

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**REDUCCIÓN DE VIBRACIONES RESIDUALES  
EN PUENTES GRÚA.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Czwienczek J., José G.  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**REDUCCIÓN DE VIBRACIONES RESIDUALES  
EN PUENTES GRÚA.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Simón Morales.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
por el Br. Czwienczek J., José G.  
para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2006

*A mis padres María Mercedes y Roman Tadeuz por ser el ejemplo más palpable  
de amor, cariño y responsabilidad que una persona pueda tener...*

*A mi hermana Ursula Daniela y a mi novia...*

*A mi familia y amigos...*

*A San Juan Bosco y a la madre Auxiliadora por guiarme por el buen camino de  
la vida...*

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA  
RESUMEN  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Eléctrica  
Ingeniero Electricista  
Reducción de Vibraciones Residuales en Puentes Grúa.  
José Gregorio Czwieczek J

Czwieczek J., José G.

REDUCCIÓN DE VIBRACIONES RESIDUALES EN PUENTES GRÚAS

**Tutor Académico o Prof. Guía:** Dr. Simon Morales. Tesis. Caracas.  
**U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.**  
**Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica y Control. Institución:**  
**U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica.**

**Palabras Claves.** Moldeador de Entrada, "*Input Shaping*", Normas Internacionales de Grúas, Sistemas de Control, Grúa, Polipastos.

**Resumen.** Se plantea el estudio, modelado y simulación de un sistema de control para la minimización de las oscilaciones residuales en la carga de un polipasto en dos dimensiones (plano que manejará la carga). Las oscilaciones no deseadas se pueden minimizar o reducir mediante el uso de un algoritmo de control apropiado. La reducción de vibración es un problema crítico relacionado con el maniobrar de manera indicada el sistema y su robustez para ciertas condiciones en la entrada. las técnicas actuales trabajan alterando los actuadores en la salida, para reducir la oscilación de la respuesta del sistema.

# Índice general

Índice general	IV
Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VIII
Lista de Acrónimos	IX
Reconocimientos	x
Introducción	1
<b>1. Planteamiento Metodológico y Objetivos.</b>	<b>3</b>
1.1. Planteamiento Metodológico. . . . .	3
1.1.1. Tipo de Investigación. . . . .	3
1.2. Objetivos. . . . .	3
<b>2. Polipastos y Grúas Viajeras.</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes. . . . .	4
2.2. Principales componentes de una grúa. . . . .	5
2.2.1. Estructurales . . . . .	7
2.2.2. Mecánica . . . . .	7
2.2.3. Eléctrica. . . . .	8
2.3. Normas Internacionales y Nacionales. . . . .	9
2.4. Variables y Parámetros que Intervienen en Grúas Viajeras. . . . .	10
2.5. Descripción de la Grúa Empleada para el Control. . . . .	11
<b>3. Estrategia de Control.</b>	<b>12</b>
3.1. Generalidades. . . . .	14
3.1.1. PID . . . . .	14
3.1.2. Controladores PD. . . . .	15
3.1.3. Sintonización del PID. . . . .	15
3.1.4. Compensadores. . . . .	16
3.1.5. Control Adaptativo. . . . .	17

3.1.6.	Espacio de Estados. . . . .	18
3.1.7.	Control Óptimo. . . . .	18
3.2.	Técnicas de Lazo Abierto. . . . .	18
3.2.1.	Técnicas de Filtrado. . . . .	18
3.2.2.	Input Shaping. . . . .	18
3.2.3.	Comportamiento del Sistemas de Orden Superior y el Input Shaping. . . . .	26
3.3.	Sistemas de Control Mixtos. . . . .	26
<b>4.</b>	<b>Estudio del Modelo y Control.</b>	<b>28</b>
4.1.	Desarrollo Analítico. . . . .	28
4.2.	Estrategia de Control. . . . .	32
4.2.1.	Diseño con la Técnica Input Shaping. . . . .	32
<b>5.</b>	<b>Análisis y Discusión de Resultados.</b>	<b>39</b>
5.1.	Resultados. . . . .	39
5.1.1.	Respuesta con el Moldeado de la Entrada ( <i>Input Shaping</i> ). . . . .	40
5.1.2.	Respuesta con el PD . . . . .	46
5.2.	Control Propuesto. . . . .	49
5.3.	Propuesta de un dispositivo de control electrónico. . . . .	50
<b>6.</b>	<b>Aplicación, Simulación 3D.</b>	<b>53</b>
6.1.	¿Por qué el uso de un simulador en 3D?. . . . .	53
6.2.	Sistemas Operativos. . . . .	54
6.3.	Características del PC. . . . .	55
6.4.	Motor o Programa Base. . . . .	55
6.5.	Librerías. . . . .	55
6.6.	Programa Desarrollado . . . . .	56
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>58</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>62</b>
	<b>A. Definiciones.</b>	<b>64</b>
	<b>B. Planos y figuras de Puentes Grúas.</b>	<b>66</b>
	<b>Índice Alfabético</b>	<b>72</b>

# Lista de figuras

2.1. Puente grúa. . . . .	6
3.1. Sistema de control a lazo cerrado. . . . .	13
3.2. Sistema de control a lazo abierto. . . . .	13
3.3. Sistema de control mixto. . . . .	14
3.4. Sistema de control PID de una planta. . . . .	14
3.5. Respuesta del escalón unitario de una planta. . . . .	16
3.6. Curva de respuesta con forma de S. . . . .	16
3.7. Esquema general de un sistema de control adaptativo. . . . .	17
3.8. Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden $f=1\text{Hz}$ . . . .	19
3.9. Respuesta ante una rampa a un sistema de segundo orden $f=1\text{Hz}$ . . .	20
3.10. Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden $f=1\text{Hz}$ . . . .	20
3.11. Proceso de moldeado de la señal de entrada con los impulsos. . . .	20
3.12. Ejemplo práctico del funcionamiento de la técnica. . . . .	21
3.13. Técnica del Input Shaping en el dominio del tiempo. . . . .	22
3.14. Diagrama de bloque de la técnica Input Shaping. . . . .	22
3.15. Diagrama vectorial de una secuencia de dos impulsos. . . . .	24
4.1. Diagrama del modelo físico. . . . .	29
4.2. Diagrama de cuerpo libre. . . . .	30
4.3. Curva de sensibilidad para dos pulsos, ZV. . . . .	35
4.4. Curva de sensibilidad para tres pulsos, ZVD. . . . .	36
4.5. Curva de sensibilidad para cuatro pulsos, ZVDD. . . . .	37
4.6. Comparación entre las curvas ZV, ZVD, ZVDD. . . . .	38
5.1. Elemento que conforma a la planta en estudio. . . . .	40
5.2. Elemento de la dinámica para el estudio. . . . .	40
5.3. Respuesta de la planta ante un escalón unitario en $t$ . . . . .	41
5.4. Respuesta de la planta ante un escalón unitario en el plano $s$ . . . .	41
5.5. Entrada pulso de 1 seg, moldeado por la forma ZV. . . . .	42
5.6. Comando Moldeado por la forma ZV. . . . .	43
5.7. Efecto de aumentar la Longitud $L$ de la planta con la forma ZV. . .	43
5.8. Comando Moldeado por la forma ZVD. . . . .	44
5.9. Respuesta de la Planta con entrada de la forma ZVD. . . . .	44
5.10. Efecto de aumentar la Longitud $L$ al 20 % de la planta con la forma ZVD. . . . .	45
5.11. Forma del Moldeador por la forma ZVDD. . . . .	45
5.12. Comando Moldeado por la forma ZVDD. . . . .	46
5.13. Sistema ante una entrada ZVDD y una variación del 35 % de $L$ . . .	47

5.14. Respuesta del ángulo del sistema con un PD y la planta, ante un pulso de 1 N y 1 s de duración. . . . .	48
5.15. Respuesta del ángulo del sistema ante 10, 20 y 50 % de variación en $L$ . . . . .	48
5.16. Respuesta del PD, ante la variación de $\omega_n$ . . . . .	49
5.17. Propuesta del sistema de control para un puente grúa. . . . .	50
5.18. Propuesta del sistema de control para un puente grúa. . . . .	50
5.19. Respuesta del sistema de control propuesto para un puente grúa. . . . .	51
5.20. Sistema de control propuesto para un puente grúa. . . . .	51
6.1. Grúa 3D. . . . .	56
B.1. Dimensiones de polipasto y puente grúa. . . . .	67
B.2. Modelo de un carro para polipasto y puente grúa. . . . .	68
B.3. Modelo de un carro para polipasto y puente grúa. . . . .	68
B.4. Limpiavías, amortiguadores y ruedas. . . . .	69
B.5. Ganchos para polipasto y puente grúa. . . . .	69
B.6. Arreglos comunes para impulsores en puentes grúas. . . . .	70
B.7. sistema impulsor típico para puente grúa. . . . .	70
B.8. Botonería usada en polipasto y puente grúa. . . . .	71



# Lista de tablas

- 4.1. Leyenda de las definiciones empleadas en las ecuaciones analíticas. 29

# Lista de Acrónimos

**LNS** Sandia Nacional Laboratorios

**ORNL** Oak Ridge National Laboratory

**ODE** Open Dinamic Engine

**DC** Corriente Directa

**AC** Corriente Alterna

**Kp** Ganancia proporcional

**Ti** Tiempo integral

**Td** Tiempo derivativo

**PID** Proporcional Integral Derivative

**PD** Proporcional Derivative

**PS2F** Programa Simulador Físico Vs 2.

**IST** "*Input Shaping Technic*". Técnica del Moldeo de la entrada.

**PWM** *Pulse With Module*. Modulador de Ancho de Pulso

# Reconocimientos

Quiero Expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna u otra manera hicieron posible la realización de este trabajo.

Especialmente quiero agradecer a mi Tutor Prof. Dr. Simón Morales, por su apoyo y ayuda a comprender este mundo de la Electrónica y Control.

Además debo agradecer la colaboración y paciencia del Prof. Dr. Eduardo Gonzales por sus correcciones.

Asimismo quiero dar gracias al Prof. Dr. Ebert Brea, por su paciencia y apoyo en entender una nueva manera de crear un trabajo de grado; al Prof Rafael Rivero, me dio las herramientas necesarias para entender la Electrónica y muy especial a la Prof Mary Power, por ayudarme a entender el complejo mundo de los sistemas digitales y microprocesadores.

Por su paciencia, apoyo y ayuda a la Secretaria de Postgrado Sra. Gipsy Azuaje y a su Hija Prof. Evelin Azuaje; sin su ayuda y sus oportunas correcciones no hubiese podido concluir con este trabajo de grado.

A la Ing. Cecilia Gómez, Gracias por tu ayuda en muchos aspectos de la vida, por ser una incondicional amiga y compañera.

A mi amigo Gustavo Gómez, vale de verdad gracias amigo por tu ayuda en muchos aspectos: programación, ideas e inventos de todo tipo y hasta esas conversaciones Intelectuales y recuerda "La electrónica nos salvará..."

Agradezco a todos mis amigos en la carrera los cuales debo mencionar muy especialmente a la Ing. Marisabel Fusco, gracias por tu paciencia, tu compañía y verdadero apoyo. Además debo agradecer a mi amigo de la Técnica "Don Bósco", Angel Ivan Gonzales.

También debo agradecer a mis amigos y compañeros, por su apoyo, amistad y fuerza, especialmente a: Paula de Curtis, Daniela Gonzales, Erika Gomez, Jennifer Flores, Albert Chavez, Servando Alvarez, Daniel Perez, Prof Murati y María Auxiliadora. Gracias además a todos los amigos umbicolas que no he mencionado.

Y para todas aquellas personas que siempre me han apoyado y creído en mí.  
¡Gracias!

# Introducción.

Un sistema de control típico contiene sensores, actuadores, computadora y software, sin embargo, para llevar a cabo un análisis adecuado de los sistemas de control no sólo se requiere de instrumentos sino también de conocimiento y dominio sobre el proceso de control y las tecnologías utilizadas en sensores y actuadores.

Un problema que ocurre frecuentemente en las industrias es el que se produce por las oscilaciones de cargas en despliegues de estructuras en el espacio con grúas o polipastos. Esta operación, resulta compleja cuando se requiere colocar cierta carga de un lugar a otro en el mínimo tiempo posible y sin oscilaciones que puedan causar daños al material transportado o a las personas y equipos que se encuentra en las cercanías.

Típicamente, un operador de grúa por razones de seguridad mueve los objetos lentamente para minimizar las oscilaciones inducidas y permitir que las mismas sean amortiguadas en el tiempo, no obstante se genera un gran decrecimiento o disminución de la eficiencia de las operaciones.

Ante esto, se plantea el estudio, modelado y simulación de un sistema de control para la minimización de las oscilaciones residuales de un polipasto en dos dimensiones (plano que manejará la carga).

Las oscilaciones no deseadas se pueden minimizar o reducir mediante el uso de un algoritmo de control apropiado. La reducción de vibración es un problema crítico relacionado con el operar de manera indicada el sistema para ciertas condiciones en la entrada. Las técnicas actuales trabajan alterando los actuadores en la salida, para reducir la oscilación de la respuesta del sistema.

Conociendo el problema expuesto previamente se plantea como objetivo final minimizar las oscilaciones residuales ante el movimiento de la carga de una grúa.

Los programas de investigación y desarrollo en diseños de grúas proyectan cada vez más y mejores sistemas de control con el objeto de reducir costos de mantenimiento y mejorar la eficiencia de las grúas en lo que respecta a su operación, seguridad y mantenimiento.

El trabajo de grado se centrará en la descripción teórica y del modelado matemático del sistemas con procedimientos de control que se usan en estos sistemas. Se analizarán las diferentes alternativas de control, las cuales dependen básicamente del control de las oscilaciones del sistema. Se incluirán algunas simulaciones con el uso del programa Matlab, pero no se tiene previsto la construcción de arreglos experimentales relacionados con estos modelos. Adicionalmente el proyecto considera el modelado matemático del sistema, el diseño del sistema de control con el procedimiento *"Input Shaping"*, simulaciones en el computador y, obviamente, la presentación de las conclusiones correspondientes. No se pretende el desarrollo de nuevas teorías, sólo la aplicación de los conocimientos existentes a un problema.

En este trabajo de grado se realizó una investigación del control de los polipastos y sus normativas internacionales en el capítulo 1, a continuación en el capítulo 2 se realizará un estudio de las diferentes estrategias de control más usadas en los sistemas de control, después se desarrollará el modelo matemático del sistema, selección de la mejor estrategia de control y simulación mediante un software desarrollado en Linux (PyTHON-Open Dinamic Engine (ODE)-OpenGL) que representa un espacio físico 3D para poner a prueba el control en el capítulo 3 y concluir mencionando el diseño de un posible equipo electrónico en el capítulo 4.

# Capítulo 1

## Planteamiento Metodológico y Objetivos.

### 1.1. Planteamiento Metodológico.

#### 1.1.1. Tipo de Investigación.

Investigación teórica. Se realizó la aplicación de métodos matemáticos en el modelado, identificación y control con la técnica *"Input Shaping"* de un sistema físico real.

### 1.2. Objetivos.

- Recopilación de información del control de polipastos.
- Recopilación de normativas internacionales para el uso de polipastos.
- Estudio de diferentes estrategias de control para el sistema.
- Modelado matemático del sistema en estudio.
- Selección, estudio y simulación de la estrategia de control seleccionada.
- Diseño de un equipo para un polipasto con la estrategia de control seleccionada.

En este trabajo de grado se considera deseable la construcción de un prototipo, sujeto este a la oportuna adquisición de los componentes, equipos y materiales para su realización, y siempre sin considerarlo como un requisito para la culminación del trabajo. ■

## Capítulo 2

# Polipastos y Grúas Viajeras.

### 2.1. Antecedentes.

Las grúas del tipo de operación manual se empezaron a usar en el año de 1880, siendo los primeros fabricantes firmas inglesas y norteamericanas. En ese tiempo los diseños de los dispositivos de potencia para producir los movimientos, ofrecidos por los fabricantes, eran muy complicados, mediante el uso de maquinas al vapor ineficientes y sistemas de poleas muy complicados para poder elevar la de carga. Estas incluían una flecha motriz a lo largo de toda la vía y embragues múltiples para transmitir la potencia de la flecha a los diferentes movimientos de la grúa. Las primeras grúas operadas eléctricamente eran con tres motores (un motor independiente para el movimiento del carro, un motor para el puente y otro para el sistemas de levantamiento), el cual operaba igual al movimiento de un "plotter" x, y, z; fue puesta en operación en el año de 1900, pudiéndose al principio, conseguir bajas velocidades y capacidades muy limitadas de aproximadamente 40 toneladas como máximo ([5] Morales. 1986). Curiosamente, las innovaciones hechas a los diseños de grúas, a través del tiempo, han aparecido a intervalos regulares de 20 años:

- 1880 - Grúas operadas manualmente.
- 1900 - Grúas operadas eléctricamente con motores independientes en cada movimiento.
- 1920 - Se establecen en forma definida, las normas para las grúas en general.
- 1940 - Las grúas ya vienen equipadas con cajas de engranajes en baños de aceites y diseños normalizados.
- 1942 - Aparecen cambios en los sistemas de control que permitieron operar las grúas con mayor precisión y seguridad.

