tiene una dimensión de m están compuestos por variables de energía momento generalizado $p(t)$ en elementos l y desplazamiento generalizado $q(t)$ en elementos C en causalidad integral y derivativa respectivamente, $D_{in}(t)$ tiene una dimensión de r y D_{out} tiene también una dimensión de r son una mezcla de esfuerzos y flujos que muestran los intercambios energéticos entre el campo de disipación y la estructura de unión.

2.8.2 RELACIONES DE CAMPO Y ECUACIÓN DE ESTADOS

Las relaciones de campo no lineales de la figura 12 son de almacenamiento y de disipación representadas por:

$$Z(t) = \Phi_F(x) \quad (2.10)$$

$$Z_d(t) = \Phi_{Fd}(x_d) \quad (2.11)$$

$$D_{out}(t) = \Phi_L(\Phi_{in}) \quad (2.12)$$

donde :

φ_F - denota una función que relaciona cada z_{xi} con x_i para $i=1,...,n$

φ_{Fd} - denota una función que relaciona cada z_{di} con x_{di} para $i=1,...,m$.

φ_L - denota una función que relaciona cada D_{outi} con D_{in} para $i=1,...,r$

El comportamiento de un elemento específico está descrito por una ley física la cual es llamada como su relación constitutiva. Si las relaciones constitutivas son lineales tenemos:

$$Z(t) = Fx(t) \quad (2.13)$$

$$Z_d(t) = F_d X_d(t) \quad (2.14)$$

$$D_{OUT}(T) = L D_{in}(t) \quad (2.15)$$

donde L , F y F_d son matrices reales de dimensiones $r \times r$, $n \times n$, $m \times m$ respectivamente

Las relaciones de la estructura de unión están dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ D_{in}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{23} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ D_{out} \\ u(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$Z_d(t) = -S_{14}^T z(t) \quad (2.17)$$

Los elementos de S toman valores dentro del conjunto $(0, \pm 1, \pm n, \pm r)$ donde n y r son los módulos del transformador y girador. La matriz S está particionada de acuerdo a la dimensión de sus vectores clave. Las submatrices S_{ij} tienen las siguientes propiedades:

-P1.- S_{11} y S_{22} son matrices cuadradas anti simétricas.

-P2.- S_{12} es la matriz transpuesta negativa de S_{21} y viceversa.

Las propiedades P1 y p2 están basadas en el principio de conservación de energía.

Un sistema LTI MIMO está representado por variables de estado por:

$$\dot{x}(t) = A_p X(t) + B_p u(t) \quad (2.18)$$

$$y(t) = C_p X(t) + D_p U(t) \quad (2.19)$$

Relacionando todas las ecuaciones y matrices tenemos que:

$$A_p = E^{-1}(S_{11} + S_{12}MS_{21})F \quad (2.20)$$

$$B_p = E^{-1}(S_{13} + S_{12}MS_{23}) \quad (2.21)$$

$$C_p = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F \quad (2.22)$$

$$D_p = S_{33} + S_{32}MS_{23} \quad (2.23)$$

$$E = I + S_{14}F_d^{-1}S_{14}^T F \quad (2.24)$$

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L \quad (2.25)$$

Todas estas expresiones permiten la obtención directa del modelo de un sistema físico en variables de estado, utilizando la representación de bond Graph.

CAPÍTULO 3 DISEÑO DE CONTROLADORES EN BOND GRAPH

3.1 INTRODUCCIÓN

El control automático asienta sus bases principalmente en el concepto de retroalimentación. Este concepto se concreta en una estructura de control en el cual el controlador se puede entender como un operador que en función de la salida deseada de la planta, y la salida real medida, proporciona la acción control al aplicar en el sistema.

Si bien existen muchos tipos de control basados en este principio, el control proporcional, derivativo e integral (PID), es el que mayor implementación tiene en la industria de procesos. Donde dicho control consiste esencialmente en obtener la suma de los tres procesos. La amplia implementación del control PID en la industria, se debe fundamentalmente a varios factores como la actuación en función del error proporciona una estructura de realimentación negativa, que como es conocido, permite obtener en muchas ocasiones un comportamiento satisfactorio del sistema así como los términos derivativo e integral donde uno proporciona cierta anticipación sobre la respuesta al sistema y el otro permite eliminar el error en régimen permanente, entonces el control PID obtiene resultados satisfactorios para una amplia gama de procesos.

Analizando también la retroalimentación de estados es, que el problema que se presenta con este tipo de configuración para sistemas de orden superior, crece el número de variables de estado involucradas y se requiere una gran cantidad de transductores para detectar las variables de estado para la retroalimentación.

3.2 RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS

En la figura 13 muestra un sistema que genera la señal de control mediante la retroalimentación de las variables de estado a través de ganancias constantes reales de k^t . Este esquema es conocido como retroalimentación de estados. Cabe mencionar que este tipo de esquema, no corresponde a los controladores clásicos sin embargo, es el más utilizado en el enfoque de control moderno.

El problema que se presenta con este tipo de configuración es que para sistemas de orden superior, crece el número de variables de estado involucradas y se requiere una gran cantidad de transductores para detectar las variables de estado para la retroalimentación. Por lo tanto, las implementaciones del esquema de control

mediante la retroalimentación de estados pueden llegar a ser muy costosas e imprácticas. Aún para sistemas de bajo orden, a menudo no todas las variables de estado son directamente accesibles y puede ser necesario crear un observador o estimador de las variables de estado a partir de las mediciones de las variables de salida.

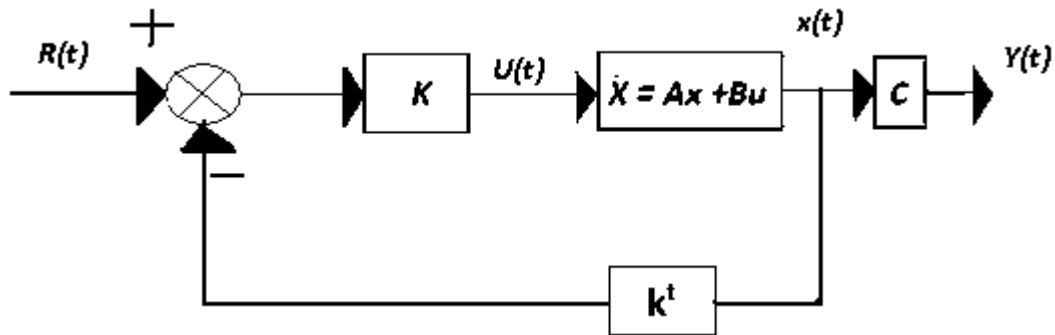


Figura 13 Estructura del controlador por retroalimentación de estados

Para hacer el controlador por retroalimentación de estados se lleva acabo el siguiente procedimiento:

Diseño de un controlador por retroalimentación de estado.

- Lazo abierto y lazo cerrado.
- Para los casos en donde un sistema inestable se quiera llevar hacia la estabilidad.
- Se utiliza asignación de polos (colocación de polos) del sistema.
- Esta acción se realizará mediante el diseño de un controlador por retroalimentación de estados en la entrada del sistema.

En la figura 14 se ilustra la estructura de lazo abierto de un sistema.

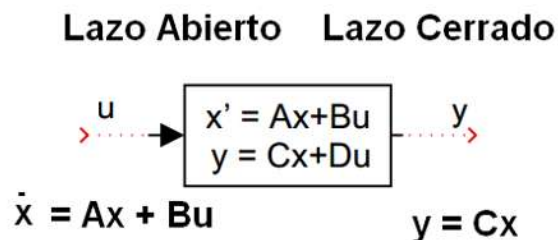


Figura 14 Lazo abierto de un sistema

- No existe retroalimentación de la salida hacia la entrada $B=0$.
- El control no está dada como una función de la salida del sistema $u = 0$
- $\dot{x} = Ax + Bu$. La matriz del sistema en lazo abierto será A .

En la figura 15 se ilustra un sistema de lazo cerrado con su modelo matemático.

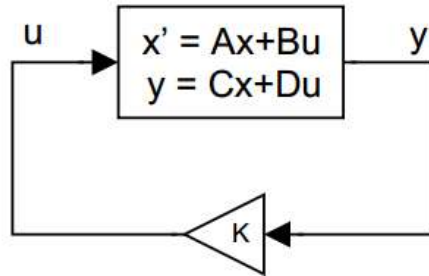


Figura 15 Lazo cerrado de un sistema

$$\dot{x} = Ax + Bu ; u = Kx \quad \quad \quad = Ax + BKx = (A + BK)x$$

- Se cierra el lazo de retroalimentación de la salida-entrada $u = Kx$, donde K es una matriz de ganancias K , que multiplican a cada una de las variables de estado x .
- La matriz de lazo cerrado del sistema de esta manera es

$$A_c = A + BK. \quad (3.1)$$

3.2.1 ASIGNACIÓN DE POLOS

Procedimiento que consiste en determinar las ganancias K de la retroalimentación de estado tal que los polos del sistema en lazo cerrado tengan ciertos valores deseados.

- Valores propios del sistema de lazo cerrado son las raíces de polinomio característico

$$\Delta(\lambda) = \det[sI - A + BK] = 0 \quad (3.2)$$

- Condición: si y sólo si el sistema de lazo abierto (A, B) es controlable, se puede lograr tener los valores propios deseados

$$\Gamma = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (3.3)$$

- Ecuación característica de lazo cerrado (con retroalimentación) se iguala a ecuación Característica deseada.

$$\det[sI - A + BK] = 0 \leftrightarrow (s - \lambda_1)(s - \lambda_2) \cdots (s - \lambda_n) = 0$$

$$\Rightarrow k_1, k_2, \dots, k_n \quad (3.4)$$

Entonces para resumir este método para encontrar el controlador que va hacer estable al sistema si y sólo si es controlable se tiene lo siguientes pasos.

1. Verificar si el sistema es controllable
2. Obtener la ecuación característica del sistema y sus valores propios
3. Expresar la matriz lazo cerrado A_c y su ecuación característica
4. Determinar ecuación característica deseada polos deseados
5. Encontrar ganancias de retroalimentación K por asignación de polos
6. igualar términos similares de la ecuación característica de lazo cerrado y deseada.
7. resolver para las ganancias de retroalimentación. n desconocidas.
8. Escribir el control por retroalimentación de estado $u = Kx$ y comprobar.

3.3 RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS EN BOND GRAPH

El número de elementos que almacenen energía, es el número de veces que el sistema se tiene que ser retroalimentado, sacando un bond activo de la unión de cada elemento y a su vez conectándolo a una fuente de esfuerzo o flujo según corresponda y cada una va a tener su respectiva ganancia, Para encontrar la matriz $\tilde{A}$, hay dos procedimientos donde uno es encontrar los vectores claves tomando en cuenta las ganancias y la otra es utilizar la siguiente expresión.

$$\tilde{A} = A + BK \quad (3.5)$$

Donde A y B son las matrices obtenidas del lazo abierto del mismo sistema y k es la matriz de ganancia de la forma $[Kg_1, kg_2, \dots, kg_N]$ pudiéndose utilizar los dos métodos a manera de comprobación.

En la figura 16 se muestra un diagrama de bloques de un Bond Graph en lazo cerrado, en esta figura las ganancias se muestran como giradores, pero dependiendo el sistema se puede cambiar a transformadores.