Las primeras grúas aparecieron con bajas velocidades y limitadas capacidades en el transporte (50 metros/min de movimiento, 10 metros/min de levantamiento y 20 toneladas métricas), hoy en día existen grúas con velocidades mucho mayores (300 metros/min y de 60 metros/min de levantamiento) y con mayores capacidades de levantamiento en la carga (500 toneladas métricas).

Las tendencias actuales hacia una mayor exactitud y precisión en el manejo de los ejes de la grúa y su carga, han creado una gran demanda de grúas con movimientos exactos y en todas direcciones, por esta razón, los diseñadores de grúas en combinación con los diseñadores de equipos eléctricos han tenido que desarrollar sistemas de control que tiendan hacia la completa automatización del manejo de la carga en almacenes y líneas de producción con operaciones de maquinado, ensamble, empaque y embarques.

Los algoritmos de control para la minimización de oscilaciones residuales han sido probados durante años, en diferentes aplicaciones como en sistemas robóticos, pequeñas grúas, en la aviación para el control de estabilidad de los Flaps, en puentes grúas a escala media y en grúas de gran escala. El control de grúas con mínimas oscilaciones residuales fue implementada en pruebas a escala de laboratorios en el Sandia Nacional Laboratorios (USA), con el uso de un puente grúa transversal CIMCORP XR 6100, de 50 libras de peso y un cable de 80 pulgadas. El algoritmo puede hallarse de manera muy detallada en. ([14] Singhose. 1994).

El Oak Ridge National Laboratory (ORNL) implementó además un algoritmo de amortiguación de oscilaciones de gran escala ([11] Singer. 1990), ([6] Singer. 215). Hoy en día, este tipo de trabajos con estos algoritmos forma parte activa de las investigaciones en ese laboratorio. El sistema creado por el Sandia Nacional Laboratorios (LNS) y ORNL fueron computarizados utilizando un programa de manejo de un motor. La mayoría de las grúas industriales y en particular los modelos viejos son manejadas por motores de inducción los cuales son económicos y robustos además de presentar pocos efectos de recalentamiento y por el poco mantenimiento en comparación con los motores Corriente Directa (DC).

## 2.2. Principales componentes de una grúa.

Con el objeto de facilitar y hacer más eficaz la comunicación entre las personas que tengan que ver directa o indirectamente con grúas viajeras, es muy importante la implantación y uso de vocablos específicos y determinados para integrar la terminología particular en la rama de grúas viajeras. En los anexos del presente trabajo de grado se muestran las definiciones planos y montajes de diferentes tipos de puentes grúa. A continuación se expone la descripción de un puente grúa de uso típico en Industrias.

Una grúa eléctrica es un conjunto de mecanismos combinados armónicamente, que reciben una energía definida para transformarla en trabajo. Esto significa que la grúa es una máquina que utilizando la energía humana, en el caso de las grúas manuales, o la energía eléctrica, en este caso, es capaz de realizar diferentes tipos de trabajos, tales como subir, bajar, rotar, así como desplazar cargas diversas ([5] Morales. 1986). La estructura de una grúa se puede dividir en tres grandes grupos

- Estructural.
- Mecánica.
- Eléctrica.



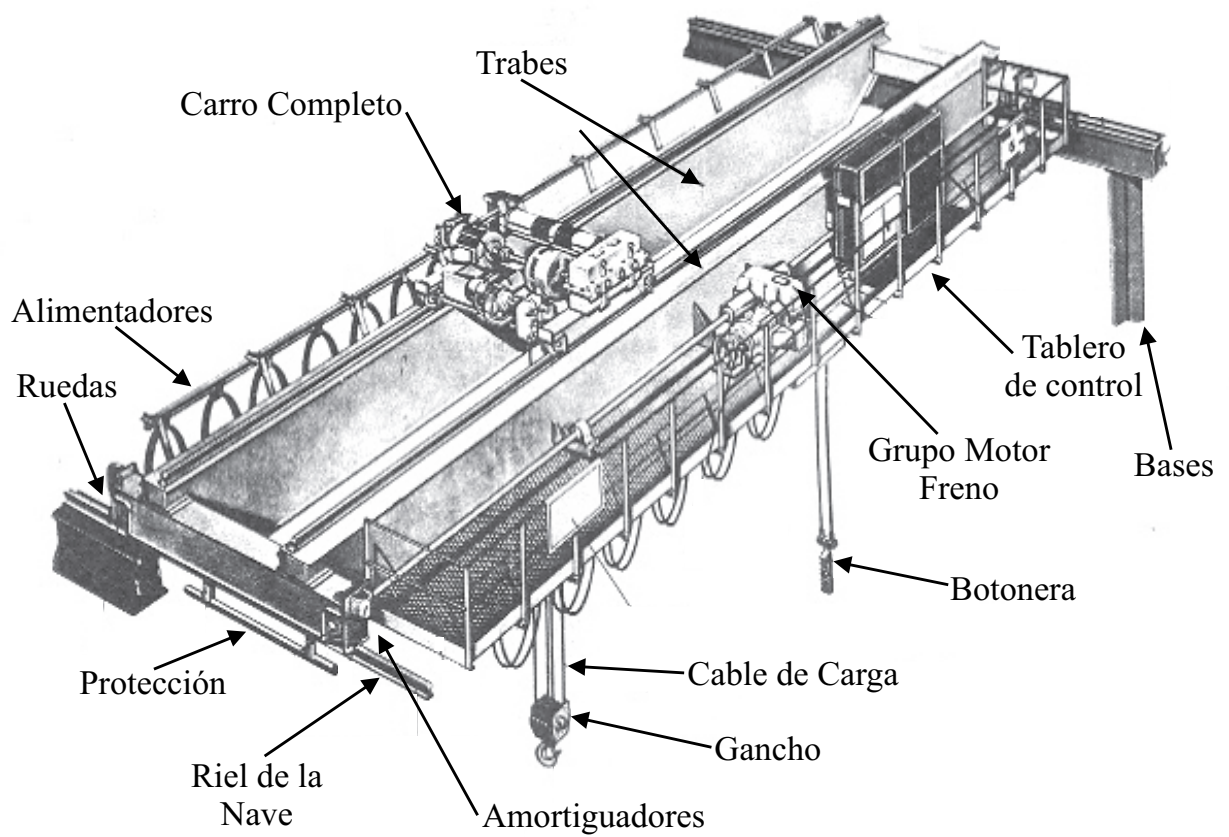


Figura 2.1. Puente grúa.

### 2.2.1. Estructurales

La parte estructura de una grúa comprende los siguientes elementos: Bastidor del carro, Barandales, Cabina, Cabezales, Escaleras, Guardas, Limpia vías, Puentes, Pasarelas, Piernas y marco (en grúas tipo portal o Gantry) Topes del carro.

En la figura (2.1) se muestra la estructura de un grúa de dos puentes apoyada, con transmisión central en el puente, y un solo sistema de elevación, operada desde el piso con una botonera. En esta se puede apreciar algunos elementos estructurales como el Bastidor del Carro el cual es una estructura metálica diseñada para soportar y alojar los componentes que forman el sistema de elevación para grúas. Al mismo tiempo esta estructura sirve para alojar el sistema motriz, el sistema de transmisión y las ruedas conducidas del carro; así como el aparejo superior.

Los Cabezales al igual que el bastidor, son estructuras metálicas cuya función es soportar y mantener unidad las traveses (ver figura, (2.1)) del puente de la grúa, además de alojar las ruedas motrices y conducidas del puente. La construcción de los cabezales puede ser formando una sola unidad para soportar las dos traveses del puente o bien en unidades pequeñas e independientes para cada traveses del puente, en cuyo caso reciben el nombre de cabezales igualadores.

Los limpia vías son dispositivos que se instalan en los extremos de los cabezales con el objeto de quitar algunos elementos menores que caen por accidente en las vías. Se puede observar en la figura (B.4) del Anexo B.

Los Topes del Carro son elementos estructurales que normalmente van soldados a las traveses del puente. Su función es limitar la carrera del carro y evitar que éste se salga del puente por descuido del operador. Ver figura (B.2) del Anexo B.

Las Guardas se utilizan para proteger al equipo instalado en la grúa contra el medio ambiente o bien como medio de seguridad para evitar contactos involuntarios entre el personal y las partes "vivas" en movimiento de la grúa. Ver figura (B.3) del Anexo B.

Uno de los puntos importantes del puente grúa son los Ensamblajes. Esta es la parte de estructura que está formada básicamente por: traveses, cabezales y pasarelas, así como su sistema motriz y de transmisión. El diseño de los Ensamblajes es obtener el máximo de capacidad con el mínimo peso. Ver figura (2.1).

### 2.2.2. Mecánica

Los elementos más importantes en la parte mecánica de una grúa se componen de: Amortiguadores, Aparejos (inferior y superior), Freno de arrastre, Gancho, Cable, Reductores de velocidad, Ruedas, Sistema de transmisión, Sistema motriz, Tambor.

Uno de los dispositivos que le da estabilidad al sistema son los amortiguadores. Estos dispositivos se instalan en el puente, para los extremos de los cabezales y para el carro en los extremos o lateralmente en la parte central del bastidor. Sirven para reducir el impacto del puente o del carro, al chocar contra los topes. Estos elementos además de estabilidad le brindan seguridad al sistema, al momento de utilizar cargas muy elevadas. Ver figura (B.4) del Anexo B.

Como se están empleando motores que en su mayoría son AC, estos poseen cierto margen de movimiento en la parada del puente (el cual depende de la masa que maneja la grúa) por lo que se deben colocar un sistema de frenado o freno de Arrastre que es una unidad totalmente mecánica y su función es parar el movimiento al que se aplica, dentro de una distancia predeterminada.

La pieza sobre la cual se amarra la carga, se denomina Gancho. Sus dimensiones y construcción dependen básicamente del peso de la carga por manejar. Como fabricación estándar se distingue dos tipos: el gancho sencillo y el doble, que también se conoce como tipo ancla. Ver figura (B.5) del Anexo B.

Los ganchos pueden ser del tipo forjado y bien construirse a base de placa, en ambos casos, tanto en lo referente a la selección de los materiales como a los procesos de fabricación, debe tenerse especial cuidado del cumplimiento de las normas, pues de ello depende en gran parte la seguridad para el manejo de la carga. Uno de los aspectos que hay que cuidar y conservar en los ganchos y dispositivos para manejar la carga, es el de que deben permitir deformaciones notorias antes de romperse, o lo que es lo mismo deben estar diseñados y contruidos para no romperse bruscamente, sin dar con anterioridad señales visibles de deformación.

Otro elemento importante en una grúa es el cable por usar, este se selecciona con base al tamaño y características de la carga y el medio ambiente en que va operar la grúa. En ambientes con alta temperatura se emplea por lo general cable de acero con alma de acero; en ambientes normales se usa cable de acero con alma de fibra (cáñamo)

Las ruedas son los componentes de la grúa destinados a soportar el puente y el carro de la misma y al mismo tiempo le sirven como medio de desplazamiento. Ver figura (B.6) del Anexo B.

El sistema de transmisión son los soportes estructurales que por lo general van fijos a la estructura de la trabe del ensamble del puente, para el movimiento del puente y en el bastidor del carro para el movimiento del carro para el movimiento del carro y el movimiento de elevación. Ver figura (B.3) del Anexo B.

### 2.2.3. Eléctrica.

La parte eléctrica de la grúa se divide en: Alarmas, Alimentadores principales, Alimentadores del carro, Banco de resistencias, Controladores maestros, Contactor general, Estación de botones, Frenos de retención, Frenos de corrientes de EDDY (magnetorque), Interruptores límites, Interruptor general, Motores, Tableros de control, Tomacorrientes.

Los alimentadores del Carro se identifica con este nombre a los conductores eléctricos instalados en el puente para alimentar energía eléctrica al equipo eléctrico instalado en el carro de la grúa. Cuando los colectores del tomacorriente del carro son del tipo deslizante, los alimentadores instalados en el puente son conductores desnudos a base de alambre de cobre o bien de ángulo estructural, los cuales se soportan con los aisladores. Se muestra en la figura (B.6) del Anexo B.

La botonera es el elemento de control del puente grúa. Esta unidad controla el funcionamiento de la grúa y gobierna la operación de los motores y se usa en grúas operadas desde el piso. Esta formada por un conjunto de botones debidamente protegidos y alojados en una caja, formando una unidad manuable. La botonera esta guindada del puente mediante un cable resistente a la acción y manipulación de los usuarios. La figura de diferentes botoneras se muestra en la figura (B.8) del Anexo B.

Los bancos de Resistencias con este nombre se identifican las resistencias del secundario de los motores de rotor devanado (anillos rozantes), necesarias para el funcionamiento y control de aceleración en los mismos; o bien para controlar la velocidad en motores de corriente directa.

### 2.3. Normas Internacionales y Nacionales.

Con el objeto de proponer bases para la selección del equipo, así como promover la homologación de este, se han establecido normas y especificaciones que tratan de cubrir la mayor variedad de diseños posibles a la vez que proporcionar información sobre las grúas a los usuarios, compradores, ingenieros y arquitectos. Aunque mucha de la información contenida es de naturaleza general, las normas puede ser consultados con los fabricantes y por medio de comparaciones puede ayudar al usuario a efectuar una selección óptima del equipo.

En Venezuela, existe una institución que se encarga de llevar las normas sobre Estructuras de Izaje y Puentes Grúas, llamada COVENIN (COMISION VENEZOLANA DE NORMAS E INSTRUCTIVOS); esta ajusta las normativas internacionales y las adapta a los requerimientos y exigencias nuestro país. La norma COVENIN 53.020, es la que dicta lo referente a EQUIPOS DE ELEVACIÓN / EQUIPOS DE MANUTENCIÓN PARA MATERIALES y la norma 53/030 sobre los Accesorios para equipos de elevación. A nivel internacional se puede mencionar las siguientes especificaciones, normas y estandares:

1. COVENIN. COMISION VENEZOLANA DE NORMAS E INSTRUCTIVOS: NORMA COVENIN 53.020.
2. AISE. (ASSOCIATION OF IRON AND STEEL ENGINEERS): CMAA #70 with AIST/AISE Technical Report No.#6, AIST Technical Report No.#13, AIST Technical Report No.#8 y AIST Technical Report No.#4.
3. CMAA. (CRANE MANUFACTURERS ASSOCIATION OF AMERICA): DOE HANDBOOK SUPPLEMENTARY GUIDANCE AND DESIGN EXPERIENCE FOR THE FUSION SAFETY STANDARDS DOE-STD-6002-96 AND DOE-STD-6003-96 REMOTE MAINTENANCE SYSTEMS DOE-HDBK-6004-99  
 CMAA #70-1975 - "Specifications for Electric Overhead Traveling Cranes  
 CMAA #74-1974 - "Specifications for Top Running and Under Running Single Girder Electric Overhead Traveling Cranes, Crane Manufacturers Association of America, 1326 Freeport Road, Pittsburgh, PA, 15238.  
 CMAA #74-1974 - "Specifications for Top Running and Under Running Single Girder Electric Overhead Traveling Cranes and /or ANSI/ASME NOG-1-1989: Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Multiple Girder), Rules for Construction of,  
 Seismic Analysis: CMAA #70 Specification for Electric Overhead Traveling Cranes and /or ANSI/ASME NOG-1-1989: Overhead and Gantry Cranes (Top Running Bridge, Multiple Girder), Rules for Construction of Crane.
4. FEM. (FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION): CEN GUIDE 414, Safety of machinery - Rules for the drafting and presentation of safety standards Version dated 2004-12-15
5. DIN. DEUTSCHE NORMEN: DIN 15020., DIN EN ISO 4167:2004-08., DIN EN 1176-2:2003-07., DIN EN 1176-4:2003-07., DIN EN 12195-1:2004-04., DIN EN 12385-10:2004-03-29., DIN EN 13411-3:2004-09. y DIN EN 13411-6:2004-9.
6. NORMA OFICIAL MEXICANA DE POLIPASTO: NOMR1001977.

7. HMI. (HOIST MANUFACTURERS INSTITUTE): Swing-Reduced Crane Control Prepared for U.S. Department of Energy Office of Environmental Management Office of Science and Technology August 1999.
8. AGMA. (AMERICAN GEAR MANUFACTURERS): A.G.M.A. - Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth. Norm 2001-B88, 1988.

## 2.4. Variables y Parámetros que Intervienen en Grúas Viajeras.

Siempre que se trata de seleccionar, diseñar elementos de una máquina o equipo es necesario conocer los factores o variables más importantes por considerar, ya que de ello depende en gran parte poder realizar el control de las mismas de manera óptima el manual ([5] Morales. 1986) especifica:

En relación con las grúas, las variables más importantes a considerar para su selección son las siguientes: a) Tipo de grúa (tipo de construcción que más conviene) b) Capacidad, claro e izaje. c) Clase de servicio. d) Medio ambiente en el que va a operar. e) Velocidades de operación. f) Equipo opcional.

a) Tipo de Grúa. (Tipo de construcción que más conviene). La determinación del tipo de grúa por usar, depende en gran parte del resultado del estudio y análisis integral de las necesidades a resolver con la grúa, así como las instalaciones y el local mismo donde se va a usar, pues la decisión debe ser tal, que dentro de un costo realista y económico se obtenga el óptimo resultado de ese conjunto, que al operar como un todo permita cumplir con los objetivos previstos tanto en cantidad como en calidad y costo. Sin embargo, la mayor parte de las veces ese estudio no se realiza en conjunto sino por separado o bien se piensa en la grúa ya una vez resuelto el diseño del local y sus instalaciones eléctricas y muchas veces ya construido.

b) Capacidad, Claro e Izaje. Capacidad Partiendo de la base de que una grúa no debe nunca operar con cargas cuyos valores sean mayores al de su capacidad, es necesario analizar el peso máximo por manejar, independientemente del número de veces en función tiempo, que este peso se va a manejar y esa será la capacidad de la grúa. Al determinar la capacidad de la grúa, es conveniente pensar en ampliaciones futuras, pues es muy probable que a la larga sea más económico adquirir la grúa con capacidad para la carga futura que para la carga actual o bien solicitar el puente de la grúa con capacidad para la carga futura y el carro para la carga actual, pues siempre será más económico cambiar únicamente el carro, que toda la grúa y las instalaciones necesarias para su buen funcionamiento.

c) Claro. Contempla las medidas de la grúa.

d) Izaje El levantamiento de carga en una grúa es fundamental para que cumpla correctamente con el trabajo por efectuar ya que esta medida determina la altura máxima a que se puede levantar la carga sin efectuar la seguridad en la operación de la grúa. Ésta medida afecta el diseño y construcción del sistema de elevación y, por lo tanto, cualquier cambio en la misma daría como resultado el tener que modificar el diseño y construcción de dichos sistemas ya sea en algunas de sus partes o bien en todo el conjunto. A mayor levantamiento el costo de la grúa aumenta.

e) Clase de Servicio. El tipo de servicio que posee la grúa. Para esta selección conviene usar la clasificación estándar de grúas en función de la clase de servicio, la cual está definida en las normas que se usen como referencia para la selección de la grúa.

## 2.5. Descripción de la Grúa Empleada para el Control.

Para la aplicación y comprobación de la teoría desarrollada se usará una planta de puente grúa usado en el estudio ([12] Singer. ) y de marca **Savannah River Technology Center (SRTC®)**, el cual posee las siguientes características: grúa de tipo puente de 15 toneladas métricas, el recorrido del puente es de 26 metros, el recorrido del carro es de 13 metros y el recorrido del gancho es de 8,2 metros aproximadamente. En comparación al modelo de cuerpo libre la longitud del cable  $L$ , varía entre 1,2 metros. Usando un modelo lineal para el sistema, las frecuencias varían entre 0,2 Hz a 0,45 Hz. ( $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$ ). Además, se supone que se está requiriendo reducir las oscilaciones producidas por su movimiento hasta un mínimo del 5 % del nivel obtenido durante una operación normal con una masa de 1 tonelada métrica. ■

## Capítulo 3

# Estrategia de Control.

El funcionamiento de los sistemas mecánicos depende de numerosas variables en su diseño, el ambiente en donde está su funcionamiento y el sistema de control que se emplee. Uno de los factores más importantes es la influencia que produce el ambiente. Sin embargo, aunque este produce una influencia muy fuerte en el lazo de control, el sistema es el que determina la operatividad; su robustez es casi siempre un factor mucho más importante en el funcionamiento correcto del sistema.

Dado el progreso tecnológico en las computadoras cuyas capacidad de cálculos son más rápidas y de estructuras de puertos más complejas (puerto de entrada/salida analógica, procesadores paralelos, entre otros); hacer el diseño del sistema de control es más sencillo y flexible que en otros momentos.

El sistema de control debe realizar funciones de colocación, trayectoria y seguimiento; además de suprimir y rechazar la vibración residual. En la figura (3.1), se puede apreciar el sistema de control a lazo cerrado que se empleará en este trabajo de grado.

En este capítulo se presenta en forma general diversas estrategias de control entre las cuales se pueden mencionar:

- Sistemas a Lazo Cerrado.
- Sistemas a Lazo Abierto.
- Sistemas Mixtos.

Es importante saber a priori que las respuestas de los sistemas de control se dividen según el orden de la ecuación característica del sistema. Si la ecuación característica se multiplica y se expresa en forma de polinomio, la potencia más alta de  $s$  que figure en el polinomio es el orden del sistema de control. Los sistemas de orden 1 son generalmente estables<sup>1</sup>, y se encuentran a menudo en la práctica. Los sistemas de orden 2 en general son difíciles de estabilizar, en un intervalo de frecuencia amplio; sin embargo, se emplean en ocasiones porque puede seguir una

---

<sup>1</sup>Existen muchos métodos para analizar la estabilidad o predecir la estabilidad de los sistemas de control, es importante insistir en que un sistema debe ser estable para que las constantes de error tengan significado.

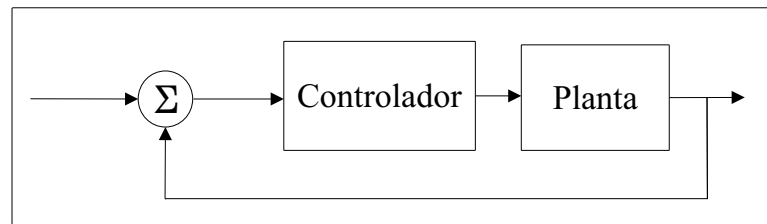


Figura 3.1. Sistema de control a lazo cerrado.

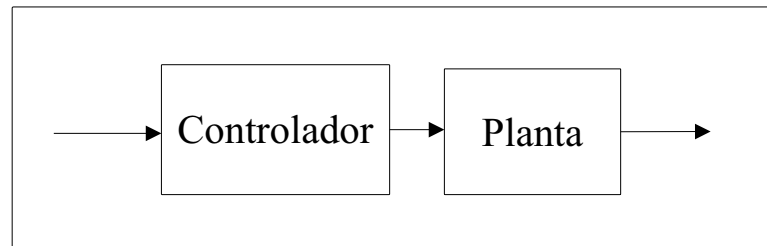


Figura 3.2. Sistema de control a lazo abierto.

entrada de aceleración (con error finito) y pueden producir un error de estado estable cero para una entrada de velocidad (con error finito) y un error de estado estable cero para una entrada de posición ([1] Belove. 1990). En fin el tipo de un sistema tiene una interpretación intuitiva ó matemática. Un sistema del tipo  $n$  integra la señal de error  $n$  veces.

Como se sugirió antes, cada uno de estos sistemas poseen técnicas específicas para implementar el control.

En la figura (3.1), se muestra un sistema a lazo cerrado donde las técnicas más empleadas son: Control con PID y PD, Control Adaptativo, Control en Espacio de Estados, Compensadores, entre otros. En estos sistemas de control, se alimenta al controlador con la señal de realimentación, a fin de reducir el error<sup>2</sup> y llevar la salida del sistema a un valor requerido. Esto siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error en el sistema ([7] Ogata. 1998). Al emplear una acción de control se requiere de un elemento que mida y luego compare, para usar la diferencia y corregir el error del control. El elemento sensor es uno de los elementos más costosos del sistema de control a lazo cerrado, ya que requiere de una ingeniería más precisa.

Por otra parte, en la figura (3.2) se muestra un típico control a lazo abierto. Las técnicas más empleadas para este sistema son: técnicas de filtrado, técnicas de pre-moldeado de la señal (Input Shaping, Hump). Aquí no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada, por lo que, a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un

<sup>2</sup>La definición de error del sistema es diferente para los sistemas de retroalimentación unitaria y no unitaria, en caso de no unitaria, el error se toma como la salida del comparador (o sustractor), que compara la entrada de referencia  $R(s)$  con la señal de retroalimentación  $X(s)$ .  $E(s) = R(s) - X(s)$ . Entonces el error es la diferencia entre la entrada y la señal de retroalimentación.



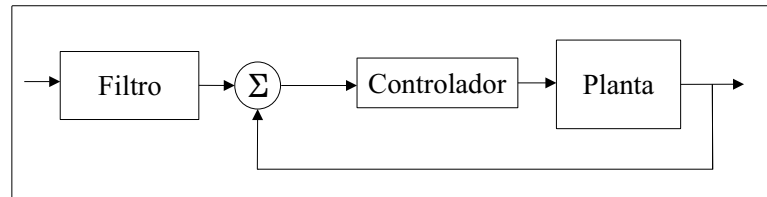


Figura 3.3. Sistema de control mixto.

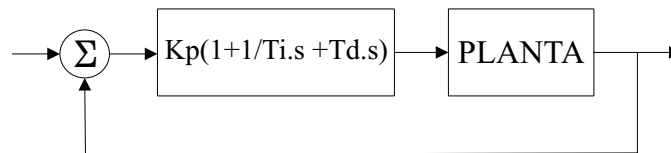


Figura 3.4. Sistema de control PID de una planta.

sistema de control de lazo abierto no realiza la tarea deseada, es decir, que un control a lazo abierto se debe conocer completamente la planta para emplear este conocimiento al control ([7] Ogata. 1998).

Se pudiera emplear las características de ambos sistemas mediante el uso de controles Mixtos, aprovechando las ventajas del control a lazo cerrado, como el uso de la realimentación, y emplear el control a lazo abierto para disminuir la precisión de los sensores. Al emplear los sistemas Mixtos se pueden utilizar sensores más económicos que en los sistemas de control a lazo cerrado y usar un control a lazo abierto con una buena caracterización de la planta para el diseño de un Filtro en la entrada que elimine las posibles variaciones que ocurran en el sistema, como en el caso planteado en el presente trabajo de grado.

### 3.1. Generalidades.

#### 3.1.1. PID

Se muestra en la figura (3.4) el control de una planta mediante el uso de un PID. Según ([7] Ogata. 1998) se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar técnicas diversas de diseño con el fin de obtener los parámetros del controlador que cumplan con algunas especificaciones en estado transitorio y en estado estable en lazo cerrado. Partiendo de esto, se debe recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

Para llevar a cabo el control mediante el uso de un PID primero es necesario el ajustar el mismo, de forma que cumpla con algunas especificaciones planteadas. Este procedimiento se denomina sintonización del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron reglas para la sintonización de los controladores PID (esto significa hallar valores de  $K_p$  Ganancia proporcional,  $T_i$  Tiempo integrativo y  $T_d$  Tiempo derivativo) referente a la respuesta que la planta tiene, cuando se le aplica un escalón unitario. Las reglas de Ziegler-Nichols, son muy convenientes cuando no se conoce el modelo matemático de la función de transferencia.

### 3.1.2. Controladores PD.

El control mediante el uso de un PD (Proporcional-derivativo) se define como

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt},$$

y su función de transferencia es

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s),$$

en donde  $K_p$  es la ganancia proporcional y  $T_d$  es el tiempo derivativo. Estos dos valores son ajustables. Según ([7] Ogata. 1998), esta acción se denomina control de velocidad, puesto que la salida de magnitud del controlador es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error.

Este tipo de controlador posee un carácter de previsión con la desventaja que produce amplificación del ruido de señales, provocando saturación en los actuadores.

Para el diseño de un PD, es muy sencillo y se explica en la ecuación (3.1); esta ecuación representa la forma de la función de transferencia (a lazo cerrado) de un sistema de segundo orden con un PD.

$$FT_{2orden} = \frac{K.(K_p + T_d s)}{s^2 + K T_d s + (\omega_n^2 + K K_p)}, \quad (3.1)$$

Al igualar la ecuación (3.1) con la de segundo orden de un sistema deseado, se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} Numerador_{2orden} &= s^2 + 2\zeta_d \omega_{nd} s + \omega_{nd}^2 \\ 2\zeta_d \omega_{nd} &= K T_d \\ \omega_{nd}^2 &= (\omega_n^2 + K K_p), \end{aligned}$$

Luego se procede a fijar los valores  $\omega_{nd}$  y  $\zeta_d$  para despejar los parámetros  $K_p$  y  $T_d$ , que representan la ganancia proporcional y el tiempo derivativo.

### 3.1.3. Sintonización del PID.

Las reglas de sintonización de Ziegler-Nichols se han usado con frecuencia para el ajuste de controladores PID en los sistemas de control de procesos en donde no se conoce con precisión la dinámica de la planta. Estas reglas de sintonización han demostrado ser muy útiles durante muchos años, este es uno de los métodos más empleados en la industria ([7] Ogata. 1998), el cual se describe a continuación:

**Método:** Ziegler y Nichols propusieron unas reglas para determinar los valores de la ganancia Ganancia proporcional ( $K_p$ ), Tiempo integral ( $T_i$ ) y del Tiempo derivativo ( $T_d$ ), con base a unas características de respuesta transitoria de una planta específica. Existen dos métodos denominados reglas de sintonización de Ziegler-Nichols, en ambos se pretende obtener un 25 por ciento de sobrepaso máximo en la respuesta escalón.

En este método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, como se observa en la figura (3.5). Si la planta

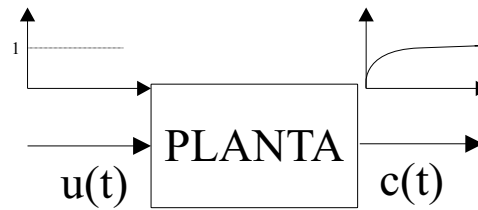


Figura 3.5. Respuesta del escalón unitario de una planta.

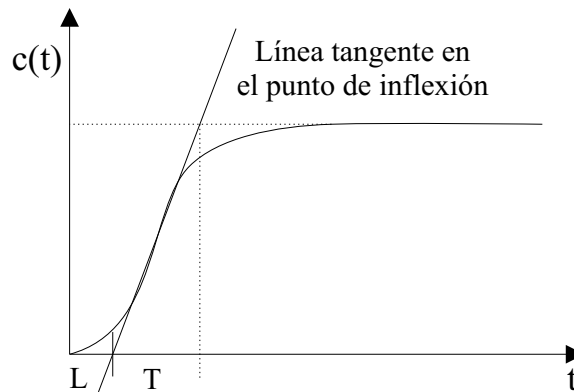


Figura 3.6. Curva de respuesta con forma de S.

no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener una forma de S, como se observa en la figura (3.6).

Por medio de la curva de forma S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo  $L$  y la constante de tiempo  $T$ . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determina dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y la línea  $c(t) = K$ , como se aprecia en la figura (3.6). En este caso, la función de transferencia  $C(s)/U(s)$  se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo de transporte del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K \cdot e^{-Ls}}{T \cdot s + 1}, \quad (3.2)$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  de acuerdo a fórmulas tabuladas donde referencia el tipo de controlador y los parámetros de  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$ .