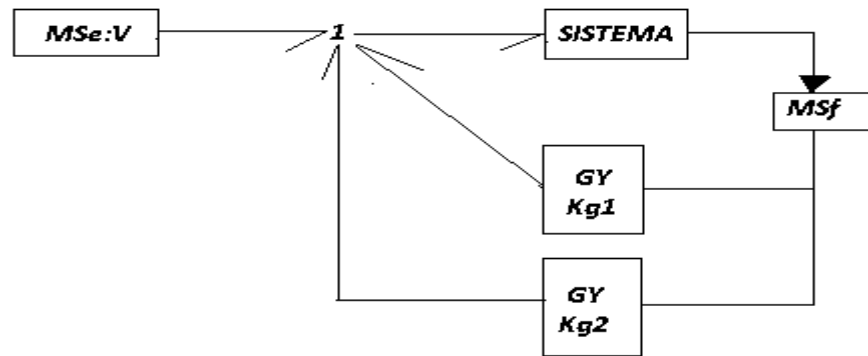


Figura 16 Diagrama de bloques de un bond graph en lazo cerrado

3.4 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

En la figura 17 podemos ver un esquema general de un sistema con controlador, donde observamos que el controlador tiene como entrada la señal de error, siendo esta la diferencia entre la salida y una entrada de referencia, así mismo tiene como salida la acción de control de la planta que es directamente la entrada a la misma, por lo que, tanto el bloque del controlador como el bloque de la planta pueden ser vistos como una propia estructura de unión.

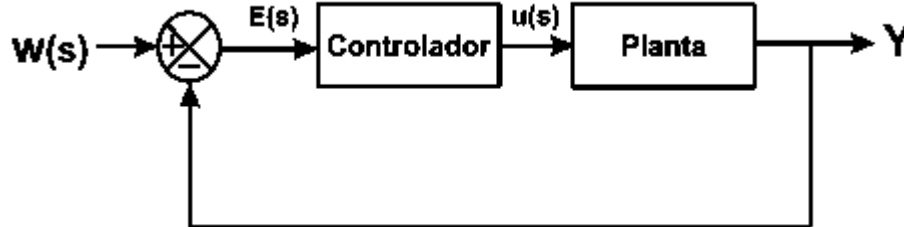


Figura 17 Esquema general de un sistema con controlador

3.4.1 CONTROL PROPORCIONAL

El control proporcional es el tipo de control que utilizan la mayoría de los controladores que regulan la velocidad de un automóvil. Si el automóvil se encuentra moviéndose a la velocidad objetivo y la velocidad aumenta ligeramente, la potencia se reduce ligeramente, o en proporción al error (la diferencia entre la velocidad real y la velocidad objetivo), de modo que el automóvil reduce la velocidad poco a poco y la

velocidad se aproxima a la velocidad objetivo, por lo que el resultado es un control mucho más suave que el control tipo encendido/apagado.

En el algoritmo de control proporcional, la salida del controlador es proporcional a la señal de error, que es la diferencia entre el punto objetivo que se desea y la variable de proceso. En otras palabras, la salida de un controlador proporcional es el producto de la multiplicación de la señal de error y la ganancia proporcional.

Esto puede ser expresando matemáticamente como:

$$P_{out} = k_p * e(t) \quad (3.6)$$

dónde:

- P_{out} : Salida del controlador proporcional
- K_p : Ganancia proporcional
- $e(t)$: Error de proceso instantáneo en el tiempo t . $e(t) = SP - PV$
- SP : Punto establecido
- PV : Proceso variable

En la siguiente figura 18 podemos observar un control proporcional.

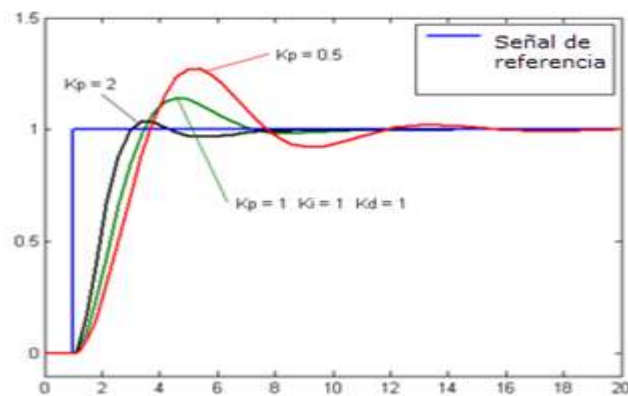


Figura 18 Controlador proporcional

3.4.2 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

En realidad no existen controladores que actúen únicamente con acción integral, siempre actúan en combinación con reguladores de una acción proporcional, complementándose los dos tipos de reguladores, primero entra en acción el regulador proporcional (instantáneamente) mientras que el integral actúa durante un intervalo de tiempo (T_i =tiempo integral).

La ecuación que modela a este sistema está dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p * \left(\frac{1}{T_i * s} + 1 \right) \quad (3.7)$$

Donde K_p y T_i son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si T_i es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña, su efecto será atenuado, Y viceversa.

En la figura 19 se muestra la respuesta temporal de un regulador PI.

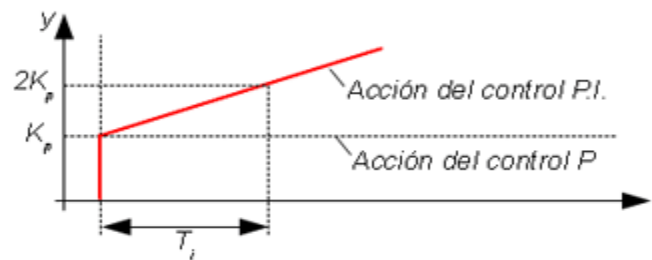


Figura 19 Controlador proporcional integral

El controlador PI mantiene una acción de control siempre que el área bajo la curva del error sea diferente de cero. Esta es la característica que le permite eliminar el error en estado estable. El controlador PI eliminará las oscilaciones que podría tener el controlador on-off y eliminará el error en estado estable que permite el controlador P. El costo por tener estas características radica en un efecto negativo sobre la velocidad de respuesta reduciéndola y comprometiendo la estabilidad del sistema. Por estas razones en la industria este tipo de controlador se utiliza cuando el tiempo no es un problema.

El término integral suma el valor instantáneo del error a través del tiempo, este término contribuye proporcionalmente para reducir la magnitud y duración del error. La magnitud con que el término integral contribuye a la acción de control se determina por medio de la ganancia integral.

El término integral, acelera la respuesta y elimina el error en estado estable que mantiene el controlador tipo P. Este término integral depende del error acumulativo por lo que en ocasiones puede producir sobre-impulsos no deseados. Para obtener respuestas más rápidas se debe permitir un sobre-impulso cada vez mayor. Esto modifica la dinámica del sistema y puede llevarlo a la inestabilidad.

3.4.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO(PD)

El controlador derivativo se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas. Si consideramos que:

- $y(t)$ = Salida diferencial.
- $e(t)$ = Error (diferencia entre medición y punto de consigna [PC]. El PC no es otra cosa que el nivel deseado al que queremos que vuelva el sistema).
- T_d = Tiempo diferencial, se usa para dar mayor o menor trascendencia a la acción derivativa.

La salida de este regulador es:

$$y(t) = t_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (3.8)$$

Si la variable de entrada es constante, no da lugar a respuesta del regulador diferencial, cuando las modificaciones de la entrada son instantáneas, la velocidad de variación será muy elevada, por lo que la respuesta del regulador diferencial será muy brusca, lo que haría desaconsejable su empleo.

3.4.4 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

Es un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, mientras que si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de ofrecer una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones. Presenta el inconveniente de que este sistema es muy propenso a oscilar y los ajustes de los parámetros son mucho más difíciles de realizar.

La salida del regulador viene dada por la siguiente ecuación:

$$y(t) = K_p * e(t) + K_p * t_d * \frac{de(t)}{dt} + K_p * \frac{1}{t_i} * \int e(t) dt \quad (3.9)$$

En la figura 20 mostramos el control de un PID a un proceso.

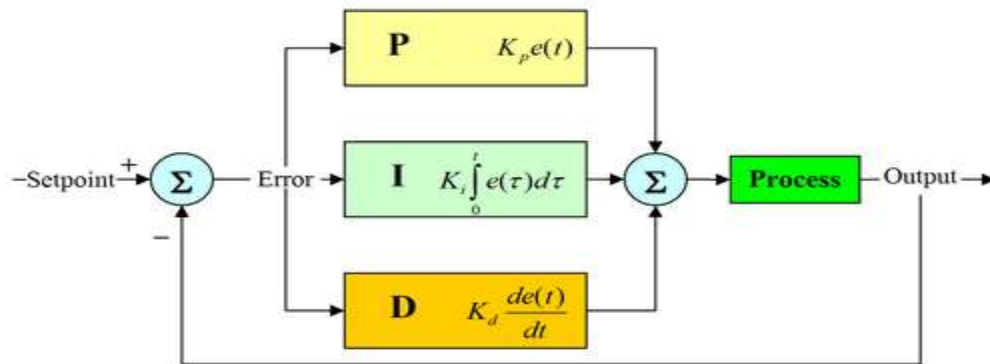


Figura 20 Controlador proporcional integral derivativo (PID)

3.5 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID) EN BOND GRAPH

A continuación se analiza los efectos de cada controlador a manera de comprobar la acción que tienen de cada uno sobre el sistema, es decir se da una explicación de cada uno, así como sus ecuaciones que los rigen para ver la manera en que llegan al sistema.

3.5.1 CONTROL PROPORCIONAL (P)

Este tipo de controlador está constituido por un amplificador con ganancia constante K_p o ganancia proporcional, este tipo de sistemas por lo general no se utiliza en sistemas de control que requieran precisión a la salida. En la figura 21 muestra el modelado en Bond Graph con control proporcional, donde la salida u , se obtiene de la ganancia proporcional multiplicado por el error como se muestra en la expresión (3.15), donde el símbolo $R:K_p$ tiene como función hacer el control proporcional en base a que afecta de manera directa a la operación con que se determina la función de u .

También haciendo referencia a que el control proporcional no alcanza el valor deseado a la entrada es por eso que se utiliza para sistemas donde la precisión no sea un factor clave.

A continuación se hace una comprobación para determinar la ecuación del control proporcional.

Como R es el único elemento del controlador en Bond Graph se reduce a una sola flecha que transmite energía.

$$e_1 = e_2 \quad (3.10)$$

K_p es el control proporcional que tiene la resistencia.

$$e_2 = f_3 * k_p \quad (3.11)$$

Por las relaciones de interconexión respecto a las uniones y flujos tenemos:

$$f_3 = f_1 \quad (3.12)$$

$$e_2 = f_1 * k_p \quad (3.13)$$

V es el valor deseado, e y es la salida retroalimentándose.

$$f_1 = v - y \quad (3.14)$$

$$e_1 = (v - y)k_p \quad (3.15)$$

$-U(t)$ = salida proporcional.

$-K_p$ = ganancia proporcional.

$-(V - y)$ = error.

En la figura 21 tenemos el control proporcional en Bond Graph del cual podemos observar que el elemento resistivo tiene una ganancia que influye directamente en el punto de suma del diseño, como ya se comprobó con las ecuaciones anteriores y como salida esta del bond activo lleva el resultado al diseño del sistema que sea requerido, en este caso lo representamos con un bloque llamado planta.

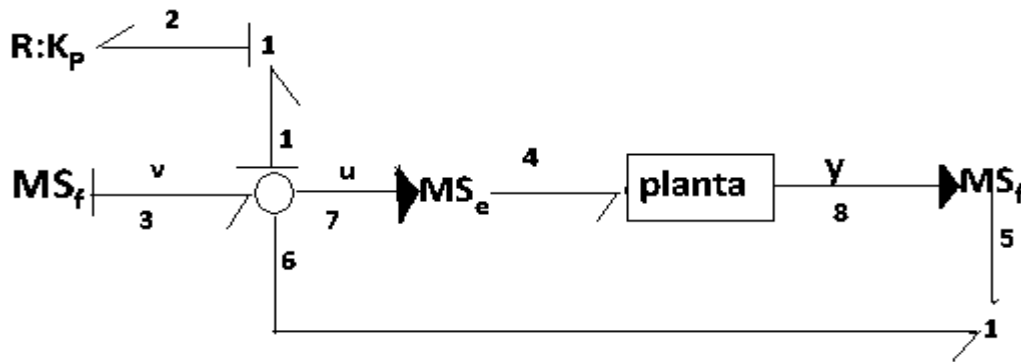


Figura 21 Control proporcional en Bond Graph

3.5.2 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

La función principal de la acción integral es asegurar que la salida del proceso sea igual a la referencia deseada en estado estable, y en la expresión 3.24 vemos la ecuación que rige a este tipo de controlador en el esquema de Bond Graph, señalando que tanto K_p como K_i son ajustables, la constante K_i ajusta la acción de control integral mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control.