#### 3.1.4. Compensadores.

Se define compensación ([7] Ogata. 1998) como la modificación de la dinámica del sistema, realizada para satisfacer las especificaciones determinadas". Para esto existen muchas técnicas para alterar la dinámica del sistema y satisfacer el diseño planteado, uno de estos métodos es alterar la ganancia, sin embargo, en

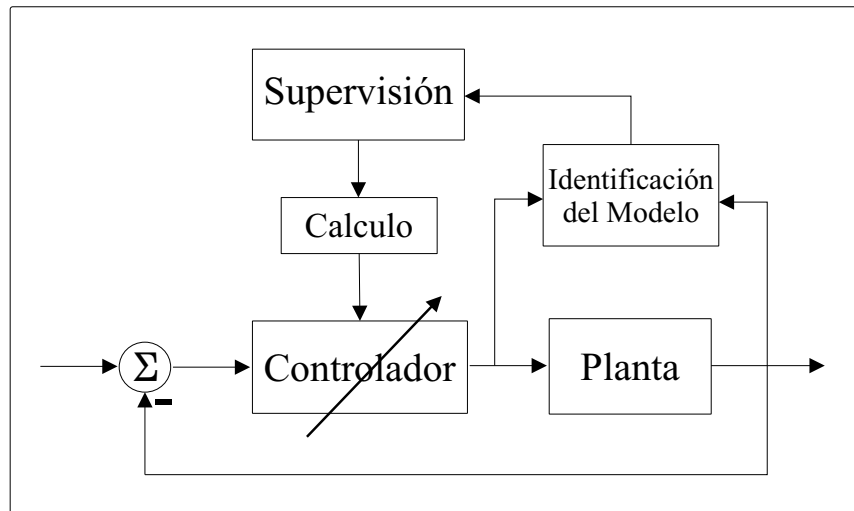


Figura 3.7. Esquema general de un sistema de control adaptativo.

muchos casos prácticos, el ajuste de la ganancia tal vez no proporcione una alteración suficiente del comportamiento del sistema, por lo que se debe pensar en compensadores de adelanto o atraso y atraso-adelanto. Para realizar un ajuste diferente al de la ganancia, es necesario modificar los lugares geométricos de las raíces originales insertando un compensador. Una vez comprendido los efectos de la adición de polos y/o ceros sobre el lugar geométrico de las raíces, se puede determinar con facilidad las ubicaciones de los polos y los ceros del compensador<sup>3</sup> que deberá dar una forma conveniente al lugar geométrico.

Los dos métodos más empleados son: compensador de Adelanto y compensador de atraso.

### 3.1.5. Control Adaptativo.

Por lo general, los procesos de identificación y control se realizan en etapas diferentes, aunque esto no quiere decir que siempre deba ser realizado de esta forma. Cuando la identificación del sistema es recursiva, esto es, que el modelo de la planta se actualiza periódicamente sobre la base de estimados previos y nuevas actualizaciones de datos, el proceso de identificación y el control se pueden realizar en forma concurrente. Por esta razón, el control adaptativo puede entenderse como la combinación de una metodología de control con un sistema de identificación recursivo.

En la práctica, estas técnicas se aplican especialmente a plantas complejas cuyas características varían lentamente. En la figura 3.7, se muestra un esquema general de un control adaptativo el cual a grandes rasgos posee un identificador en línea con un controlador.

Debido al acoplamiento entre estos dos subsistemas, una mala inicialización puede llevar a la inestabilidad del sistema. En el caso la planta del puente grúa,

<sup>3</sup>La variación de las funciones de transferencia del sistema suele realizarse mediante amortiguación o agregando compensadores, filtros o PD ([1] Belove. 1990).

siempre va a poseer un valor en los parámetros a largos períodos de tiempo a menos que se modifique variando la longitud  $L$  y el valor de la carga  $M$ .

### 3.1.6. Espacio de Estados.

Para un estudio completo de los sistemas de control moderno se deben tomar en cuenta el número de entrada y el número de salidas que estos poseen. Y además el análisis de estos sistemas complejo posee una cantidad alta de ecuaciones; la mejor forma de orientar estos resultados es empleando el análisis de sistemas de control en el espacio de estados. En tanto que la teoría de control convencional se basa en la relación entrada-salida, o función de transferencia, la teoría de control moderna se basa en la descripción de las ecuaciones de un sistema en términos de  $n$  ecuaciones diferenciales de primer orden, que se representan de manera matricial en una ecuación de primer orden.

### 3.1.7. Control Óptimo.

Método de control que consiste en determinar la ganancia de realimentación de estados a través de la utilización de un criterio generalmente cuadrático que responde de alguna manera con la energía del sistema. El sentido óptimo se elige como una suma ponderada cuadrática media mínima de estados del sistema y señales de control. Esto puede interpretarse como minimizar el error cuadrático medio y el esfuerzo de control cuadrático medio, donde ambos objetivos son deseables. La forma matemática cuadrática media se elige porque es susceptible de solución de forma cerrada.

## 3.2. Técnicas de Lazo Abierto.

### 3.2.1. Técnicas de Filtrado.

Esta es una de las técnicas más empleada en la electrónica y control. Los filtros son usados para el pre-proceso de la señal de entrada además de no agregar energía al sistema. Esto se puede realizar empleando filtros pasa bajos o rechaza banda. Para el aumento de la eficiencia y la zona de corte se emplea un determinado número de filtro en cascada. Existen muchos tipos de filtros entre los que se pueden mencionar el Butterworth, Chebyshev y Elipticos estos se pueden diseñar y emplear para cualquier tipo de caso ó parámetros de diseño.

### 3.2.2. Input Shaping.

La historia del *Input Shaping* data del año de 1950 donde Smith O.J.M formuló la teoría de el control *posicast* ([16] Smith. 1957).

Desafortunadamente el control *posicast* era muy sensible al modelar los errores; estos errores conducía a generar unos niveles significativos de vibración residual. El *Input Shaping* se convirtió en una herramienta útil para muchos sistemas desarrollados, incorporando robustez a los mismos. En los años noventa se crearon dos grupos de investigación de esta tecnología y se le llamó *Input Shaping* ([11]

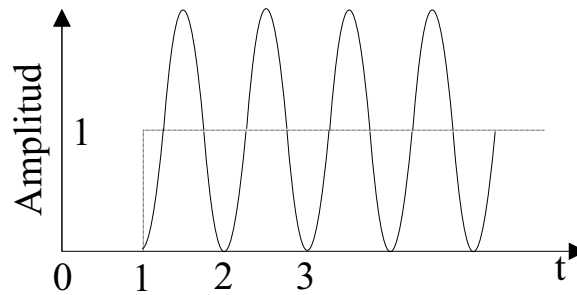


Figura 3.8. Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden  $f=1\text{Hz}$ .

Singer. 1990) que en español quiere decir Moldeado de Entrada, otros trabajos de esta área se denominaron técnica del *Time Delay Filtering* ([9] Singer. 1995) que en español quiere decir filtrado con tiempo de demora, en este trabajo de grado se empleó el término original conocido como *Input Shaping* ([11] Singer. 1990) puesto que eso es lo que le ocurre realmente a la señal de entrada, al sistema se introduce una forma de onda muy especial para reducir la vibración residual.

Para suprimir las vibraciones antes mencionada, se debe considerar la técnica del *Input Shaping*, propuesto por las investigaciones de ([11] Singer. 1990). Estos desarrollaron la técnica del *Input Shaping* para sistemas de segundo orden muy típicos en control. El IST resultar ser un tipo de forma de filtro denominado FIR (Finite Impulse Respose), ([12] Singer. ), este menciona que la amplitud de los impulsos es equivalente a los coeficientes del filtro. Las amplitudes y los tiempos son calculados para satisfacer a la planta propuesta.

La técnica consiste en convolucionar una secuencia de impulsos con cualquier señal de entrada que se denomina Comando. El producto de la convolución es el que se emplea en la entrada a la planta. El proceso se puede observar en la figura (3.11) en donde se observa la convolución de dos pulsos con la señal de entrada, el resultado son dos formas de señal que al ser aplicada en la planta y con el cálculo debido genera el resultado de vibración cero.

Esta técnica se puede observar en la figura (3.8), donde se muestra el efecto que produce un escalón unitario a un sistema armónico simple de segundo orden. Por ejemplo sea una entrada de escalón de 1 [N], la respuesta al sistema es una oscilación de 1Hz; ahora bien sea el caso que se muestra en la figura (3.9) donde la entrada cambia de un escalón unitario a una rampa, la respuesta al sistema de segundo orden es diferente, como se puede observar existe una reducción en un 63 por ciento de las oscilaciones con respecto a la entrada del escalón de 1 [N], reflejando una vibración reducida y un aumento de tiempo de subida. En contraste de los dos ejemplos anteriores, en la figura (3.10) muestra como funciona la técnica del *Input Shaping*, se convolucionan la señal de entrada (en este caso el escalón unitario) con los impulsos calculados del *shaping Input Shaping*, generando el moldeado de la señal, que al colocarla en la entrada del sistema, forma la respuesta con vibración mínima.

Este fenómeno se puede explicar de manera mucho más sencilla en el dominio del tiempo como se puede apreciar en la figura (3.13), en donde se muestra de forma combinada los efectos de los impulsos. La línea más delgada muestra la respuesta del sistema ante el primer impulso y la línea discontinua indica la respuesta ante el segundo impulso. La línea gruesa denota la respuesta total llevando a una vibración cero después del segundo impulso.

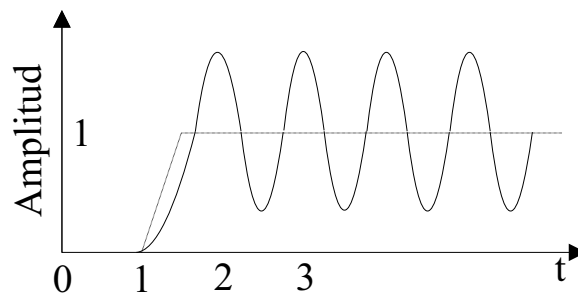


Figura 3.9. Respuesta ante una rampa a un sistema de segundo orden  $f=1\text{Hz}$ .

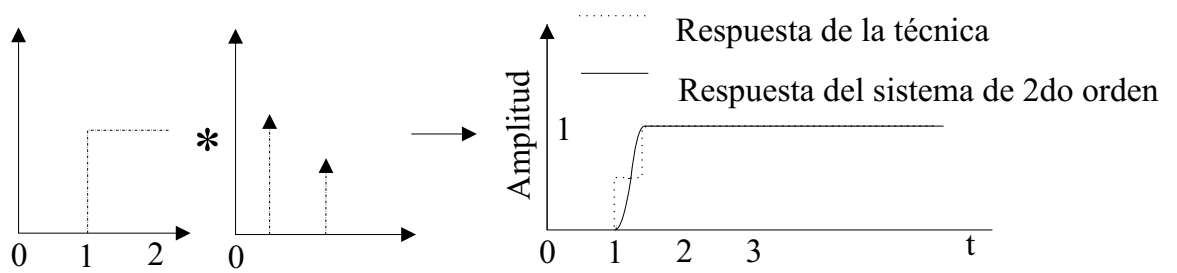


Figura 3.10. Respuesta al escalón de un sistema de segundo orden  $f=1\text{Hz}$ .

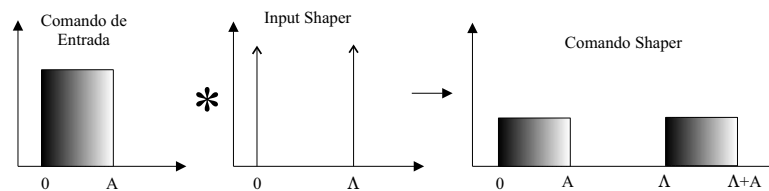


Figura 3.11. Proceso de moldeado de la señal de entrada con los impulsos.

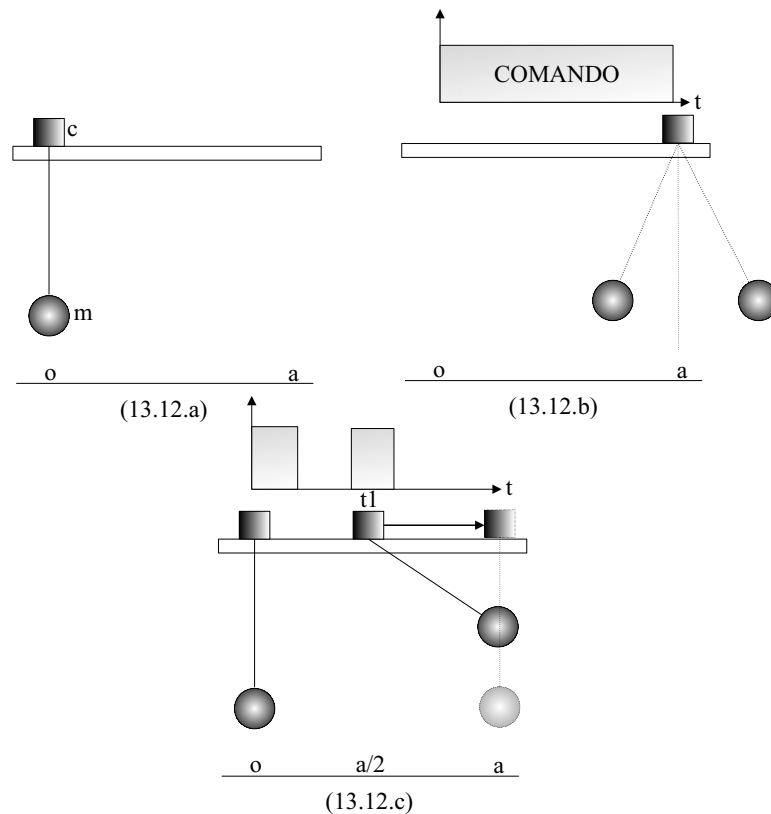


Figura 3.12. Ejemplo práctico del funcionamiento de la técnica.

Para ilustrar esta técnica se empleará un ejemplo práctico, supóngase que se desea trasladar una carga  $m$  desde el punto  $o$  hasta el punto  $a$ , moviendo el carro  $c$  en el sistema que se muestra en la figura (13.12.a.) Normalmente se movería aplicando un *comando*<sup>4</sup> desde el punto  $o$  hasta el punto  $a$  como se muestra en la figura (13.12.b) el efecto que se produce es que la carga oscile alrededor del eje vertical del punto  $a$ , hasta que se detiene producto de la fricción.

En la técnica del *Input shaping*: se aplica un primer pulso que posiciona el carro  $c$  en el punto  $\frac{a}{2}$ , aproximadamente, deteniéndose momentáneamente el carro, la carga oscila hasta el punto  $a$  como se muestra en la figura (13.12.c.) En el instante  $t1$  se aplica un segundo pulso que mueve el carro desde el punto  $\frac{a}{2}$  hasta  $a$  logrando de este modo que la carga permanezca inmóvil en el punto  $a$ , ante el segundo pulso producido inicialmente por el carro.

El comportamiento dinámico del sistema de segundo orden se describe a continuación en términos de los parámetros dinámicos, frecuencia natural  $\omega$  y un factor de amortiguamiento relativo del sistema  $\zeta$ . En la figura (3.14), el primer bloque muestra el filtro diseñado por la técnica de Input Shaping, los  $N$  impulsos con los cuales convolucionamos la entrada deben estar espaciados correctamente y con amplitud exacta para lograr el resultado esperado, el cual es obtener una vibración

<sup>4</sup>Comando: Pulso que ejecuta un operador al darle a la botonera por un rango de tiempo, se supone elemento como mata chispas y acondicionadores de entrada



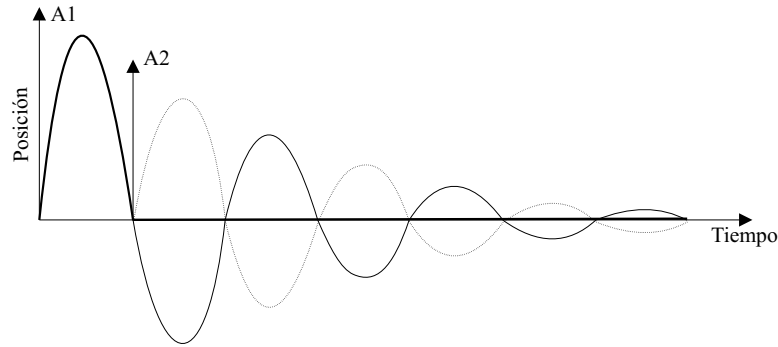


Figura 3.13. Técnica del Input Shaping en el dominio del tiempo.

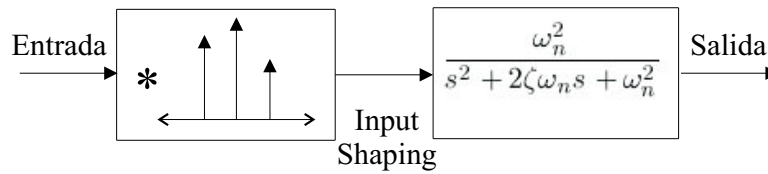


Figura 3.14. Diagrama de bloque de la técnica Input Shaping.

neta cero. Partiendo de la función de transferencia en lazo cerrado de un sistema de segundo orden que se resume en las ecuaciones (3.3) y (3.4).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{A}{Bs^2 + Cs + D}, \tag{3.3}$$

en términos de  $\zeta$  y  $\omega_n$  se puede escribir de la siguiente manera

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \tag{3.4}$$

El método *Input Shaping* como ya se ha mencionado con anterioridad, consiste pues en la convolución de por lo menos dos impulsos con la fuerza necesaria para la trayectoria deseada y producir la respuesta de salida, cuando la entrada son dos impulsos la respuesta del sistema de segundo orden se expresa en la siguiente ecuación (3.5).

$$c(t) = \left[ A \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \right] \text{sen} \left[ \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} (t - t_0) \right] \tag{3.5}$$

donde A es la amplitud, t es el tiempo,  $t_0$  es la posición temporal de un impulso. Puesto que cualquier función arbitraria se puede formar de una secuencia de impulsos, una secuencia de impulsos se puede utilizar para reducir mucho más la vibración en los sistemas dinámicos o la oscilación en este caso de cargas suspendidas bajo una trayectoria dada. Además, la respuesta de una secuencia de impulsos en un sistema lineal de segundo orden obtiene usando el principio de

superposición. Así, para los N impulsos, la respuesta se expresa en la ecuación 3.6.

$$c(t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)} \text{sen} \left[ (t-t_i) \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \right] \quad (3.6)$$

donde  $A_i$  y  $t_i$  son amplitudes y la posición temporal del Nsimo impulso, respectivamente, de manera general Singer y Seering en ([11] Singer. 1990) generaron y calcularon hasta obtener las ecuaciones simplificadas la ecuación (3.7) y (3.8), que corresponden al los términos agrupados en seno y coseno de la respuesta de segundo orden de una entrada de  $n$  impulsos:

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i^q e^{-\omega \zeta (t_N - t_i)} \text{sen} \left( t_i \omega \sqrt{1-\zeta^2} \right) = 0 \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i^q e^{-\omega \zeta (t_N - t_i)} \text{cos} \left( t_i \omega \sqrt{1-\zeta^2} \right) = 0 \quad (3.8)$$

donde  $q=0,1, \dots, N-2$ . Se deriva a continuación la solución de manera general para la amplitud  $c(t)$  con respecto a  $\omega$  y haciendo cero los valores  $t > t_N$ . Además, se le agrega dos datos importantes para su solución (3.9) y (3.10).

$$t_1 = 0 \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i = 1 \quad (3.10)$$

La primera ecuación, (3.9), selecciona el tiempo de referencia en el origen; y la segunda ecuación, (3.10) refleja el requerimiento de que la suma de todas las amplitudes sean igual a 1, esto es fácilmente justificable cuando la señal de entrada es de amplitud H, al ser convolucionado por la secuencia de impulsos positivos, la respuesta resulta una escalera de amplitud H, por la adición de las amplitudes de los impulsos. Por tanto, para alcanzar el mismo punto de nivel (*setpoint*) final igual a 1, las amplitudes de los impulsos deben sumar 1. Se debe hacer notar que para un número mayor a  $N=2$ , la técnica de *Input Shaping* llega a ser menos sensible a los errores de la valoración de  $\omega$  y  $\zeta$  debido al modelamiento del sistema ([10] Singer. 1989). Sin embargo, si la N llega hacer muy grande tiende a aumentar el tiempo de cálculo en la técnica. Luego de las ecuaciones (3.7), (3.8), (3.9) y (3.10) se derivan las ecuaciones (3.11), (3.12) y (3.13).

$$K = e^{\frac{-\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.11)$$

$$A_i = \frac{\binom{N-1}{i-1}}{\sum_{j=0}^{N-1} \binom{N-1}{j} K^j} \quad (3.12)$$

$$t_i = (i-1) \frac{\pi}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.13)$$

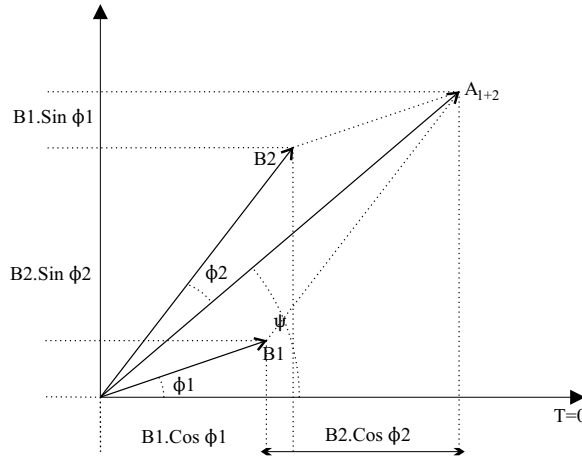


Figura 3.15. Diagrama vectorial de una secuencia de dos impulsos.

Como el estudio anterior es general, se procede a continuación hacer la demostración para dos series de impulsos usando otro método. Usando la ecuación (3.6) se puede hallar una mucho más compacta empleando un diagrama de vectores en la figura (3.15), ([8] Peláez. 2004). En este punto basándose en el diagrama de coordenadas polares  $(r, \phi)$  y las identidades trigonométricas, la superposición de los dos impulsos (asumiendo  $\omega_d = 2\pi$ ) se obtiene la ecuación (3.14).

$$B_1 \sin(\omega_d t + \phi_1) + B_2 \sin(\omega_d t + \phi_2) = A_{1+2} \sin(\omega_d t + \psi) \quad (3.14)$$

Luego usando las propiedades trigonométricas, se puede escribir (3.15)

$$\sum_{i=0}^{i=n} B_i \sin(\omega_d t + \phi_i) = A_{\Sigma} \sin(\omega_d t + \psi) \quad (3.15)$$

donde

$$A_{\Sigma} = \sqrt{\left( \sum_{i=0}^n B_i \cos(\phi_i) \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^n B_i \sin(\phi_i) \right)^2} \quad (3.16)$$

el desplazamiento de la fase no es importante para el análisis, por lo que el valor de  $B_i$  es:

$$B_i = \frac{A_i \omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega (t - t_i)} \quad (3.17)$$

Para obtener la amplitud de la vibración residual causada por la secuencias de los impulsos se evalúa (3.16) donde el tiempo final es  $t = t_n$ . Sustituyendo (3.17) dentro (3.16) y extrayendo los términos constantes de la raíz cuadrada resulta:

$$A_{\Sigma} = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta \omega t_n} \sqrt{(C(\omega, \zeta))^2 + (S(\omega, \zeta))^2} \quad (3.18)$$

donde

$$C(\omega, \zeta) = \sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta \omega t_i} \cos(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t_i) \quad (3.19)$$

$$S(\omega, \zeta) = \sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta \omega t_i} \sin(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t_i) \quad (3.20)$$

En este punto, es posible expresar la amplitud en un valor uni-dimensional. Al dividir la ecuación (3.17), amplitud de la vibración residual por la magnitud del impulso en tiempo cero o la ecuación:

$$A_{\uparrow} = \frac{\omega}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.21)$$

Dividiendo la ecuación (3.17) entre (3.21), expresión conocida en esta literatura como porcentaje de vibración, es:

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta \omega t_n} \sqrt{(C(\omega, \zeta))^2 + (S(\omega, \zeta))^2} \quad (3.22)$$

En la literatura ([10] Singer. 1989), ([11] Singer. 1990) y ([3] Lau. 2003); esta ecuación es importante en el tema de vibraciones, puesto que define el valor de la amplitud de esta. Usando la ecuación (3.22) es posible fijar la vibración residual a un valor de porcentaje deseado.

Si  $V(\omega, \zeta)$  se fija a cero los parámetros que satisfacen a la ecuación  $\omega_m$  y  $\zeta_m$  se denominan Vibración Cero forma VC (Zero Vibration, forma ZV) shaped. Para asegurarse de que los puntos de referencias filtrados produzcan una misma amplitud al sistema que sin los filtros, la suma de las amplitudes de los impulsos totales deben sumar uno. La parte importante es fijar la ecuación (3.22) igual a cero y modelar los parámetros a partir de aquí. En el caso de los dos impulsos:

$$\sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta \omega t_i} \cos(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t_i) = 0 \quad (3.23)$$

$$\sum_{i=0}^n A_i e^{\zeta \omega t_i} \sin(\omega \sqrt{1 - \zeta^2} t_i) = 0 \quad (3.24)$$

Para reducir al mínimo el retraso como se mostró en el caso general, el primer impulso se colocará en el tiempo:

$$t_1 = 0 \quad (3.25)$$

Dado que existen cuatro ecuaciones que se satisfacen, esto es dos amplitudes y dos localizaciones de tiempo, en el caso de  $i=2$  y sustituyendo (3.25) en (3.23) y (3.24) y usando la ecuación (3.10) se obtiene:

$$A_1 + A_2 e^{\zeta \omega t_2} \cos(t_2 \omega \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (3.26)$$

$$A_2 e^{\zeta \omega t_2} \sin(t_2 \omega \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (3.27)$$

$$A_1 + A_2 = 1 \quad (3.28)$$

Se puede observar que en la ecuación (3.27) se satisface por el argumento del seno, cuando este vale 0 y ocurre en  $\pi$ , donde  $t_2$ :

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (3.29)$$

El segundo impulso se coloca en un periodo medio que depende de la amortiguación ó la frecuencia natural. Al sustituir (3.29) en la ecuación (3.26) se obtiene que:

$$0 = A_1 - A_2 e^{\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.30)$$

solucionando (3.30) y (3.28) las amplitudes de los impulsos resulta:

$$A_1 = \frac{1}{1 + e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}}$$

$$A_2 = \frac{e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}}{1 + e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}}$$

Finalmente, se puede resumir el resultado de los dos impulso en la siguiente matriz de *Input Shaping*.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}} & \frac{e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}}{1+e^{\frac{-\zeta\pi}{1-\zeta^2}}} \\ 0 & \frac{\pi}{\omega\sqrt{1-\zeta^2}} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

La ecuación (3.31) es llamada Vibración Cero (ZV) por que satisface la condición que la vibración residual es cero cuando no hay error en la frecuencia modelada. Sin embargo, la forma de ZV es muy sensible para modelar su error. Para demostrar esto se puede trazar una función de curva de sensibilidad para la forma ZV.

### 3.2.3. Comportamiento del Sistemas de Orden Superior y el Input Shaping.

El análisis anterior del *Input Shaping* esta basado en sistemas de segundo orden. En este punto es posible aumentar el orden para el planteamiento a sistemas de orden superior. Este tipo de análisis es muy complejo en cuanto al algebra, por lo que se puede realizar otro tipo de estudio. Este nuevo análisis comprende el estudio de los efectos de los polos dominantes en el sistema de orden superior. Partiendo de lo anterior, el comportamiento de un sistema de control a lazo cerrado de ordenes superior, generalmente se diseña de manera que los polos dominantes en lazo cerrado tenga el factor de amortiguamiento  $\zeta$  y una frecuencia  $\omega_n$  deseada. Este enfoque supondrá que los efectos sobre las respuestas de los polos en lazo cerrado no dominantes son insignificantes o los polos están suficientemente alejados para que su efecto no se sienta en el sistema de segundo orden dominante (deseado); esto mismo se debe aplicar en el diseño de controladores y la técnica de *Input Shaping*.

## 3.3. Sistemas de Control Mixtos.

Los sistemas de control mixtos se tratarán como una propuesta de un sistema de control en este trabajo de grado, en el cual se emplearán la técnica de *Input Shaping* como método de control a lazo abierto y la técnica de diseño con un *PD* como un control a lazo cerrado. Esta técnica permite modificar la respuesta

transitoria, básicamente agregando amortiguamiento mediante el uso del PD y corrige las posibles variaciones de parámetros que pudiesen ocurrir en la planta. ■

## Capítulo 4

# Estudio del Modelo y Control.

Los sistemas dinámicos son, por lo general, no lineales. Sin embargo, es posible aproximarlos mediante modelos matemáticos lineales y modelos más sencillos. Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que presentan la dinámica del sistema con precisión, dentro de un rango. Este comportamiento se describe en ecuaciones diferenciales que se obtiene a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado, a continuación se aprecia las leyes de Newton para los sistemas mecánicos.

Se observa en la figura (4.1) el diagrama físico y del cuerpo libre. En la figura (4.2) la estructura del puente grúa. En la figura (4.1) se observa, una imagen de un puente grúa típico con las características más importantes. En la tabla (4.1) se muestra la leyenda de las definiciones de los parámetros que van a ser usado en el desarrollo analítico (4.1).

### 4.1. Desarrollo Analítico.

Para la obtención del modelo físico y el desarrollo de toda nuestra teoría, se deben asumir ciertos límites en el planteamiento del problema:

- No se consideran fuerzas disipativas (roce).
- El cable no es flexible, no se pandea ni se estira.
- El movimiento es en un solo plano.
- Las variaciones de los ángulos son despreciables.

Considerando la Segunda Ley de Newton en dirección  $x$ , ( $\sum F_x = masa \times a_x$ ) y en la dirección  $y$ , ( $\sum F_y = masa \times a_y$ ) del sistema puente grúa, se procede a escribir las ecuaciones:

$$-M\ddot{x} + F_{cable} \sin\Theta + F = 0, \quad (4.1)$$

$$F_{cable} \cos\Theta - F_{Riel} + Mg = 0, \quad (4.2)$$

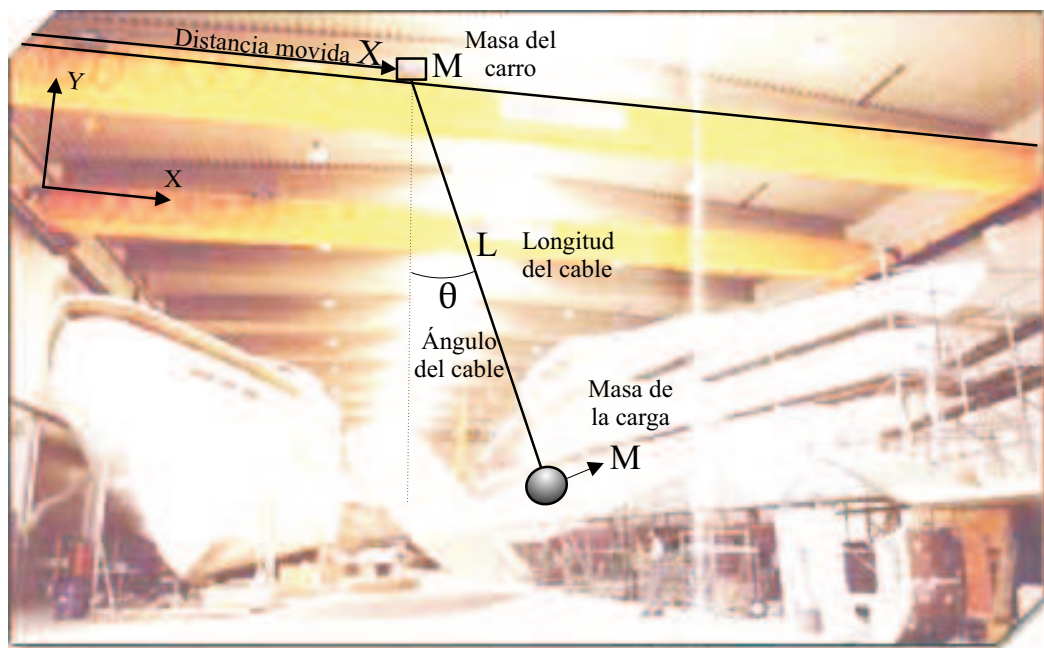


Figura 4.1. Diagrama del modelo físico.

Tabla 4.1. Leyenda de las definiciones empleadas en las ecuaciones analíticas.