A continuación vamos hacer la comprobación del control proporcional integral (PI), teniendo las operaciones que corresponden al control proporcional.

Tenemos la variable dinámica de $f q$, que también lo relacionamos con un capacitor para hacer el control integral determinamos:

$$\dot{x} = f_2 = \frac{dq_2}{dt} \quad (3.16)$$

Despejamos q_2

$$q_2 = \int f_2 dt \quad (3.17)$$

$$x = q_2 \quad (3.18)$$

$$\dot{x} = f_2 \quad (3.19)$$

$$z = e_2 \quad (3.20)$$

Igualando z a la matriz f y el valor de x que ya lo tenemos encontramos:

$$z = f^* x \quad (3.21)$$

$$e_2 = \frac{1}{K_I} q_2 \quad (3.22)$$

Sustituyendo tenemos que:

$$e_2 = \frac{1}{K_I} \int f_2 dt \quad (3.23)$$

Haciendo las equivalencias que ya se obtuvieron anteriormente podemos llegar a la siguiente expresión que es el control proporcional sumando el control integral (teniendo en cuenta que $f_1=f_2$ y que $f_1 = v - y$.) que es la ecuación 3.19.

$$U(t) = K_P \times (v - y) + \frac{1}{K_I} \int (v - y) d(t) \quad (3.24)$$

$U(t)$ = salida integral.

K_p = ganancia proporcional.

K_I = ganancia integral.

$(v - y)$ = error.

En la figura 22 se muestra el controlador proporcional integral en Bond Graph que a diferencia del anterior a este le agregamos un capacitor en la unión-1 del Bond-1, ya que con este elementó instalado en esta parte podemos proporcionar la acción de control PI, actuando la ganancia integral.

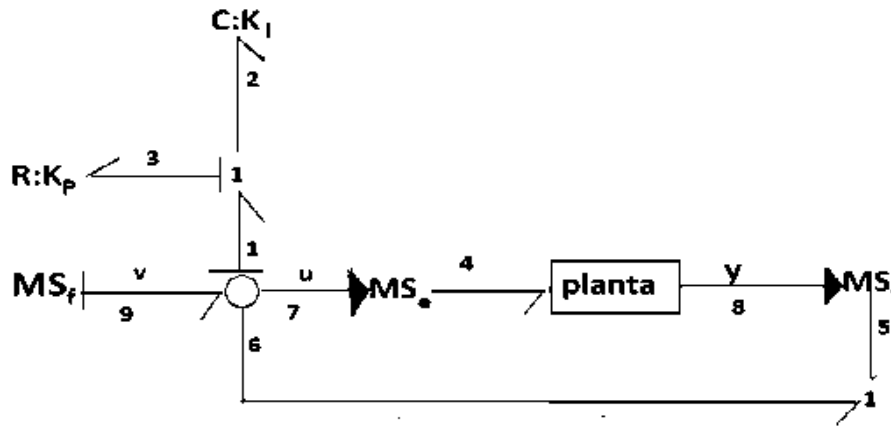


Figura 22 Controlador proporcional integral.

3.5.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

Debido a que el controlador PD puede añadir amortiguamiento a un sistema, pero no afecta la respuesta en estado estable, mientras que el PI puede mejorar la estabilidad relativa y el error en estado estable al mismo tiempo, aunque el tiempo de levantamiento se incrementa. Se hace necesario emplear un controlador PID que combine las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales.

En la expresión (3.31) se muestra el modelo de la expresión del controlador PID y las comprobaciones en Bond Graph para determinar la ecuación del PID añadiendo las expresiones ya determinadas en los controladores anteriores.

Igualando x a la variable dinámica de esfuerzo (e), y que lo podemos relacionar con un inductor para hacer el control derivativo obtenemos las siguientes expresiones:

$$X = P_4 \quad (3.21)$$

$$P_4 = K_D \times f_4 \quad (3.22)$$

$$\dot{x} = e_4 \quad (3.23)$$

$$Z = f_4 \quad (3.24)$$

$$Z = f \times x \quad (3.25)$$

Sustituyendo el valor de z , f y x obtenemos:

$$f_4 = \frac{1}{K_D} \cdot P_4 \quad (3.26)$$

Poniendo las variables en función del tiempo y sabiendo que $\frac{dp_4}{dt} = e_4$ determinamos la siguiente expresión.

$$\frac{dp_4}{dt} = k_D \frac{df_4}{dt} = e_4 \quad (3.27)$$

$$e_4 = k_D \frac{df_4}{dt} \quad (3.28)$$

Por las relaciones de interconexión tenemos:

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 \quad (3.29)$$

$$f_1 = (v - y) \quad (3.30)$$

Concluyendo, determinamos la siguiente ecuación del PID

$$U(t) = K_P \times f_1 + \frac{1}{k_I} \int f_1 dt + k_D \frac{df_1}{dt} \quad (3.31)$$

El control integral proporcional y derivativo es uno de los más usados en la industria y que pese a que tiene ventajas con respecto a las tres acciones de control anterior; si no se eligen adecuadamente sus parámetros K_p , T_i y T_d puede empeorarse el comportamiento del sistema.

Los PID's se recomiendan para procesos donde las constantes de tiempo son largas y no hay ruido. Algunos ejemplos de este tipo de procesos son los sistemas de temperatura y los de concentración. Los procesos en que las constantes de tiempo son cortas, rápidas y muy susceptibles al ruido presentan algunos problemas para ser controlados por la acción PID. En un sistema de control donde existe una gran influencia de ruido, las aplicaciones de modo derivativo solo produce como resultado la amplificación del ruido, porque la derivada del ruido, que cambia rápidamente, es un valor grande.

En la figura 23 se muestra como es el controlador PID en Bond Graph haciendo referencia a que el entrador en los sistemas, normalmente aparece en serie con la planta pero como ya vimos con las respectivas comprobaciones de qué manera influye el control a la respectiva planta.

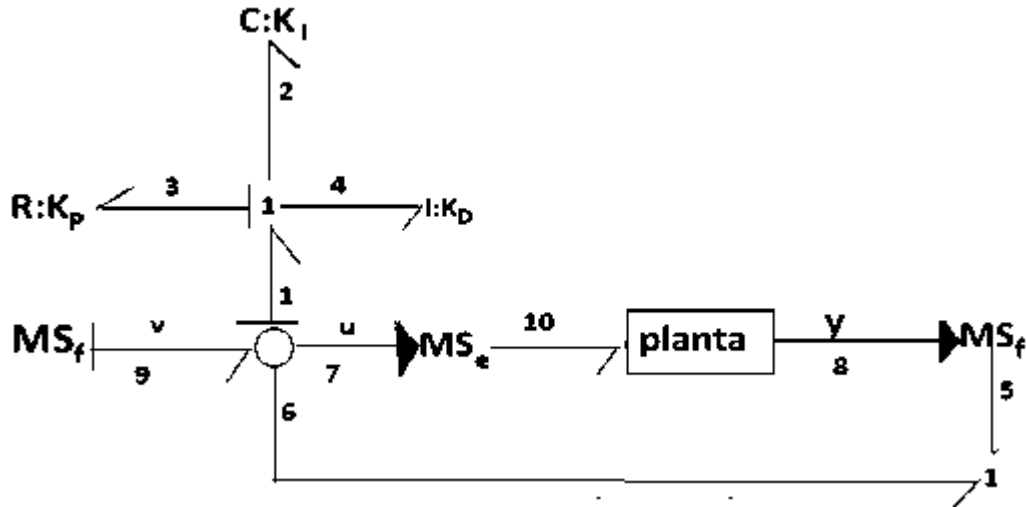


Figura 23 Controlador proporcional integral derivativo.

Como observamos en los diagramas en la parte del punto de suma siempre la salida la tenemos con un bond activo y una fuente de esfuerzo, aunque esta fuente puede variar dependiendo de lo que ocupe el sistema, en el próximo capítulo analizaremos dos diferentes sistemas, de los cuales vamos a tener un sistema de nivel de líquido y observaremos los cambios que ocurren a la llegada al sistema.

CAPÍTULO 4 CASOS DE ESTUDIO

4.1 INTRODUCCIÓN

La máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, par y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos. Pero con la llegada de la electrónica su uso ha disminuido en gran medida, ya que los motores de corriente alterna, del tipo asíncrono, pueden ser controlados de igual forma a precios más accesibles para el consumidor medio de la industria. A pesar de esto los motores de corriente continua se siguen utilizando en muchas aplicaciones de potencia (trenes y tranvías) o de precisión (máquinas, micro, motores, etc.)

También en este capítulo vamos a analizar un sistema de nivel de líquido en los cuales la mayoría de sistemas físicos son de naturaleza no lineal. Sin embargo, es posible realizar aproximaciones de estos sistemas para considerarlos como sistemas lineales. Así, la estabilidad es una de las características más importantes de los sistemas dinámicos. Cuando se analiza la estabilidad de dichos sistemas, surgen diferentes problemas según la manera en que se caracterice el propio sistema en consideración.

A lo que se pretende llegar en ese capítulo es a controlar el motor de corriente directa y el sistema de nivel de líquido implementando el controlador proporcional integral (PI) para ambos casos, así como poder hacer estables a los 2 sistemas con la retroalimentación de estados.

4.2 CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (CD)

En la ingeniería de control es frecuente el uso de dispositivos híbridos, en donde se tienen variables eléctricas y mecánicas, a estos se le denomina sistemas electromecánicos. Un ejemplo de estos sistemas lo constituyen los motores de CD que a continuación se analiza.

Para un motor de CD controlado por armadura como el mostrado en la figura 24, vamos a analizar la parte de la armadura que es la parte dinámica, en la cual vamos a aplicar un voltaje $V_a(t)$ y el efecto de aplicar este voltaje causará que la armadura gire.

Considerando los siguientes parámetros para el motor:

J	Inercia	(kg × m).
R _a	Resistencia de armadura	(Ω).
v _a	Voltaje de armadura	(V).

w	Velocidad angular	(rad=s).
B	coeficiente de fricción	(N×m/rad/s).
-		

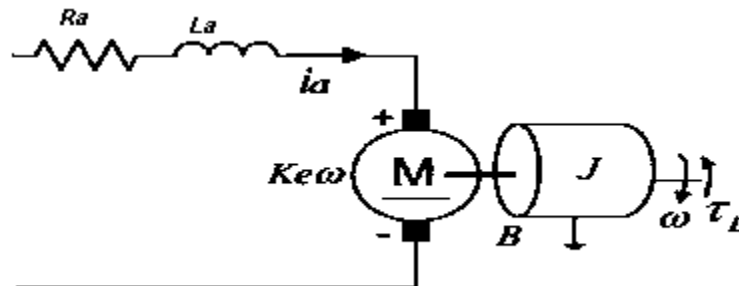


Figura 24 Motor de corriente directa controlado por armadura

4.2.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL MOTOR DE CD EN LAZO ABIERTO

Como podemos observar en la figura 25, el modelo en Bond Graph representamos los elementos básicos, que son la resistencia y la inductancia. Así como el rotor con sus componentes de inercia y fricción capturando de la última conexión un detector de flujo, y que con esto representamos la velocidad angular de un sistema mecánico en Bond Graph.