Símbolo	Definición (Norma)
$x$	Distancia movida dirección x (m)
$\dot{x}$	Velocidad dirección $\left(\frac{m}{s}\right)$
$\ddot{x}$	Aceleración dirección x $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
$g$	Gravedad 9.81 $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
$F_{cable}$	Fuerza del cable (N)
$F_{riel}$	Fuerza aplicada en el riel (N)
$V_m$	Velocidad media $\left(\frac{m}{s}\right)$
$m$	Masa de la carga (Kg)
$M$	Masa del carro (Kg)
$L$	Longitud del cable (m)
$\theta$	Ángulo del cable (rad)



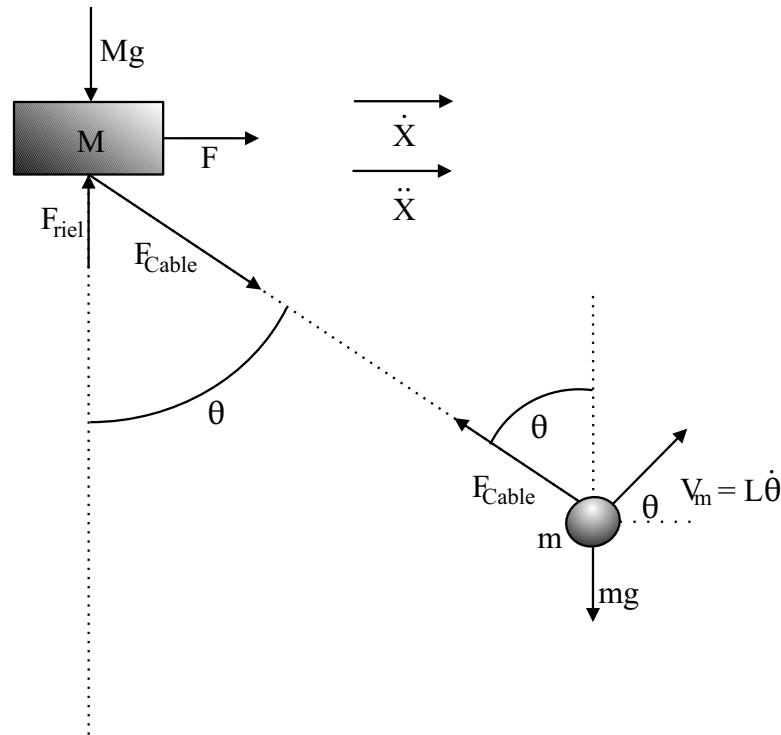


Figura 4.2. Diagrama de cuerpo libre.

La velocidad del carro se describe

$$\begin{aligned}\vec{v}_y &= L\dot{\Theta}\cos\Theta \\ \vec{v}_x &= \dot{x} + L\dot{\Theta}\cos\Theta,\end{aligned}\quad (4.3)$$

Al derivar la ecuación (4.3) con respecto al tiempo se obtiene la aceleración del carro puente grúa.

$$\begin{aligned}\vec{a}_x &= \ddot{x} + L\ddot{\Theta}\cos\Theta - L\dot{\Theta}^2\sin\Theta \\ \vec{a}_y &= L\ddot{\Theta}\sin\Theta + L\dot{\Theta}^2\cos\Theta,\end{aligned}\quad (4.4)$$

Tomando las componentes x y y de la aceleración de la ecuación anterior y usando la Segunda Ley de Newton y Asumiendo que las variaciones de  $\Theta$  y  $\frac{d\Theta}{dt}$  son muy pequeñas se obtiene que en los casos  $\sin\Theta \approx \Theta$  y  $\cos\Theta \approx 1$ , y los casos cuadrados de igual manera. Además producto de lo anterior queda que las variaciones de  $\frac{d\Theta}{dt}$  son pequeñas e implica que  $(\frac{d\Theta}{dt})^2 \approx 0$  y  $\Theta^2 \approx 0$ . Se puede volver a reescribir las ecuaciones (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4) como:

$$F_{cable}\Theta + F - M\ddot{x} = 0, \quad (4.5)$$

$$Mg + F_{cable} - F_{Riel} = 0, \quad (4.6)$$

$$m\Theta\ddot{\Theta} + mg - F_{cable} = 0, \quad (4.7)$$

$$m\ddot{\Theta}L + m\ddot{x} + F_{cable}\Theta = 0, \quad (4.8)$$

y se procede a sustituir  $F_{cable}$  de la ecuación (4.8) dentro de (4.5) resultando:

$$F - (M + m)\ddot{x} - mL\ddot{\Theta} = 0, \quad (4.9)$$

$$\ddot{\Theta}L + g\Theta + \ddot{x} = 0, \quad (4.10)$$

Se elimina la aceleración al combinar la ecuación (4.9) con la ecuación (4.10) y se obtiene:

$$F + ML\ddot{\Theta} + (M + m)g\Theta = 0, \quad (4.11)$$

Aplicando la transformada de La'Place de la ecuación (4.11) y reacomodando la misma da como resultado la función de transferencia que se usó para el análisis:

$$\frac{\Theta}{F} = -\frac{1}{MLs^2 + (M + m)g}, \quad (4.12)$$

del ([17] Y Noakes. 1994), multiplican la función de transferencia de la ecuación (4.12) por  $Mg$  y definen la frecuencia natural del sistema como  $\omega_n^2 = \frac{g}{L}$ , da como resultado

$$\frac{\Theta}{\left(\frac{F}{Mg}\right)} = -\frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right)s^2 + \left(1 + \frac{m}{M}\right)}, \quad (4.13)$$

De esta manera se puede estudiar los efectos de la frecuencia natural y de la masa del carro y carga. Nos interesará representar la función transferencia (4.12) de manera matricial en forma canónica controlable, esto como marco para el estudio de las diferentes estrategias de control. De la ecuación (4.12) se procede a multiplicar y dividir en el denominador por  $(ML)$  por lo que queda de la siguiente manera:<sup>1</sup>

$$\frac{\Theta}{F} = \frac{-\left(\frac{1}{ML}\right)}{s^2 + \left(\frac{M+m}{M}\right)\left(\frac{g}{L}\right)}, \quad (4.14)$$

Si además la masa ( $m$ ) del carro es despreciable con respecto a la masa de la carga ( $M$ ). Esto es para obtener un aproximado de la frecuencia natural del sistema. Entonces la ecuación (4.14) queda

$$\frac{\Theta}{F} = \frac{-\left(\frac{1}{ML}\right)}{s^2 + \left(\frac{g}{L}\right)}, \quad (4.15)$$

Donde la frecuencia natural de  $\omega_n = \sqrt{\frac{g}{L}}$ , para convertir esta ecuación en representación de variables de estados, se procede con la técnica descrita por ([7] Ogata. 1998), la cual mediante con representación en el espacio de estados en forma canónicas y transformándola en forma canónica controlable (4.16) y (4.17)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} F, \quad (4.16)$$

$$\Theta = [b_2 - a_2b_0 \quad b_1 - a_1b_0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + b_0F, \quad (4.17)$$

---

<sup>1</sup>([13] Singh. )

de la formas (4.16) y (4.17) se obtiene la matriz de planta del sistema puente grúa (4.16) y (4.17)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{g(M+m)}{l(M)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} F, \quad (4.18)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \frac{1}{ML} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (4.19)$$

## 4.2. Estrategia de Control.

Como se ha mencionado con anterioridad, el presente trabajo de grado se centrará en la descripción teórica del modelado matemático en sistema oscilatorio del puente grúa y de los procedimientos de control que se derivan de su comportamiento. Se analizará la alternativa de control seleccionada *Input Shaping*, la cual como se verá es la indicada para la reducción de las oscilaciones residuales. Se incluirán algunas simulaciones con el uso del programa Matlab®. Se incluye el estudio de esta técnicas de control, el modelado matemático del sistema, el diseño del sistema de control empleando Input Shaping y un PD, simulaciones en el computador y un modelo de control propuesto. No se pretende el desarrollo de nuevas teorías, sólo la aplicación de los conocimientos existentes a un problema real.

Para la aplicación y comprobación de la teoría desarrollada se usará una planta de puente grúa usado en el estudio ([12] Singer. ). Este posee la siguientes características: grúa de tipo puente de 15 toneladas métricas, marca **Savannah River Tecnology Center (SRTC®)**, el recorrido del puente es de 26 metros. el recorrido del carro es de 13 metros y el recorrido del gancho es de 6.1 metros en comparación al modelo de cuerpo libre la longitud del cable L, varía entre 1,2 [m] a 6,1 [m]. Usando un modelo lineal para el sistema, las frecuencia varían entre 0.2 Hz a 0.45 Hz. ( $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$ ). Además, se supone que se está requiriendo reducir la oscilación residual hasta un mínimo del 5% del nivel obtenido durante una operación normal con una masa de 0,5 toneladas métricas con un carro de masa 3 toneladas métricas.

### 4.2.1. Diseño con la Técnica Input Shaping.

Se muestra a continuación la técnica *Input Shaping* y las ecuaciones para el calculo de las amplitudes y tiempos para N=2, N=3 y N=4, estas se obtuvieron mediante el uso de la ecuación general dada en el capítulo 2. Se aplicarán dichas ecuaciones en el diseño del controlador a lazo abierto con la técnica Input Shaping.

A partir de la función de transferencia de la planta se define los parámetros necesarios como  $\zeta$  y  $\omega_n$ , estos son:

$$\zeta = 0 \Rightarrow \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} = \omega_n,$$

Para  $N=2$ :

$$\begin{aligned} t_1 &= 0, \\ t_2 &= \frac{\pi}{\omega_d}, \\ A_1 &= \frac{1}{1+K}, \\ A_2 &= \frac{K}{1+K}. \end{aligned} \quad (4.20)$$

donde  $K$  es igual a:

$$K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (4.21)$$

La robustez de *Input Shaping* a través del error que produce el valor de  $\omega_n$  puede incrementarse si se calcula la derivada  $\frac{dV}{d\omega_n} = 0$ , se iguala a cero para producir un pequeño cambio en la Vibración que corresponde al cambio del valor de frecuencia natural  $\omega_n$ . esto es:

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \\ V_1 &= \sum_{i=1}^{N_i=1} \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \cos(\omega_d t_i) \\ V_2 &= \sum_{i=1}^{N_i=1} \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \sin(\omega_d t_i), \end{aligned} \quad (4.22)$$

donde  $V$  es la amplitud de la vibración residual, se observa que es un módulo del vector resultante del efecto del componente seno y del coseno, al igualar la derivada de  $V$  a cero:

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{d\omega_n} &= \sum_{i=1}^{N_i=1} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \sin(\omega_d t_i) \\ \frac{dV_2}{d\omega_n} &= \sum_{i=1}^{N_i=1} A_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \cos(\omega_d t_i) \end{aligned} \quad (4.23)$$

y resolviendo el sistema de ecuaciones se obtiene las ecuaciones para tres impulsos

del input shaping. Para N=3:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0, \\
 t_2 &= \frac{\pi}{\omega_d}, \\
 t_3 &= \frac{2\pi}{\omega_d}, \\
 A_1 &= \frac{1}{1 + 2K + K^2}, \\
 A_2 &= \frac{2K}{1 + 2K + K^2}, \\
 A_3 &= \frac{K^2}{1 + 2K + K^2}.
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Donde el valor de K corresponde a la ecuación (4.21). La robustez de *Input Shaping* puede incrementarse mucho más al resolver la segunda derivada de la ecuación de vibración, de manera similar que lo anterior. Y se obtienen cuatro ecuaciones para calcular de nuevos los parámetros para generar un filtro de entrada mucho más robusto. Para N=4:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0, \\
 t_2 &= \frac{\pi}{\omega_d}, \\
 t_3 &= \frac{2\pi}{\omega_d}, \\
 t_4 &= \frac{3\pi}{\omega_d}, \\
 A_1 &= \frac{1}{1 + 3K + 3K^2 + K^3}, \\
 A_2 &= \frac{3K}{1 + 3K + 3K^2 + K^3}, \\
 A_3 &= \frac{3K^2}{1 + 3K + 3K^2 + K^3}, \\
 A_4 &= \frac{K^3}{1 + 3K + 3K^2 + K^3}.
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

donde el valor de K corresponde a la ecuación (4.21). Para el manejo más altos de vibraciones, se puede diseñar secuencias de impulsos de manera independiente. Entonces, la secuencia de impulsos se convolucionan con la señal de entrada y generará una forma de señal mucho más optima en cuanto al tiempo de asentamiento y porcentaje de alejamiento de la frecuencia de referencia.

Cuando N=2,  $\zeta = 0$  y  $w_n = 0,2$  (1.25 Hz), se tiene los valores de las amplitudes y tiempos para dos pulsos en la ecuación (4.26). Se muestra la gráfica de curva de sensibilidad en la figura (4.3), el eje horizontal de esta curva expresa la frecuencia  $\omega_n$  y el eje vertical es el valor de la vibración, existe otros tipos de curvas en las cuales el eje vertical expresa el porcentaje de vibración pero es muy similar al análisis actual, esta curva es una medida cuantitativa de lo robusto del método

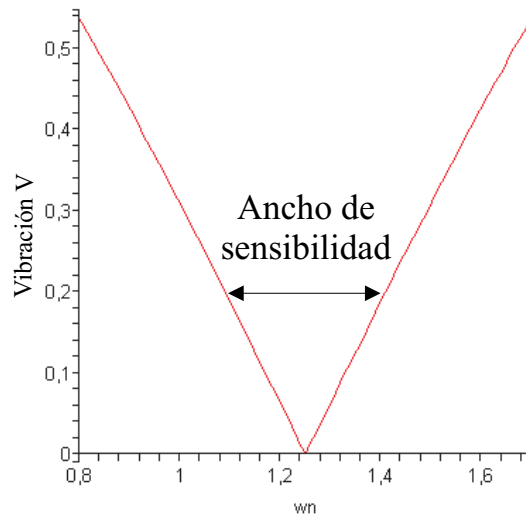


Figura 4.3. Curva de sensibilidad para dos pulsos, ZV.

en uso, por ejemplo, si se quiere medir cuanto es el ancho sensible del sistema aceptable de manera numérica, esta curva lo indicará. La curva muestra cuanto crece el porcentaje de vibración a medida que se va alejando  $\omega_n$  de la frecuencia del sistema o si es el caso del diseño entonces cuanto es la frecuencia máxima que se puede alejar el sistema para que la vibración tenga un valor máximo ([15] Singhose. 1995).

$$\begin{aligned} t_1 &= 0, \\ t_2 &= 2,493, \\ A_1 &= 0,5, \\ A_2 &= 0,5. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Cuando  $N=3$ ,  $\zeta = 0$  y  $w_n = 0,2$  (1.25 Hz), los valores de las amplitudes y tiempos para tres pulsos están dadas en la ecuación (4.27), se muestra la gráfica de curva de sensibilidad en la figura 4.4

$$\begin{aligned} t_1 &= 0, \\ t_2 &= 2,493, \\ t_3 &= 4,986, \\ A_1 &= 0,25, \\ A_2 &= 0,5, \\ A_3 &= 0,25. \end{aligned} \quad (4.27)$$

Se puede apreciar en la figura (4.4) como aumenta el ancho de la sensibilidad con respecto al método anterior, donde este tipo de forma de convolución con la señal de entrada es mejor. Este tipo de filtro ZVD es más robusto puesto que tiene la posibilidad de poder alejarse mucho más de la frecuencia del sistema sin que exista una vibración residual tan elevada. Se aprecia a continuación para  $N=4$ , de esta manera comprobar todo lo que se ha expuesto.

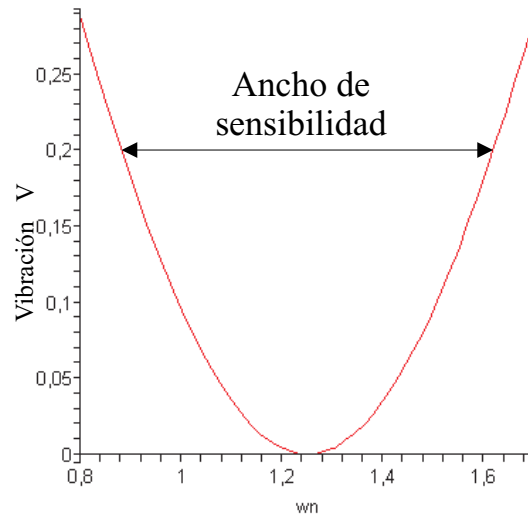


Figura 4.4. Curva de sensibilidad para tres pulsos, ZVD.

Cuando  $N=3$ ,  $\zeta = 0$  y  $w_n = 0,2$  (1.25 Hz), se tiene los valores de las amplitudes y tiempos para cuatro pulsos según la ecuación (4.28), además se muestra la gráfica de curva de sensibilidad en la figura (4.5)

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0, \\
 t_2 &= 2,493, \\
 t_3 &= 4,986, \\
 t_4 &= 7,48, \\
 A_1 &= 0,125, \\
 A_2 &= 0,375, \\
 A_3 &= 0,375, \\
 A_4 &= 0,125.
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

En la figura (4.6), muestra lo que anteriormente se a mencionado, como aumenta la robustez del filtro a medida que se le agrega más pulsos. Se puede observar que el ancho de punto a punto de cada una de las curvas aumenta mejorando la respuesta del sistema ante posibles variaciones del mismo. Al comparar las formas de las curvas ZV, ZVD y ZVDD se puede concluir que mientras mayor sean los pulsos calculados para la convolución con la entrada, aumentará la robustez del sistema y mejorará la respuesta del mismo ante variaciones internas de la planta. Esto es importante a la hora de hablar de una planta que varia en sus parámetros como es el caso de la longitud del cable que sostiene la carga del puente grúa o la misma carga.