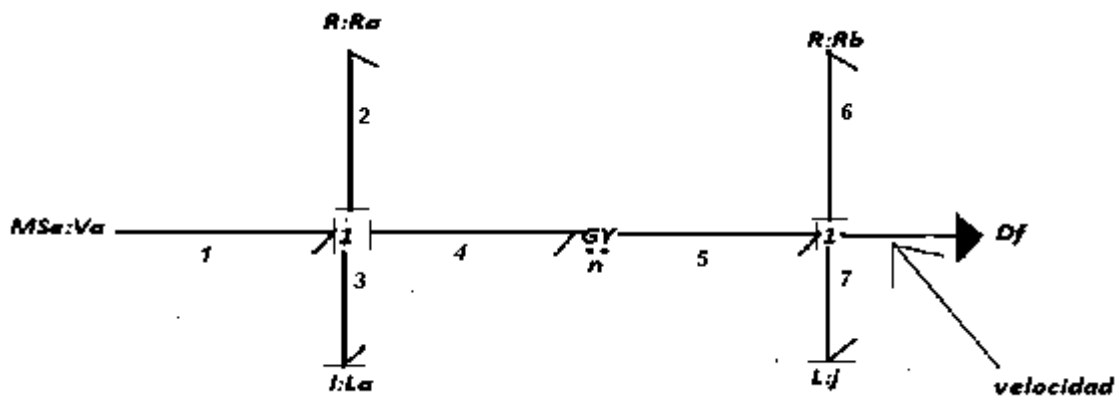


Figura 25 Modelo del motor de cd en lazo abierto.

A continuación vamos a obtener el modelo matemático de este sistema:

El primer paso es encontrar los vectores clave.

$$X = \begin{bmatrix} p_2 \\ p_6 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad \text{Din} = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_7 \end{bmatrix} \quad \text{Dout} = \begin{bmatrix} e_3 \\ e_7 \end{bmatrix}$$

$$L = \text{diagonal} \{ r_1, r_2 \} \quad F = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{l_1}, \frac{1}{l_2} \right\} \quad U = \{ e_1 \}$$

Después llenamos la matriz S viendo la secuencia de los Bonds en la figura anterior:

$$S = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \\ f_3 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -n & -1 & 0 & 1 \\ n & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \\ e_3 \\ e_7 \\ e_1 \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz A teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$. Como en la matriz s podemos observar que la matriz s_{22} (que consta de las filas y columnas 3 y 4) va a tener un valor de cero ($s_{22} = 0$) entonces $M = L$ por la siguiente equivalencia.

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L \quad (4.1)$$

$$A = \left(\begin{bmatrix} 0 & -n \\ n & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) * \begin{bmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{bmatrix}$$

Resolviendo operaciones tenemos que:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-r_1}{l_1} & \frac{-n}{l_2} \\ \frac{n}{l_1} & \frac{-r_2}{l_2} \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz B teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$. Como en la matriz s podemos observar que la matriz s_{23} (que consta de las filas 3 y 4 y de la columna 5) va a tener un valor de cero ($s_{23} = 0$) entonces $b = s_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$; Teniendo A y B procedemos a sustituir en la siguiente expresión los valores encontrados

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Sustituyendo tenemos que el modelo matemático del sistema de nivel de líquido a lazo abierto es:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{-r_1}{l_1} & \frac{-n}{l_2} \\ \frac{n}{l_1} & \frac{-r_2}{l_2} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u;$$

Después procedemos a obtener las variables de la salida, que son C y D: como se muestra a continuación.

$$\mathbf{C} = (\mathbf{S}_{31} + \mathbf{S}_{32}\mathbf{M}\mathbf{S}_{21})\mathbf{F}$$

$$\mathbf{C} = \left([0, 1] + [0, 0] \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [0, \frac{1}{l_2}]$$

A continuación con la siguiente equivalencia vamos a determinar la variable de salida **D**, así tenemos que $\mathbf{D} = \mathbf{S}_{33} + \mathbf{S}_{32}\mathbf{M}\mathbf{S}_{23}$, como s_{33} y $s_{23}=0$ entonces $\mathbf{D}=0$

Así tenemos que la salida del sistema es

$$\mathbf{Y} = [0, \frac{1}{l_2}] \mathbf{x}$$

Lo que procede es pasar a graficar la referencia, y lo que es el inductor J, teniendo como referencia la amplitud de la unidad, así para proceder a ver con el controlador PI el tiempo que tarda en estabilizarse, y en alcanzar el valor deseado, así como también la respuesta que tiene que dar con la retroalimentación de estados estabilizando el sistema con sus respectivas ganancias.

En la figura 26 observamos la respuesta en lazo abierto del motor de corriente directa.

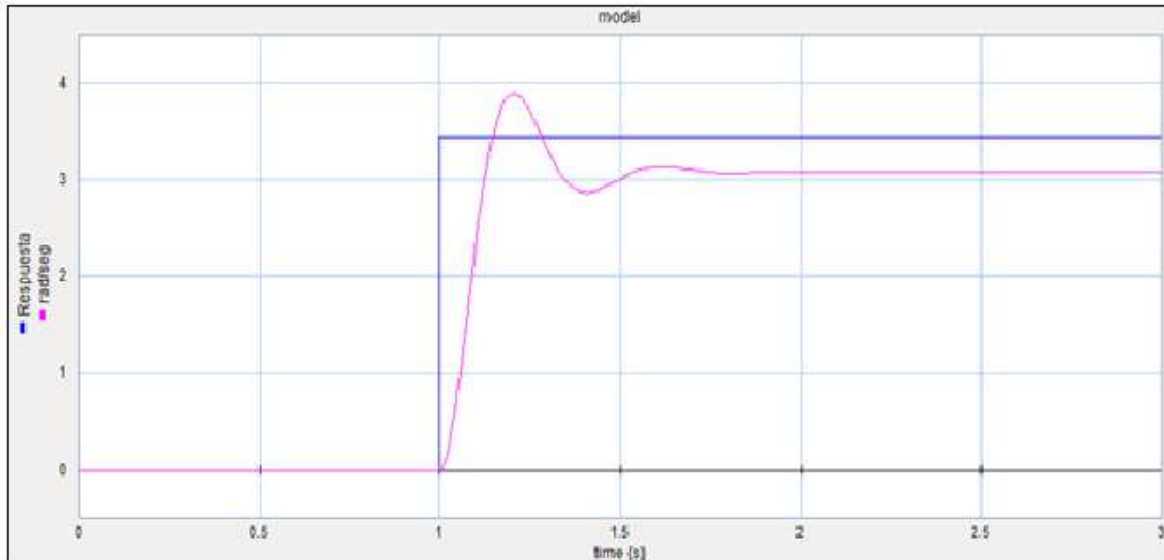


Figura 26 Respuesta en lazo abierto del motor de cd.

4.2.2 RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS

En este sistema vamos retroalimentar el número de elementos que almacenan energía mandándolos con un Bond activo a una fuente de flujo, para después utilizar lo giradores, que es donde están las ganancias que hacen estable al sistema y estos se tiene que utilizar debido a que la señal de entrada es de voltaje entonces para hacer la operación en el punto de suma, tiene que tener el mismo tipo de valores.

En la figura 27 mostramos la retroalimentación para motor de cd.

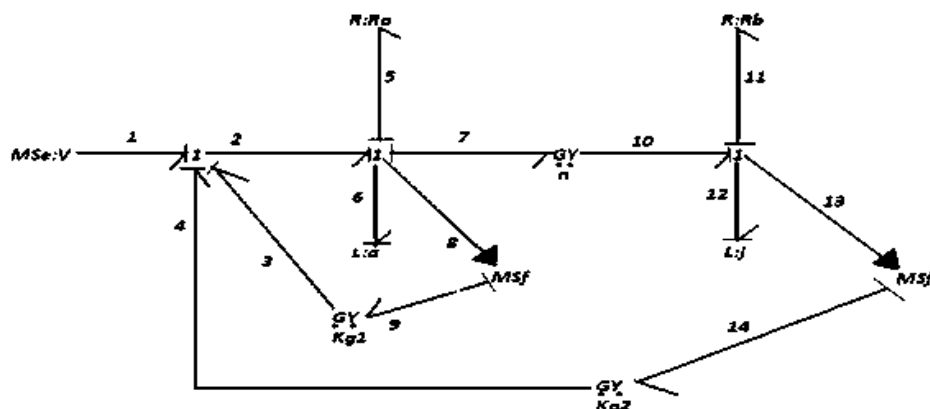


Figura 27 Retroalimentación de estados para el motor de cd

A continuación vamos a obtener el modelo matemático de este sistema:

El primer paso es encontrar los vectores clave.

$$x = \begin{bmatrix} p_6 \\ p_{12} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} e_6 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} f_6 \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad Din = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_{11} \end{bmatrix} \quad Dout = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_{11} \end{bmatrix}$$

$$L = \text{diagonal} \{ r_a, r_b \}$$

$$F = \text{diagonal} \{ L_a, L_j \}$$

$$U = [e_1]$$

$$y = \begin{bmatrix} f_8 \\ f_{13} \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} e_6 \\ e_{12} \\ f_5 \\ f_{11} \\ f_8 \\ f_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Kg1 & -n + kg2 & -1 & 0 & 1 \\ n & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_6 \\ f_{12} \\ e_5 \\ e_{11} \\ e_1 \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **A** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$. Como en la matriz **S** podemos observar que la matriz s_{22} (que consta de las filas y columnas 3 y 4) va a tener un valor de cero ($s_{22} = 0$) entonces $M = L$ por la siguiente equivalencia.

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L$$

Sustituyendo variables en la expresión de **A**.

$$A = \left(\begin{bmatrix} kg1 & -n + \\ n & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) * \begin{bmatrix} \frac{1}{l_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{l_2} \end{bmatrix}$$

Resolviendo operaciones tenemos que:

$$A = \begin{bmatrix} -r_a + kg_1 & (k_3 - 1)l_j \\ l_a & -l_j r_b \end{bmatrix}$$

En la simulación del motor de CD se puede comprobar que con un gran número de valores asignados a las ganancias, se tiene una respuesta estable y dinámica como podemos ver en la figura 27 donde mostramos las retroalimentaciones en el inductor la y el inductor lb.

En el software 20-sim se tienen los siguientes valores:

$$R_a = 0.2 \Omega$$

$$R_b = 0.5 \Omega$$

$$L_a = 0.1 \text{ H}$$

$$L_j = 1.7 \text{ H}$$

$$n = 2$$

y en las ganancias:

$$K_1=5$$

$$k_2=10$$

Así con estos valores obtenemos la siguiente gráfica que observamos en la figura 28.

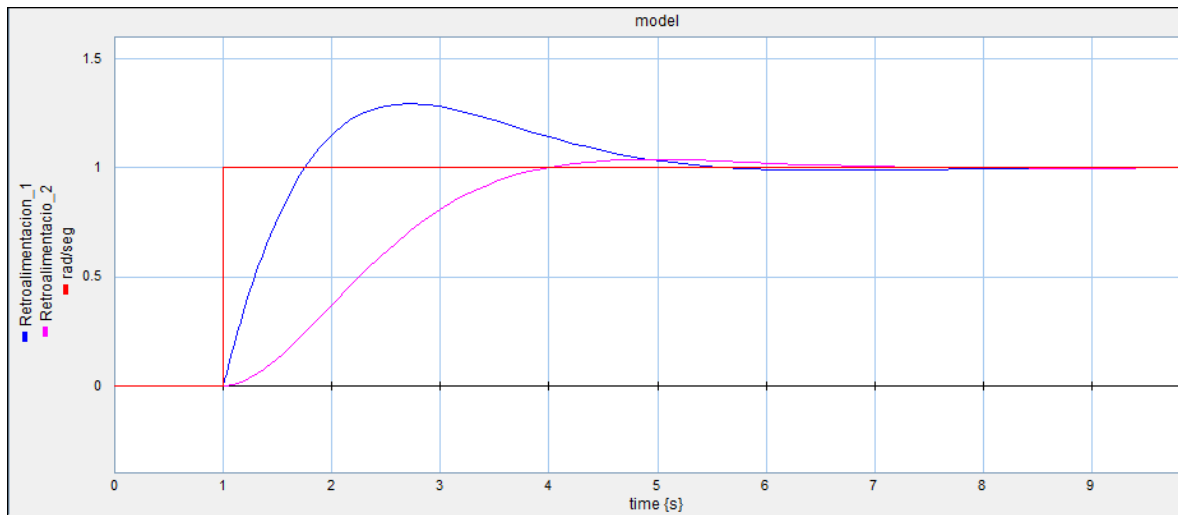
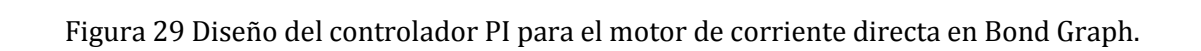


Figura 28 Respuesta para retroalimentación de estados del motor de cd

4.2.3 CONTROLADOR PI PARA EL MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA (CD)

A continuación vamos a implementar el controlador proporcional integral (PI) para el motor de corriente directa (CD) ya que con este tipo de controlador podemos estabilizar al sistema rápidamente y mantener un buen control en él, cómo lo podemos observar en las siguientes gráficas, así como el diseño en Bond Graph de motor de corriente directa en la figura 29, que como podemos observar los controladores están representados con una resistencia con una ganancia K_p y un capacitor con una ganancia K_I encontrando los valores correctos podemos tener un óptimo control sobre el sistema mencionando que podemos utilizar un rango amplio de ganancias ya que el sistema nos permite que pueda ser controlado sin tanto problema.


$$[g] \quad [f] \quad [\theta] \quad [f] \quad [f] \quad [f]$$

$$= \begin{bmatrix} e_4 \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad \text{L= diagonal} \left\{ \frac{1}{R_a}, \frac{1}{R_k}, \frac{1}{R_b} \right\} \quad \text{F=diagonal} \left\{ \frac{1}{c_1}, \frac{1}{l_a}, \frac{1}{l_j} \right\}$$

Y por medio del diagrama del sistema vamos a determinar la matriz S

Vamos a determinar el valor de la matriz A

$$M = (I - \lambda S)^{-1}L$$

Sustituyendo variables en la expresión de **A**.