Mediante la curva de sensibilidad se puede definir un parámetro de diseño y unos valores límites para los parámetros de la planta. Para el uso de valores mayores de pulsos en aumento de la robustez del sistema la técnica se llamará Extra-Insensitivo ó EI, y existe otras técnica denominadas Multi-Hump ó MH ([15] Singhose. 1995). ■

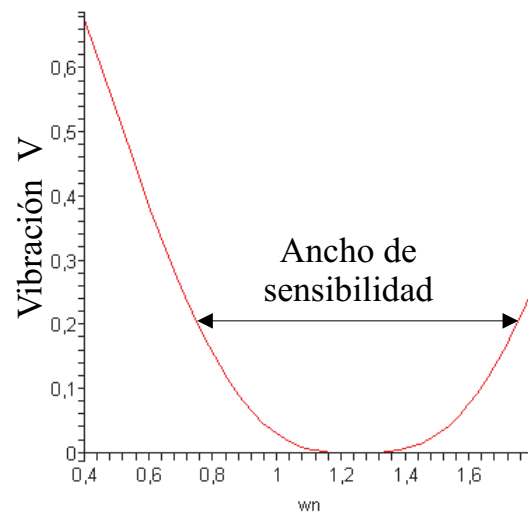


Figura 4.5. Curva de sensibilidad para cuatro pulsos, ZVDD.



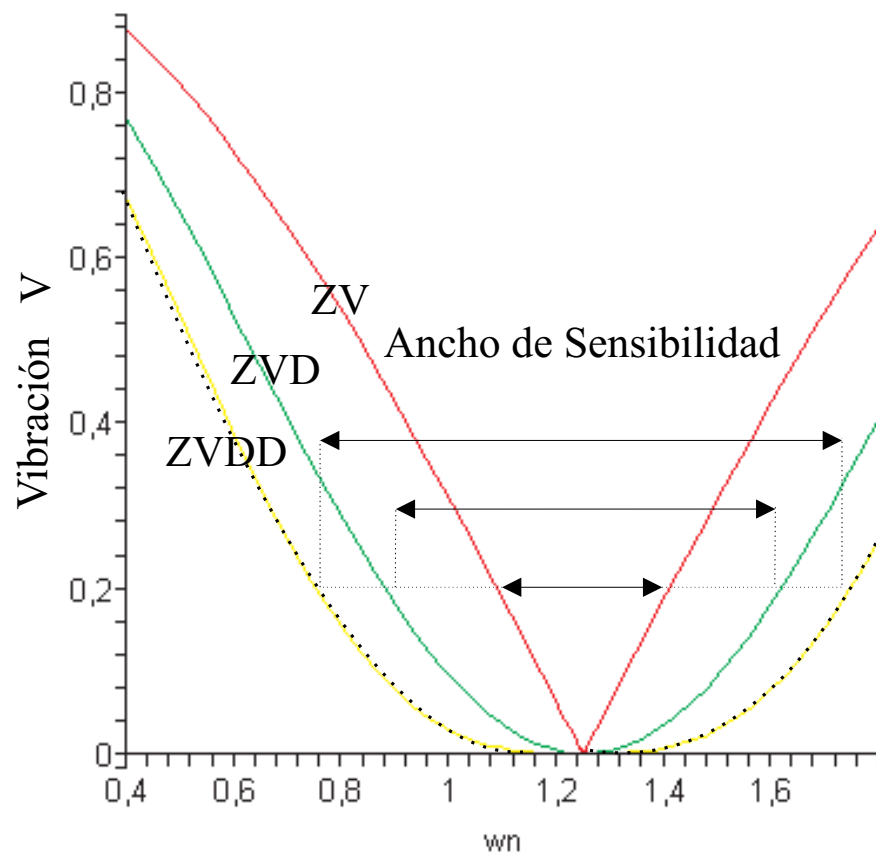


Figura 4.6. Comparación entre las curvas ZV, ZVD, ZVDD.

## Capítulo 5

# Análisis y Discusión de Resultados.

### 5.1. Resultados.

En este capítulo se describe el funcionamiento de la técnica del *Input Shaping* con la planta del puente grúa. Se puede observar en la figura 5.1, la representación en diagramas de bloque de un sistema típico de puente grúa. Con sentido práctico se supone que las dinámicas de los bloques como: la Botonera, el Amplificador de Potencia, Motores, Engranajes y poleas poseen una dinámica lo suficientemente rápida para admitir que estos efectos no causan en la dinámica de la planta ninguna variación.<sup>1</sup>

En la ecuación (5.1), se muestra la función de transferencia de la planta que se empleó para el análisis, la aplicación y comprobación de la teoría desarrollada, se utilizaron las siguientes características: longitud del cable,  $L$ , igual a 20 ft (6.1 m), una aceleración de gravedad de  $9.81 \frac{m}{seg^2}$  y una masa de 1 ton. Usando un modelo lineal para el sistema, las frecuencia varían entre 0.2 Hz a 0.45 Hz. ( $\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$ ). Además, como parámetro de diseño se requirió reducir la oscilación residual hasta un mínimo del 5% del nivel obtenido durante una operación normal con una masa de 1 ton. Se tiene

$$\frac{\Theta}{F} = 6101 \frac{0,0001639}{s^2 + 1,608} = \frac{1}{s^2 + 1,608}, \quad (5.1)$$

Realizando una comparación con la técnica de Modelado de la Entrada que se muestra en la figura (5.2) la forma de sistema que se estará estudiando. Se muestra el sistema con una señal de entrada que se denomina *Comando* (Pulso que ejecuta un operador al darle a la botonera por un rango de tiempo, se supone

---

<sup>1</sup>La simplificación es posible realizarla si se posee una descripción completa de la planta en términos de la dinámica del sistema, por lo que esta respuesta es mucho más lenta que los demás subsistemas (más rápidos). ([13] Singh. )

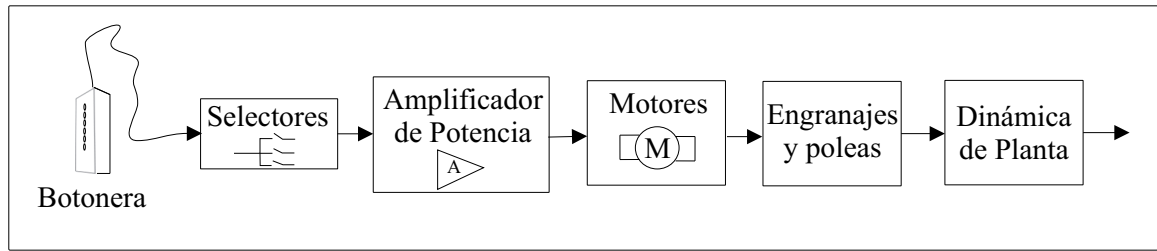


Figura 5.1. Elemento que conforma a la planta en estudio.

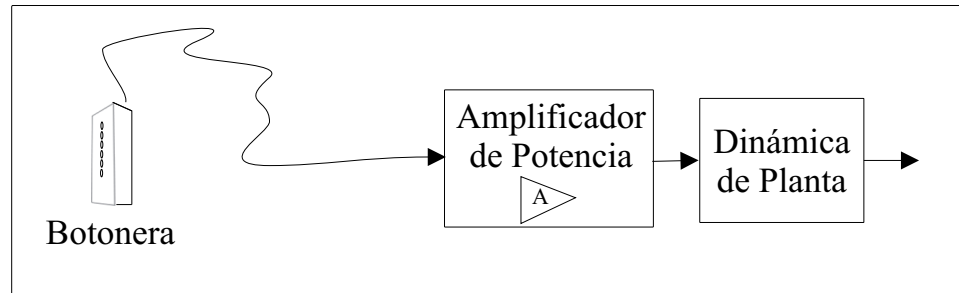


Figura 5.2. Elemento de la dinámica para el estudio.

elemento como mata chispas y acondicionadores de entrada), esta se conecta al amplificador de potencia y a la dinámica de la planta. El pulso se presenta como una fuerza de 1 [N], durante 1 [s].

### 5.1.1. Respuesta con el Moldeado de la Entrada (*Input Shaping*).

Para la comparación de las respuestas que forman el Moldeado de la Entrada se muestra la salida del sistema ante una respuesta de un escalón unitario, figura (5.3). Se aprecia la línea de puntos que representa fuerza de 1 [N], mientras que la respuesta del ángulo [rad] oscilatoria esta representado por la línea continua. Al ejercer una fuerza al sistema péndulo simple, se produce una respuesta armónica simple. Otra manera de observar este fenómeno es en el plano  $s$ , representado por la figura (5.4), en donde se muestra los polos del sistema en el eje  $j\omega$ , por lo que explica que el sistema sea oscilatorio armónico.

Al seguir el mismo estudio de respuesta, se presenta en la figura (5.5) el efecto del sistema ante el Moldeado de la entrada *Input Shaping*, donde el eje  $y$  esta representado por los valores  $\omega$  en [Rad] y el eje  $x$  por el tiempo en [s]; se puede notar como responde la planta ante la entrada de un pulso de ancho 1 [s] (partiendo desde 0 [s]) y con una amplitud de 1 [N] de Fuerza, esta señal se debe convolucionar con los impulsos del *Shaping*, calculados previamente con un valor de  $\zeta$  y  $\omega_n$  propios de la planta, generando la respuesta que se puede observar en la figura (5.6), esto quiere decir que la masa presenta un "balanceo" de manera que va a una posición y la respuesta del ángulo de la oscilación en esa nueva posición es 0 [rad] en  $t=3.8$  [s], se muestra dos flechas indicando cierta oscilación de amplitud muy baja. Nótese que cuando el pulso se convolucionar con el Moldeador la forma de señal cambia a dos pulsos de duración 1 [s] con amplitud de 0.5 [N] de Fuerza,

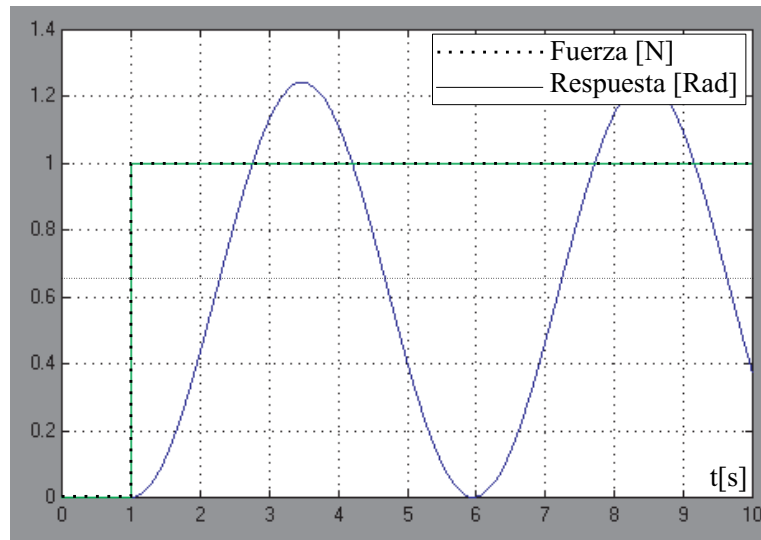


Figura 5.3. Respuesta de la planta ante un escalón unitario en  $t$ .

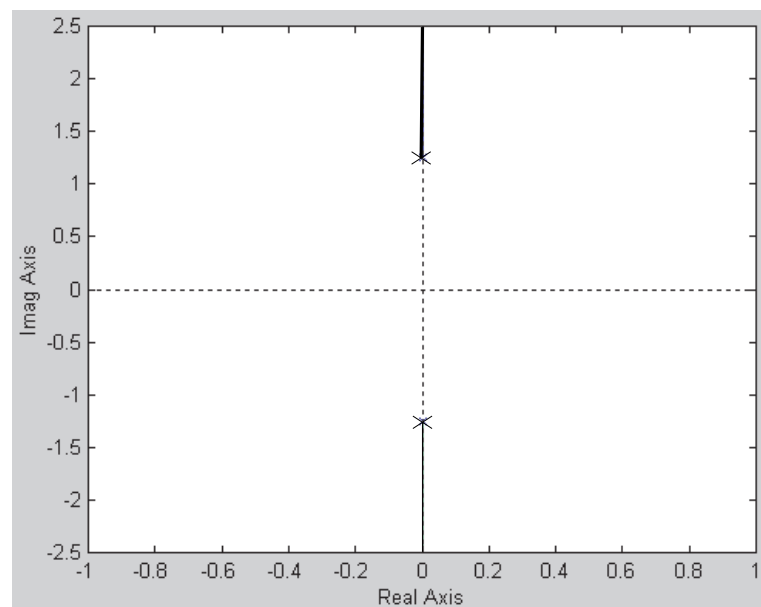


Figura 5.4. Respuesta de la planta ante un escalón unitario en el plano  $s$ .

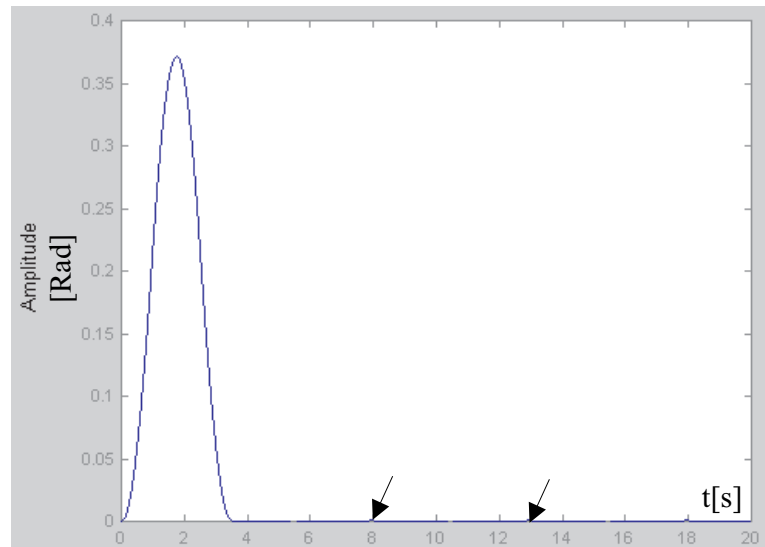


Figura 5.5. Entrada pulso de 1 seg, moldeado por la forma ZV.

esta forma de señal hace que la planta cambie su respuesta en la dinámica, ya que es más eficiente. Al incrementar un 20 % más de cable L al sistema, el efecto que se produce se ve reflejado en un aumento de las oscilaciones residuales en un 0.48 [rad] con respecto al sistema sin el Moldeador, véase la figura (5.7).

A continuación se muestra el efecto que se produce cuando la forma del Moldeador es ZVD. Este método es robusto que el anterior y se expresa mediante la derivada de ZV<sup>2</sup>. La forma de la señal de salida del Moldeador se presenta en la figura (5.8) se observar la variación y el nuevo pulso que se agregó al del modelo ZV.

La respuesta del sistema se muestra en la figura (5.9), se aprecia el efecto del movimiento reflejado en el ángulo [rad] que varía con respecto al tiempo [s], una vez más se produce un efecto de "Balanceo" de la masa cuando recibe una fuerza de 1 [N]. Al incrementar un 20 % más de cable L, el efecto que se produce se muestra en un aumento de las oscilaciones residuales en un 0.1 [rad] con respecto al sistema con el Moldeador de forma ZV; esto representa un 20 % menos de vibraciones residuales, véase la figura (5.10). Es importante los fenómenos producidos por el desajuste de la planta, puesto que en la vida real es lo que precisamente ocurre; y de esta manera concluir que esta técnica puede ser ampliamente aprovechada.

A continuación se realizará el mismo análisis usando la forma ZVDD (derivada de ZVD)<sup>3</sup>, este método es más robusto que los anteriores haciendo el sistema más insensible a las perturbaciones externas. La forma de salida del Moldeador se observa en la figura (5.11); la técnica de moldeo se produce al convolucionar 4 impulsos calculados previamente con el  $\zeta$  y el  $\omega_n$  y un pulso de 1 [s] de tiempo representado por el Comando que se le introduce al sistema, producto de haberse pulsado la botonera 1 [s] por parte del operador.