Donde tenemos que el valor de F es la diagonal $\{\frac{1}{c1}, \frac{1}{la}, \frac{1}{lj}\}$

$$A = \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n \\ 0 & n & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Rk} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{c1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{la} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{lj} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{la Rk} & \frac{1}{lb} \\ 0 & \frac{1}{la} & \frac{-1}{lj rb} \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **B** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$. Como en la multiplicación de las matrices en la expresión $S_{12}MS_{23}$ es igual a cero ($S_{12}MS_{23} = 0$) podemos observar que el valor de B va a ser igual a la matriz s_{13} , entonces $b = s_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$; Teniendo A y B procedemos a sustituir en la siguiente expresión los valores encontrados. $\dot{x} = Ax + Bu$

Sustituyendo tenemos que el modelo matemático del sistema de nivel de líquido a lazo cerrado es:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{la} & \frac{-1}{lj} \\ 0 & \frac{-1}{la} & \frac{-1}{lj rb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ p_7 \\ p_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_6 \\ f_3 \\ f_{10} \end{bmatrix}$$

Ahora procedemos a calcular las variables c y d que son con las que vamos a obtener la salida del sistema. Teniendo que $c = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$ y analizando que el producto de $S_{32}MS_{21}$ es igual a cero entonces c va a ser igual al producto $S_{31} * F$ como lo expresamos a continuación:

$$C = S_{31} * F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{c1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{la} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{lj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{lj} \end{bmatrix}$$

Para el siguiente paso procedemos a calcular la variable D que es igual a $S_{33} + S_{32}MS_{23}$, como la matriz $S_{33}=0$ entonces con lo cual tenemos que:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Rk} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Rb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Rk} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ya teniendo estas dos variables de salida procedemos a sustituir en la siguiente expresión.

$$Y = c\dot{x} + Du$$

Salida del sistema del motor de corriente directa es:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{c1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{lj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_2 \\ p_7 \\ p_{11} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Rk} \\ 0 \end{bmatrix} u$$

En las siguientes gráficas vamos analizar los diferentes tipos de respuesta que obtenemos del sistema de motor de corriente directa y esto lo vamos hacer variando la ganancia del controlador proporcional (Kp) y dejando el valor de la ganancia integral fijo, con un valor de 0.1 en el capacitor que es elemento que realiza esta función lo cual se debe tener mucho cuidado al seleccionar este valor ya que es el controlador que alcanza el valor de la referencia y con gran facilidad puede hacer a nuestro sistema inestable, y en el control proporcional vamos a tener los valores en la resistencia de 0.4, 4 y 40.

Lo que vamos analizar en las siguientes gráficas es de qué manera afecta cambiar el valor de las ganancias para el tiempo de estabilización en la respuesta, mencionando que el tiempo de estabilización es el tiempo que tarda la salida del sistema en establecerse en una franja alrededor del valor final .

Entonces procedemos a sustituir los siguientes valores en los elementos del diagrama que se muestra en la figura 30 como se muestra a continuación.

Valores para la simulación en 20-Sim.

$n=0.1$ $R_b=1.2 \Omega$ $l_j=0.4 \Omega$ $R_a=0.1 \Omega$ $L_a=0.01H$ $w=10\text{rad/seg}$

Caso 1

Caso 2

Caso 3

$R_c=0.4 \Omega$

$R_c=4 \Omega$

$R_c=40 \Omega$

$C_c=0.1F$

$C_c=0.1F$

$C_c=0.1F$

En la figura podemos observar la respuesta al sistema del motor de corriente directa con una entrada escalón con valor de 10 radianes/segundo y un tiempo de estabilización de 3 segundos aproximadamente. Observando que en ese valor es donde hay una sola franja de un solo color, lo que indica que el sistema está estabilizado y que alcanzo la referencia o la velocidad deseada.

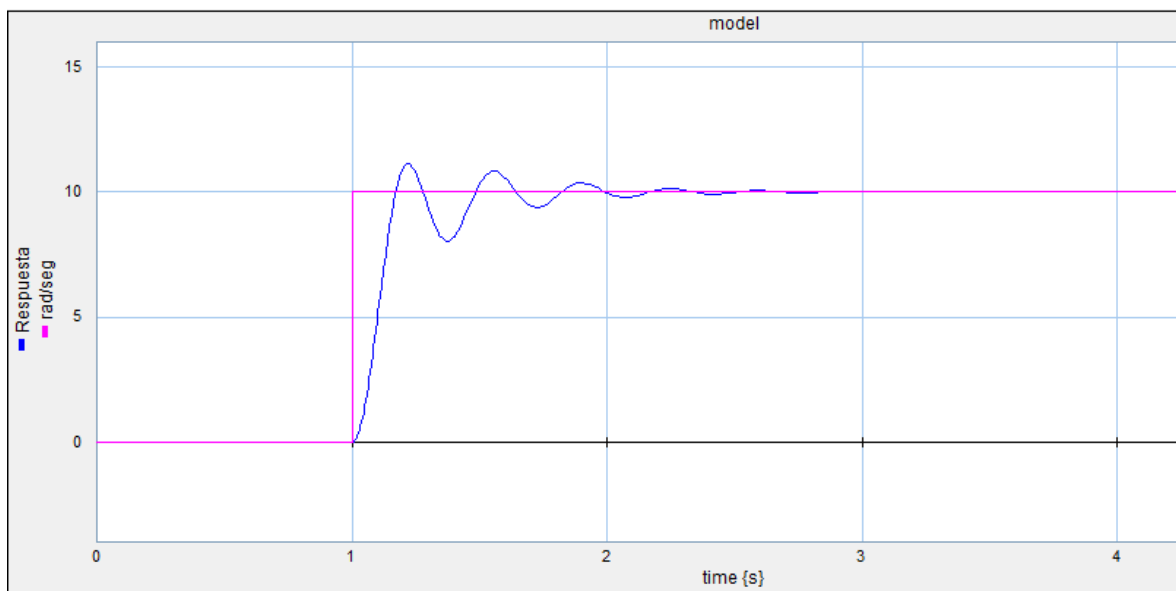


Figura 30 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 0.4

En la figura 31 observamos que con la misma referencia pero teniendo un valor de 4 en la ganancia, tenemos que se estabiliza y que alcanza la velocidad deseada en 3.5 segundos aproximadamente.

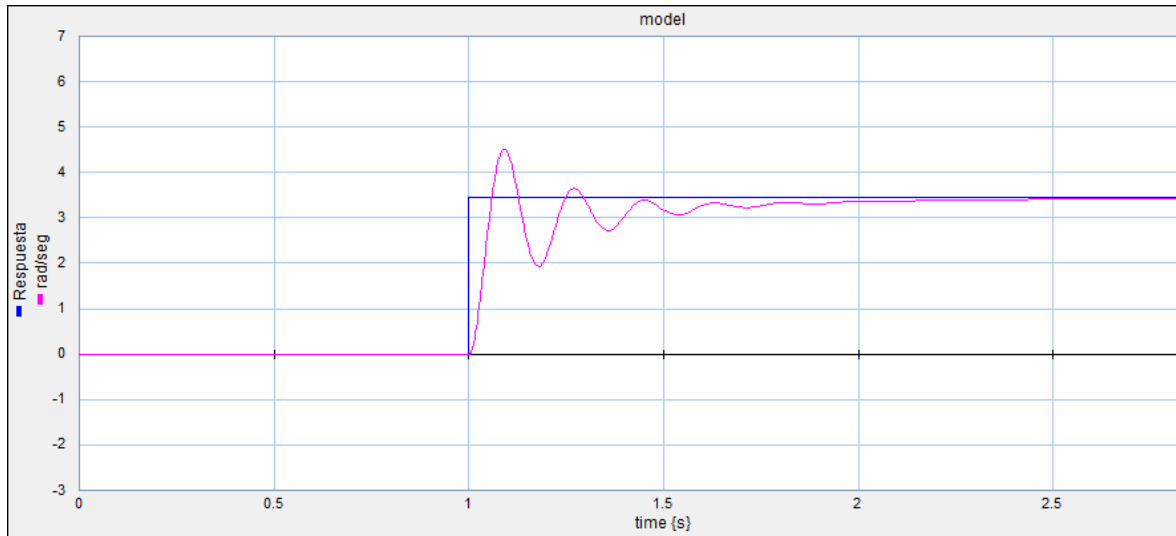


Figura 31 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 4

Lo que se observa en la siguiente gráfica es su estabilidad en un tiempo muy rápido, pero no alcanza la referencia es decir la velocidad deseada comprobando que entre mayor sea el valor de la ganancia del controlador proporcional (k_I), alcanzará en un tiempo más corto la estabilidad, así como la velocidad deseada para este sistema, como lo observamos en la figura 32.

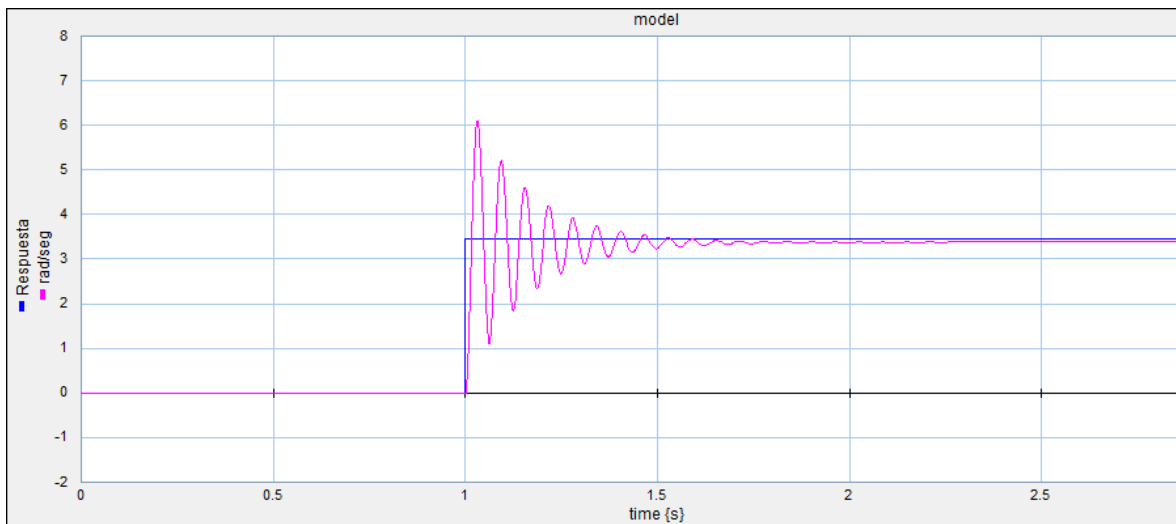


Figura 32 Respuesta al sistema del motor de corriente directa con ganancia de 40

4.3 CONTROL DE UN SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO

El objetivo en los sistemas de nivel de líquido es mantener el nivel de líquido constante. El control del nivel de líquido en depósitos y el flujo entre ellos es uno de los problemas más comunes en los procesos industriales tales como: la industria petroquímica, la fabricación de papel y las de tratamiento de agua. En estos procesos industriales en ocasiones el líquido es procesado por tratamientos químicos en los tanques, pero siempre el nivel de flujo entre tanques debe ser controlado, y el flujo entre ellos regulado. Otro ejemplo de los sistemas de nivel de líquido lo encontramos en los baños de nuestros hogares, en este la palanca adjunta a la válvula del tanque de la taza permite el flujo del agua dentro del tanque hasta que el flotador sube cerrando la válvula.

Por otro lado cuando dos tanques están interconectados como se muestra en la figura 33, se tienen varias variables del sistema que se pueden monitorear, como el nivel h_1 en el tanque 1, el nivel h_2 en el tanque 2 y el caudal de salida q_0 , siendo el control de flujo del caudal q_i . Para analizar el comportamiento del sistema en Bond Graph basta con tan sólo analizar el número de tanques que se representarán por elementos almacenadores de energía, el número de válvulas que se representan como resistencias y las variables de entrada y salida.

Considerando el siguiente sistema, tomando como salida q_0 siendo la entrada al caudal q_i y considerando sólo pequeñas variaciones de las variables respecto a sus valores en estado de régimen estacionario dadas por h para el nivel y Q para el caudal tenemos.

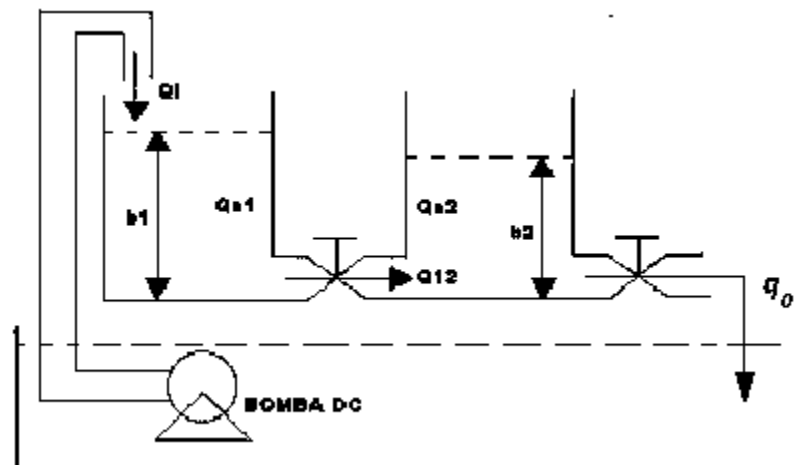


Figura 33 Tanques acoplados

4.3.1 SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO EN LAZO ABIERTO

En el siguiente sistema analizamos que es un sistema de segundo orden debido a los dos tanques que se tienen y que en Bond Graph los representamos con los capacitores $c1$ y $c2$, así como también representamos las válvulas con las resistencias $r1$ y $r2$ aplicando lo que es la fuente de flujo que nos va a representar el caudal como lo podemos observar en la figura 34.

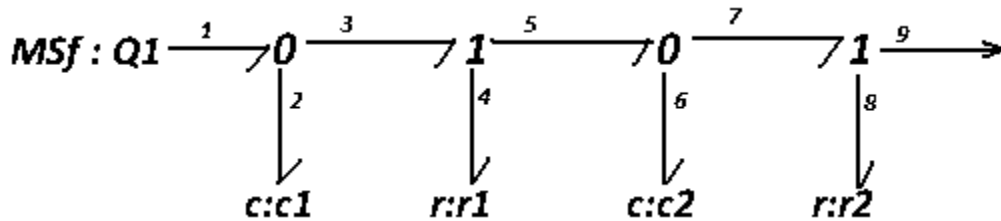


Figura 34 Modelo del sistema de nivel de líquido en lazo abierto

Obteniendo el modelo matemático:

Primero procedemos a encontrar los vectores clave

$$X = \begin{bmatrix} q_2 \\ q_6 \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \end{bmatrix} \quad \text{Din} = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_8 \end{bmatrix} \quad \text{Dout} = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_8 \end{bmatrix}$$

$$L = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{r_1}, \frac{1}{r_2} \right\} \quad F = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{c_1}, \frac{1}{c_2} \right\} \quad U = [Q_1]$$

Después llenamos la matriz S viendo la secuencia de los Bonds en la figura anterior:

$$s = \begin{bmatrix} f_2 \\ f_6 \\ e_4 \\ e_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ e_6 \\ f_4 \\ Q_1 \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz A teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$. Como en la matriz s podemos observar que la matriz s_{22} (que consta de las filas y columnas 3 y 4) va a tener un valor de cero ($s_{22} = 0$) entonces $M = L$ por la siguiente equivalencia.

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L$$

Sustituyendo variables en la expresión de A .

Donde tenemos que el valor de F es la diagonal $\{\frac{1}{c_1}, \frac{1}{c_2}\}$ y $S_{11}=0$ entonces:

$$A = (S_{12}MS_{21})F = \left(\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_1 c_1} & \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **B** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$. Como en la matriz s podemos observar que la matriz s_{23} (que consta de las filas 3 y 4 y de la columna 5) va a tener un valor de cero ($s_{23} = 0$) entonces $b = s_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$; Teniendo A y B procedemos a sustituir en la siguiente expresión los valores encontrados. $\dot{x} = Ax + Bu$

Sustituyendo tenemos que el modelo matemático del sistema de nivel de líquido a lazo abierto es:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_1 c_1} & \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u;$$

En la figura 35 mostramos la gráfica en lazo abierto del sistema de nivel del líquido teniendo la amplitud del valor de la unidad y graficando el segundo tanque, que como ya habíamos mencionado anteriormente es el capacitor 2, y esto nos da una idea de lo que se pretende tener a la salida con el controlador PID y la retroalimentación de estados.

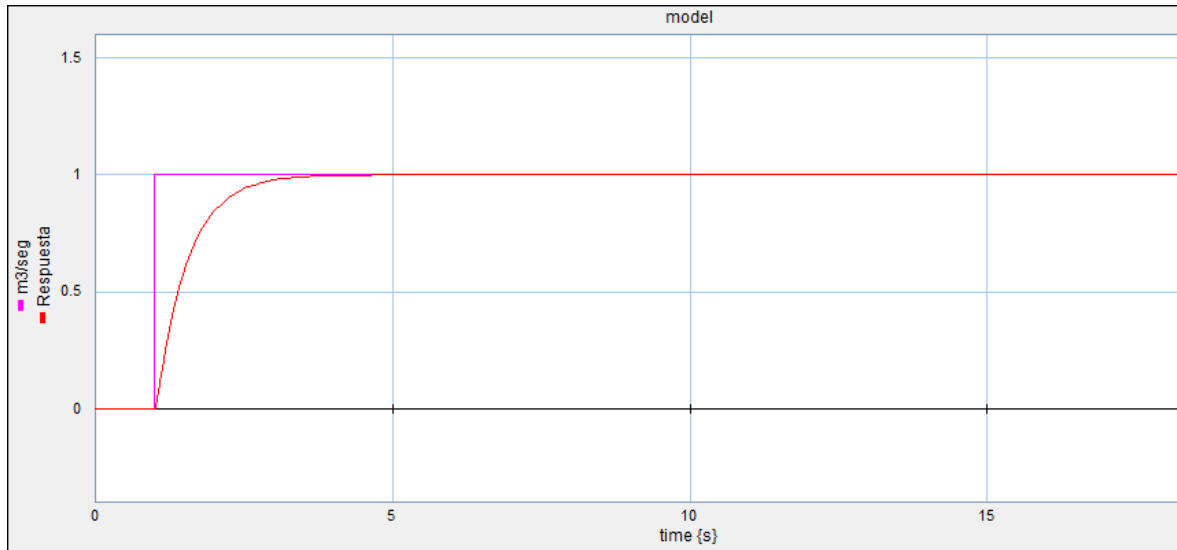


Figura 35 Sistema de nivel de líquido lazo abierto

4.3.2 SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO CON RETROALIMENTACIÓN DE ESTADOS

Para hacer este método, hay que analizar el número de tanques que se tienen ya que a partir de ahí se tendrá el número de retroalimentaciones con sus respectivas ganancias, como se muestra en la figura 36 mencionando también que para este sistema de nivel de líquido vamos a tener que determinar esas ganancias, encontrando las raíces para poder estabilizar el dicho sistema a través de un método que ya se mencionó en el capítulo 3.

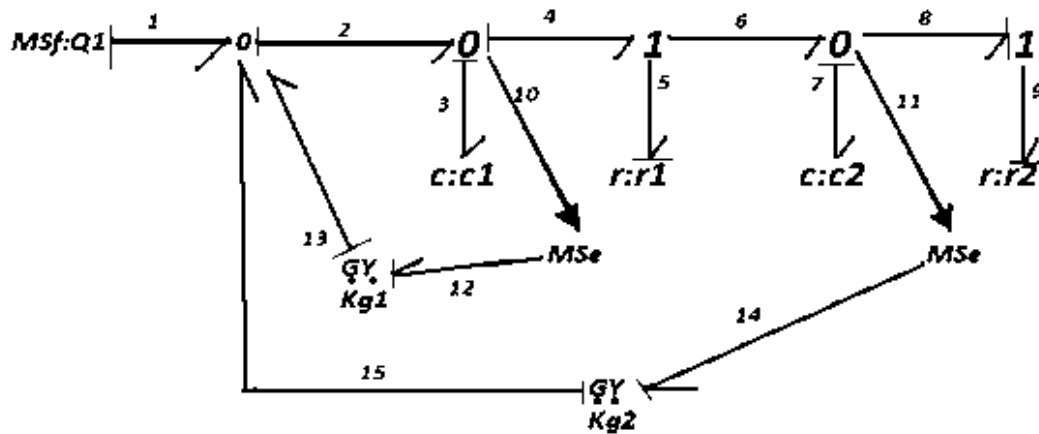


Figura 36 Sistema de nivel de líquido con retroalimentación de estados

Procedemos a encontrar los vectores clave

$$X = \begin{bmatrix} q_3 \\ q_7 \end{bmatrix} \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_7 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} e_3 \\ e_7 \end{bmatrix} \quad \text{Din} = \begin{bmatrix} e_5 \\ e_7 \end{bmatrix} \quad \text{Dout} = \begin{bmatrix} f_5 \\ f_9 \end{bmatrix}$$

$$L = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{r_1}, \frac{1}{r_2} \right\} \quad F = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{c_1}, \frac{1}{c_2} \right\} \quad U = [Q_1]$$

Después llenamos la matriz **S** viendo la secuencia de los Bonds en la figura anterior:

$$S = \begin{bmatrix} f_3 \\ f_7 \\ e_5 \\ e_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_2} & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_3 \\ e_7 \\ f_5 \\ f_9 \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **A** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$. Como en la matriz **s** podemos observar que la matriz s_{22} (que consta de las filas y columnas 3 y 4) va a tener un valor de cero ($s_{22} = 0$) entonces $M = L$ por la siguiente equivalencia.

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L$$

Sustituyendo variables en la expresión de **A**.

Donde tenemos que el valor de **F** es la diagonal $\left\{ \frac{1}{c_1}, \frac{1}{c_2} \right\}$ entonces procedemos a sustituir las variables en la expresión de **A**

$$A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F = \left(\begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} & \frac{1}{K_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{r_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \left(\begin{bmatrix} \frac{-1}{r_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} \right) =$$

El valor de **A** con retroalimentación es:
$$A = \begin{bmatrix} \frac{\frac{1}{K_1} - \frac{1}{r_1}}{c_1} & \frac{1}{k_2} + \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix}$$

Para obtener el valor de **B** tenemos la siguiente equivalencia:

$$B = (S_{13} + S_{12}MS_{23}) \text{ Como } s_{23} = 0 \text{ entonces: } b = s_{13} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{\frac{1}{K_1} - \frac{1}{r_1}}{c_1} & \frac{1}{k_2} + \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

Ya obteniendo el modelo matemático tenemos que determinar las ganancias para poder hacer estable al sistema y poder obtener la gráfica de la figura 37, donde se encuentran las dos ganancias junto con la referencia que es el caudal.

Hay casos en el que el sistema ya es estable, pero se quiere una respuesta del estado más dinámica. Así procedemos hacer el siguiente método para encontrar las ganancias k_1 y k_2 :

Teniendo el sistema

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_1 c_1} & \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix}$$

Vamos a proceder a asignar los valores que tenemos en la simulación para determinar los polos los cuales son: $c_1=0.25F$, $c_2=0.05F$, $r_1=r_2=100\Omega$ y $Q_1=10m^3/seg$.

Sustituyendo lo anterior procedemos usar la ecuación característica $\det[sI - A] = 0$. Y a colocar lo polos deseados en $s_1=-5$ y $s_2=-6$.

$$\text{Det } |sI - A| = \det \begin{bmatrix} s + .04 & \frac{-1}{100} \\ \frac{-1}{100} & s + .02 \end{bmatrix}$$

Haciendo el determinante y reduciendo términos semejantes tenemos que

$$s^2 + 0.6s + 7 \cdot 10^{-4} \quad \text{localización de polos en } s_1=-0.6 \text{ y } s_2=7 \cdot 10^{-4}$$

Por lo tanto es el sistema es estable.

Ecuación característica en lazo cerrado

$$\dot{x} = A + BK$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{r_1 c_1} & \frac{1}{r_1} \\ \frac{1}{c_1 r_1} & \frac{-1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} [K_1, K_2]$$

Sustituyendo valores y haciendo operaciones es:

$$A + BK = \begin{bmatrix} -.04 + K_1 & .01 + K_2 \\ .04 & -.02 \end{bmatrix}$$

Se aplica la ecuación característica

$$\text{Det } |sI - A| = \det \begin{bmatrix} s - (-.04 + k_1) & -.01 - k_2 \\ -.04 & s + .02 \end{bmatrix}$$

Resolviendo el determinante y reduciendo tenemos

$$s^2 + (.06 - k_1)s + (.05 - .02k_1 + .04k_2)$$

Para igualar los valores de los polos deseados a la ecuación anterior, debemos obtener la ecuación característica de los polos.

$$(s+5)(s+6) = s^2 + 11s + 30 = 0$$

Comparando términos similares en ambas ecuaciones se obtiene

$$K_1 = -11$$

$$k_2 = 750$$

Obteniendo las ganancias anteriores procedemos a la simulación, donde en la figura 37 ya se muestra un sistema estable, y para esto graficamos las dos ganancias con su respectiva referencia o variable de entrada, que para nuestro sistema de nivel de líquido es el caudal.

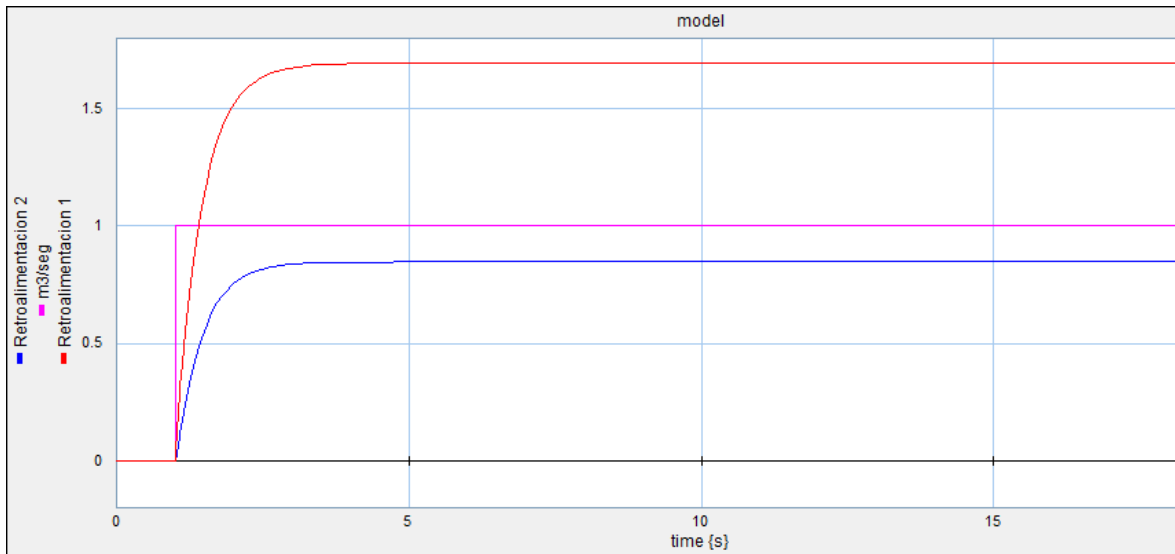


Figura 37 Respuesta del sistema de nivel de líquido con retroalimentación de estados

4.3.3 CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL PARA EL SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDO.

En el siguiente caso de estudio mostramos el sistema de nivel de líquido con el controlador proporcional e integral (PI) que observamos en la figura 38 donde tenemos las ganancias K_p y K_I en la resistencia y en el capacitor respectivamente.

Analizando también que es el mismo sistema que la retroalimentación de estados con la diferencia que para poder implementar el controlador debemos retroalimentar la salida para que este en lazo cerrado y así poder tener un control sobre el mismo

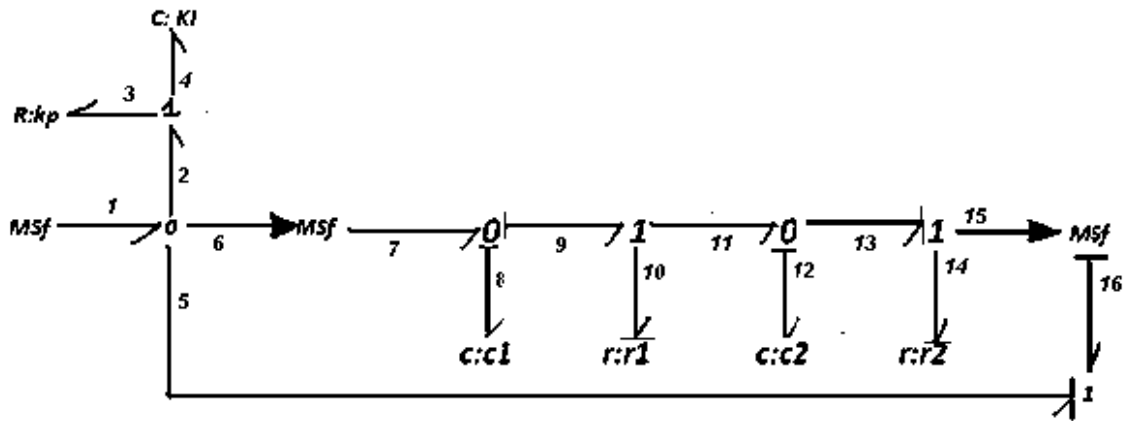


Figura 38 Controlador proporcional integral para el sistema de nivel de líquido.

Después de que tenemos la numeración de los Bonds del sistema procedemos hacer el análisis matemático, encontrando primero los vectores clave como lo mostramos a continuación:

$$X = \begin{bmatrix} q_4 \\ q_8 \\ q_{12} \end{bmatrix} \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_8 \\ f_{12} \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_8 \\ e_{12} \end{bmatrix} \quad \text{Din} = \begin{bmatrix} f_3 \\ e_{10} \\ e_{14} \end{bmatrix} \quad \text{Dout} = \begin{bmatrix} e_3 \\ f_{10} \\ f_{14} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_7 \\ f_{16} \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} e_6 \\ f_{15} \end{bmatrix} \quad L = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{rc}, r1, r2 \right\} \quad F = \text{diagonal} \left\{ \frac{1}{Cc}, \frac{1}{c1}, \frac{1}{c2} \right\}$$

$$S = \begin{bmatrix} f_4 \\ f_8 \\ f_{12} \\ f_3 \\ e_{10} \\ e_{14} \\ e_6 \\ f_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_4 \\ e_8 \\ e_{12} \\ e_3 \\ f_{10} \\ f_{14} \\ f_1 \\ f_7 \\ f_{16} \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **A** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $A = (S_{11} + S_{12}MS_{21})F$. Como en la matriz **S** podemos observar que la matriz S_{22} (que consta de las filas y columnas 4, 5 y 6) va a tener un valor de cero ($S_{22} = 0$) entonces $M=L$ por la siguiente equivalencia.

$$M = (I - LS_{22})^{-1}L$$

Sustituyendo variables en la expresión de **A**.

Donde tenemos que el valor de **F** es la diagonal $\{\frac{1}{c_c}, \frac{1}{c_1}, \frac{1}{c_2}\}$ y que la matriz $S_{11}=0$ (que consta de las primeras 3 filas y columnas) entonces:

$$A = \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Rc} & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{c_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c_2} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_1}{c_1} & \frac{-r_1-r_2}{c_2} \end{bmatrix}$$

En el siguiente paso vamos a determinar el valor de la matriz **B** teniendo la siguiente equivalencia para realizar operaciones y obtener el resultado $B = (S_{13} + S_{12}MS_{23})$. Teniendo **A** y **B** procedemos a sustituir en la siguiente expresión los valores encontrados.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_C} & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Resolviendo las operaciones tenemos que B es:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Sustituyendo tenemos que el modelo matemático del sistema de nivel de líquido a lazo cerrado es:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_1}{c_1} & \frac{-r_1-r_2}{c_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ q_8 \\ q_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_7 \\ f_{16} \end{bmatrix}$$

Hora procedemos a calcular las variables c y d que son con las que vamos a obtener la salida del sistema. Teniendo que $c = (S_{31} + S_{32}MS_{21})F$.

$$C = \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_C} & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{c_c} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c_2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_2}{c_2} \end{bmatrix}$$

Para el siguiente paso procedemos a calcular la variable D que es igual a $S_{33} + S_{32}MS_{23}$, como la matriz $S_{33}=0$ entonces con lo cual tenemos que:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{R_C} & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_C} & 0 & \frac{-1}{R_C} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Entonces estas variables las vamos a sustituir en nuestra siguiente expresión:

$$Y = CX + DU$$

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_C} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_2}{C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_4 \\ q_8 \\ q_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{R_C} & 0 & \frac{-1}{R_C} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} U$$

En las siguientes gráficas vamos a analizar la respuesta a una entrada constante, del diagrama que se muestra en la figura 39 que representa el sistema de nivel de líquido con controlador proporcional integral (Kp), y esto lo vamos a hacer variando la ganancia de control proporcional y dejando la ganancia del control integral fija (KI) como se muestra en los siguientes casos:

Valores para la simulación en 20-Sim.

C₁ = 0.01F	C₂ = 1.2F	R₁ = 1 Ω	R₂ = 1.2 Ω
Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
R_c = 2 Ω	R_c = 20 Ω	R_c = 200 Ω	R_c = 2000 Ω
C_c = 0.01F	C_c = 0.01F	C_c = 0.01F	C_c = 0.01F

Lo que tenemos en la siguiente gráfica es la respuesta a una entrada constante del sistema de nivel de líquido que muestra que su estabilización la empieza a hacer a los 6 segundos, lo que indica que su estabilización, ni el valor del controlador son los óptimos para este sistema

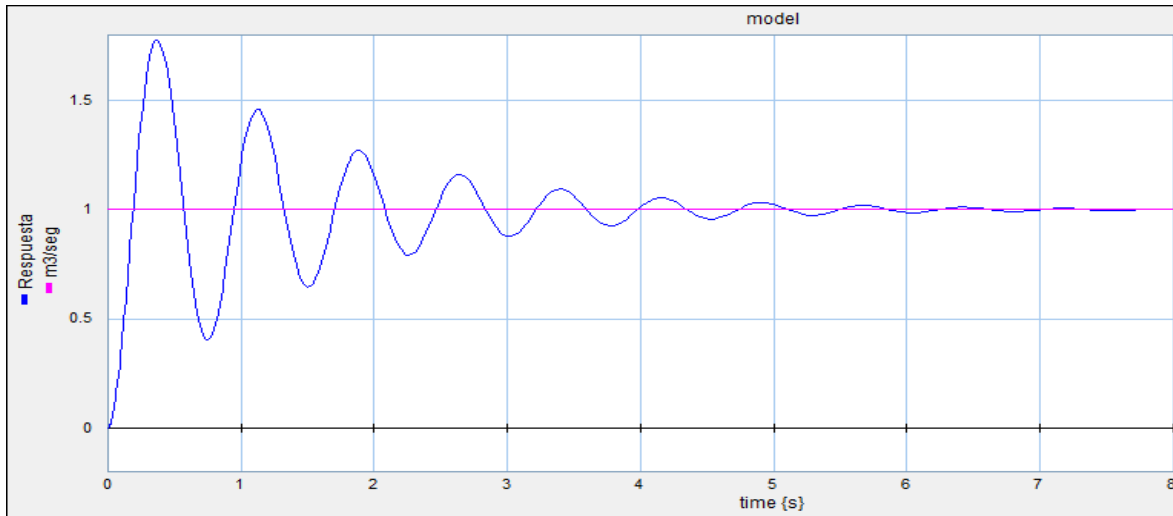


Figura 39 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 2.

A continuación en la segunda gráfica que se muestra en la figura 40 tenemos los mismos parámetros pero con el segundo caso que representa cambiar el valor del control proporcional a 20 y podemos observar que su estabilización es buena ya que esta antes del primer segundo, así como el alcance con la velocidad deseada es la óptima, ya que la respuesta no se alcanza a notar lo que indica que va junto con la referencia.

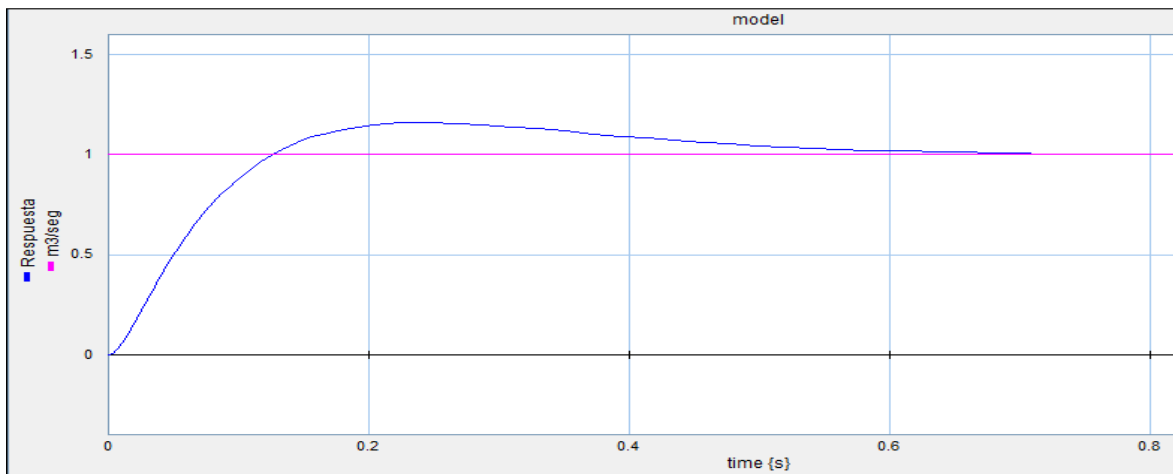


Figura 40 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 20.

En la siguiente figura 41 se muestra el tercer caso con un valor de 200 en la ganancia proporcional y lo que obtenemos en la respuesta es una mejor estabilización y un mejor alcance de velocidad, lo que se deduce que para este sistema entre más grande sea el valor del controlador proporcional (P), se tendrá una respuesta más óptima.

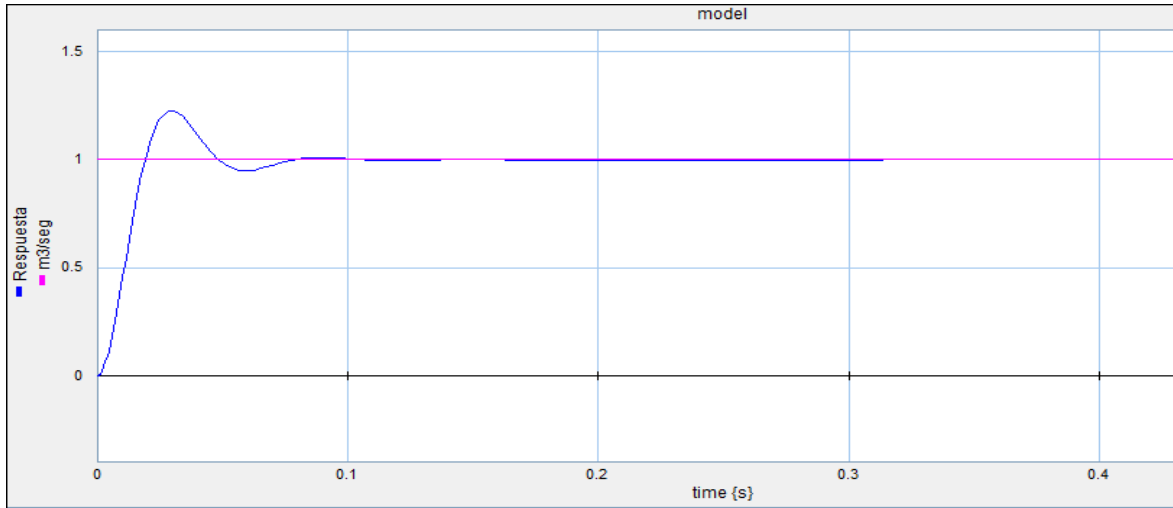


Figura 41 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 200.

Por último tenemos el cuarto caso de estudio que ya en modo de comprobación y como lo veníamos desarrollando aumentamos el valor de controlador proporcional (P) y seguimos viendo un mejor desempeño en la salida como lo podemos observar en la figura 42.

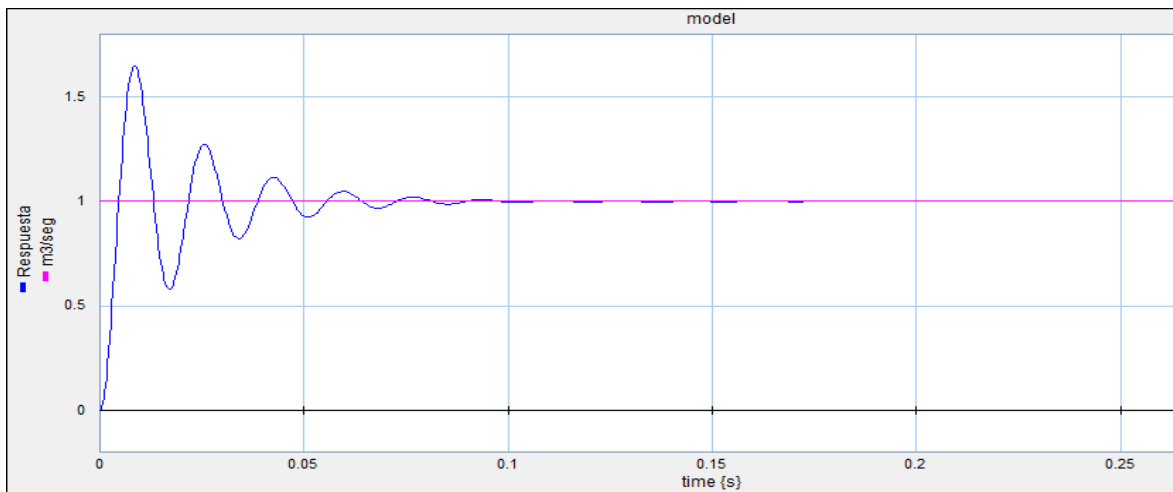


Figura 42 Respuesta del sistema de nivel de líquido con ganancia de 2000.

En las gráficas anteriores se varió el tiempo de la respuesta debido a que después de 1 segundo ya era constante la gráfica, esto también puede variar un poco por la referencia, pero para el sistema de nivel de líquido se optó por $1\text{m}^3/\text{seg}$

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Este trabajo de tesis se ha verificado la utilidad del método de Bond Graph para el análisis de los sistemas: eléctrico; el motor de corriente directa, y el análisis del sistema hidráulico; sistema de nivel de líquido con dos tanques. Se logró obtener el modelo matemático de estos sistemas con los diferentes métodos que aplicamos para controlar y hacerlos estables analizando la entrada y salida de los modelos.

También se puede comprobar que el modelado de sistemas en el dominio físico facilita en tiempo y esfuerzo la obtención del modelo matemático de cualquier sistema físico que se quiera analizar.

Bond Graph es una técnica de modelado de sistemas que tiene la particularidad de ser grafico lo cual es mejor para el lector la visibilidad del sistema y tener así una noción del desempeño del mismo, aun sin conocer su comprobación matemática del modelo, pero conociendo el flujo del sistema de modelo, además de entender el comportamiento de cada uno de los elementos de Bond Graph se logra una descripción de lo que se trata.

Se ha logrado cumplir el objetivo de hacer estables a los sistemas y poder controlar el caudal a través del flujo en el caso del sistema de nivel de líquido y la velocidad a través del voltaje en el caso del motor de corriente directa, haciendo sus respectivas comprobaciones a través de la obtención de sus modelos matemáticos.

La obtención del modelo matemático y la simulación está basada en la teoría del modelado en Bond Graph. Las principales contribuciones de este trabajo han sido la de proporcionar técnicas de análisis de los sistemas, como son la retroalimentación de estados que nos sirve para hacer estable a un sistema comprobándolo con la respuesta a la salida en función del tiempo de alguna de sus ganancias, sabiendo que están ganancias van a depender del número de tanques acoplados, y la de un controlador PID que dependiendo del sistema con un simple controlador PI se puede resolver el problema y esto implica más facilidad a la hora de obtener las ecuaciones matemáticas y poder obtener su respectiva respuesta como función del tiempo.

También mencionar que entre más grandes se selecciona el valor del controlador proporcional en los sistemas, la respuesta a la salida es más óptima debido a que se tiene una mejor estabilización y un mejor alcance del valor deseado.

5.2 RECOMENDACIONES

En este trabajo de tesis se ha determinado el modelo matemático de un sistema de nivel de líquido de segundo orden y un motor de corriente directa, se deja a consideración del lector, la obtención del controlador PID para ambos sistemas, aunque como pudimos observar no es muy necesario. Incluso determinar si con algunos valores en las ganancias se vuelven inestables los sistemas.

Para los sistemas físicos facilita la obtención del modelo matemático el uso de la técnica de Bond Graph, sin embargo; se debe tener cuidado en la obtención del mismo, seguir cuidadosamente la metodología para la obtención de cualquier modelo y poder obtener así los resultados correctos de este, así como el comportamiento del sistema.

5.3 BIBLIOGRAFÍA.

1. Control en el espacio de estado
Agustín Jiménez
Ed. Prentice hall
2. Maquinas eléctricas
Stephen J. chapman
Ed. Mc Graw Hill
3. Ingeniería de control moderna
Katsuhik Ogata
Ed. Prentice hall
4. Sistemas de control automático
Benjamín C.Kuo
Prentice Hall
5. Maquinas eléctricas.
Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Umans, S.
Editorial McGraw Hill.