Se expone en la figura (5.12) la respuesta de la planta al introducir la señal de la forma ZVDD. Las vibraciones residuales para este modelo no son visibles. El

<sup>2</sup>  $\left(\frac{dV}{dw}\right)$

<sup>3</sup> Esto es  $\frac{d^2V}{d\omega_n^2}$

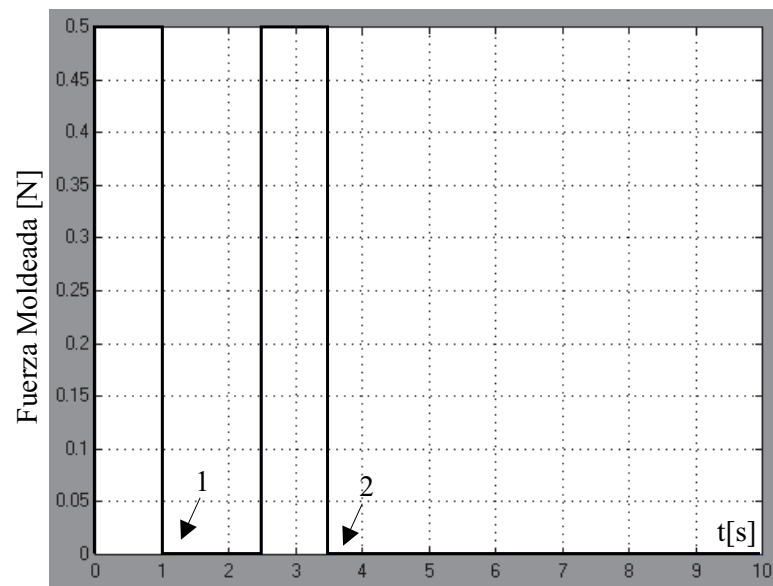
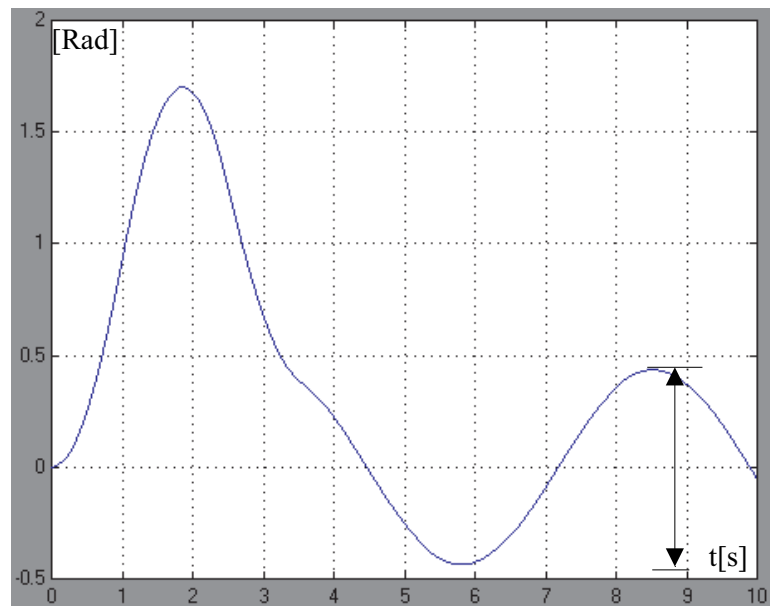


Figura 5.6. Comando Moldeado por la forma ZV.

Figura 5.7. Efecto de aumentar la Longitud  $L$  de la planta con la forma ZV.

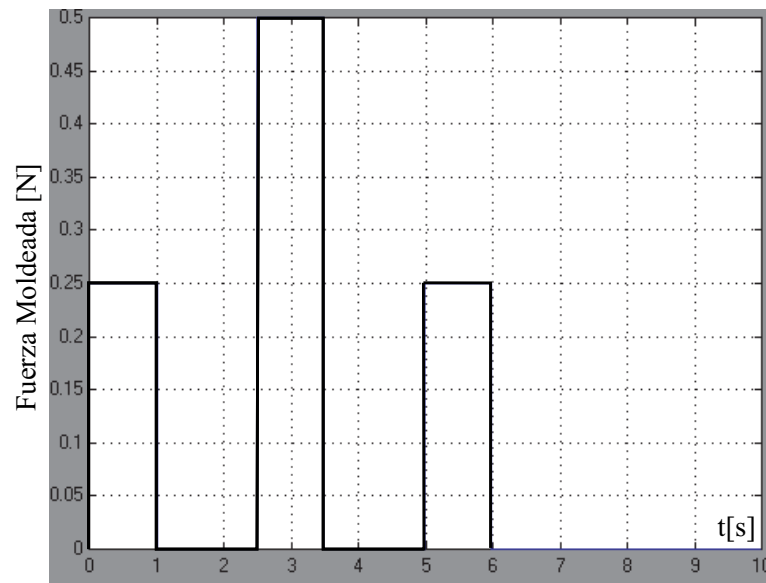


Figura 5.8. Comando Moldeado por la forma ZVD.

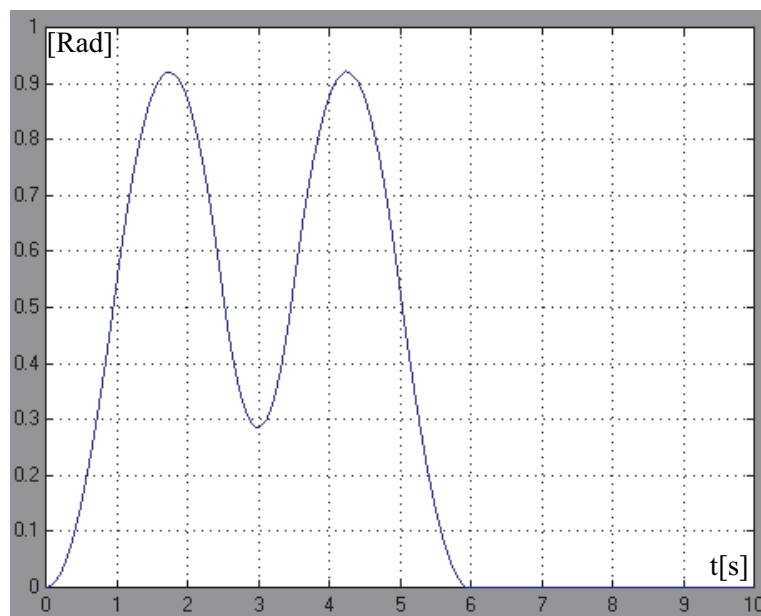


Figura 5.9. Respuesta de la Planta con entrada de la forma ZVD.

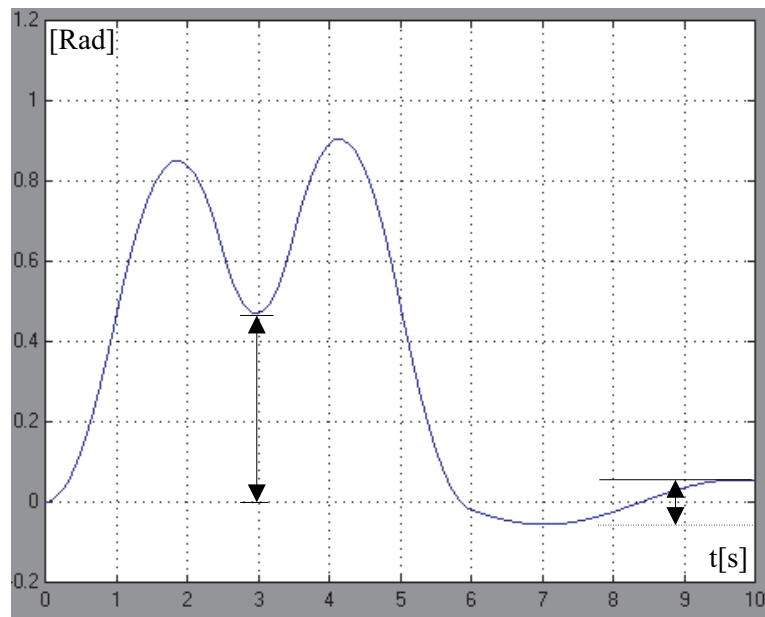


Figura 5.10. Efecto de aumentar la Longitud L al 20 % de la planta con la forma ZVD.

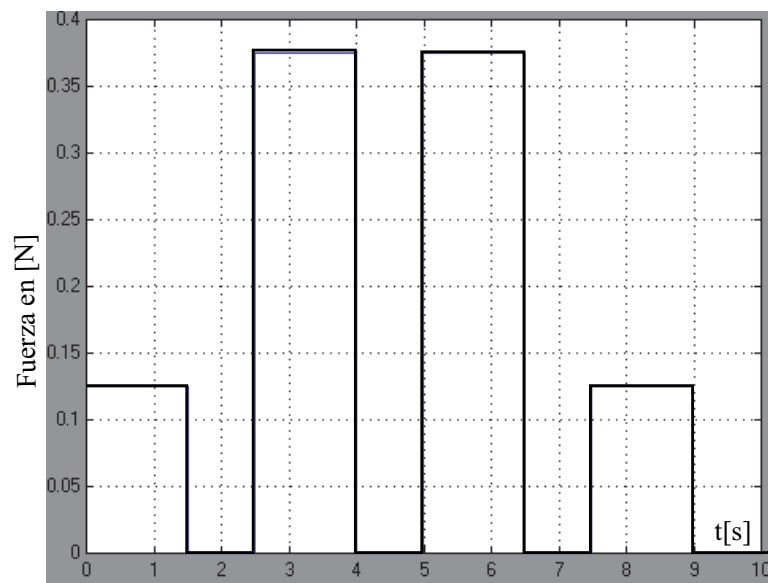


Figura 5.11. Forma del Moldeador por la forma ZVDD.



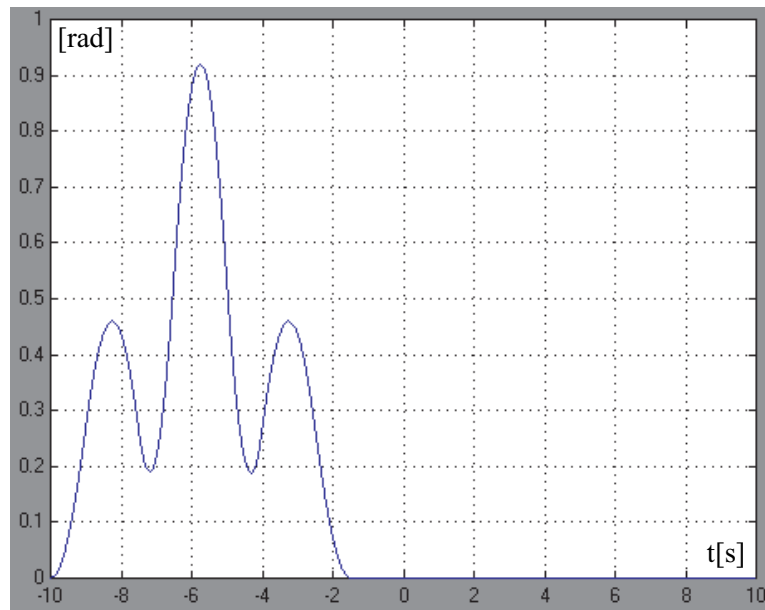


Figura 5.12. Comando Moldeado por la forma ZVDD.

efecto que se produce es mucho más complejo pero la respuesta es más robusta que ZVD, ya que esta forma, permite mayor grado de variación de los parámetros internos de la planta.

Es importante introducir el significado del ancho de sensibilidad que se muestra en la figura (4.6) del Capítulo 3. Pudiéndose concluir que mientras mayor sea el ancho de sensibilidad de esta curva, el sistema permitirá mayor grado de variación de sus parámetros internos como  $\zeta$  y el  $\omega_n$ ; esto es importante puesto que para una planta como la estudiada donde varía dichos parámetros (longitud del cable  $L$  y la carga  $M$ ) el soportar una amplias variaciones, permite poseer 1 solo controlador; de esta manera la solución es también económica.

Para realizar una comparación completa con lo antes expuesto, se procede a observar en la figura (5.13) las consecuencia de variar la planta en un 35 por ciento, resulta de un aumento a un 0.05 [rad] la amplitud de vibración. En la siguientes secciones se desarrollará el control propuesto donde se utilizará una forma de entrada del tipo ZVDD; por presentar muchas ventajas, en las que se mencionará: una alta reducción de la vibración de un 99 por ciento, con respecto a la amplitud que presenta la misma planta sin aplicar la técnica *Input Shaping*, Mejor robustez que los métodos ZV y ZVD; soportando el ZVDD una mayor variación en el aumento de la longitud del cable. (La curva es simétrica en el punto de la frecuencia natural del sistema, por lo que la planta presentará la misma vibración al disminuir el cable de longitud  $L$ .)

### 5.1.2. Respuesta con el PD

Partiendo de los fundamentos expuestos en el capítulo 2, se tiene toda la base para diseñar un compensador con características de la planta, aumentando con esto el amortiguamiento. Se pudiese pensar en un PID pero no es el indicado,

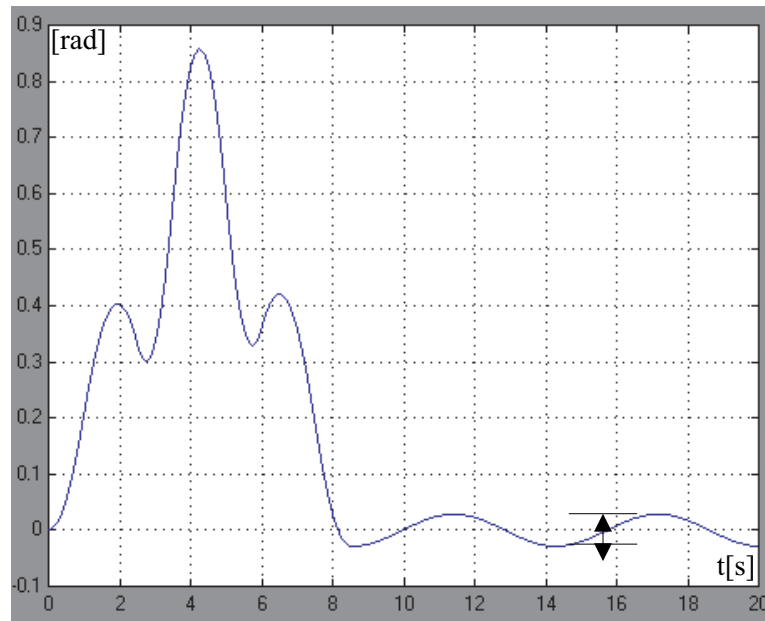


Figura 5.13. Sistema ante una entrada ZVDD y una variación del 35 % de L.

ya que, al emplear las técnicas de sintonización Ziegler-Nichols, garantizan un valor de 25 por ciento máximo de sobrepasso y entre 2 a 3 por ciento del tiempo de asentamiento, luego teniendo estos parámetros iniciales hay que proceder a realizar una sintonización fina, y como máximo se podría pensar en valores de tiempo de asentamiento iguales a los anteriores, requiriéndose de mucha energía para eliminar esta oscilación.

El objetivo final es aumentar el amortiguamiento del sistema, donde lo más indicado es el uso de un PD, con características de diseño siguientes:  $\zeta = 0,6$  y un  $\omega_{nd} = 3[\text{rad/s}]$  obteniendo un sistema amortiguado que reaccione más rápidamente que el anterior. Además, se empleará una planta que presenta las siguientes características: longitud del cable  $L=6.1$  [m], carga de masa  $M=1$  [ton] y una aceleración de gravedad de  $g=9.81$  [ $\frac{m}{s^2}$ ]. se muestra en la ecuación (5.2) el resultado de la función de transferencia de la planta con el PD en lazo cerrado:

$$f_{t_{PD}}(s) = \frac{8,98 + 1,76s}{s^2 + 1,766s + 17,98} \quad (5.2)$$

$$K_p = 56150$$

$$T_d = 11042,$$

En la figura (5.14) se muestra la respuesta del PD junto a la planta y una entrada al sistema de 1 [N] de fuerza en forma de un pulso de duración 1 [s]. Nótese el valor máximo de amplitud de los [rad] y el tiempo en que ocurre. Se realizará variaciones de la longitud del cable L en tres valores: 10, 30 y 50 por ciento. En la figura (5.15), se muestra la respuesta del sistema ante una variación de la longitud del cable de 10, 30 y 50 por ciento (de aumento). Se aprecia la amplitud máxima en radianes que ronda por los valores de 1.5 [rad] y el tiempo de establecimiento de aproximadamente 10 [s].

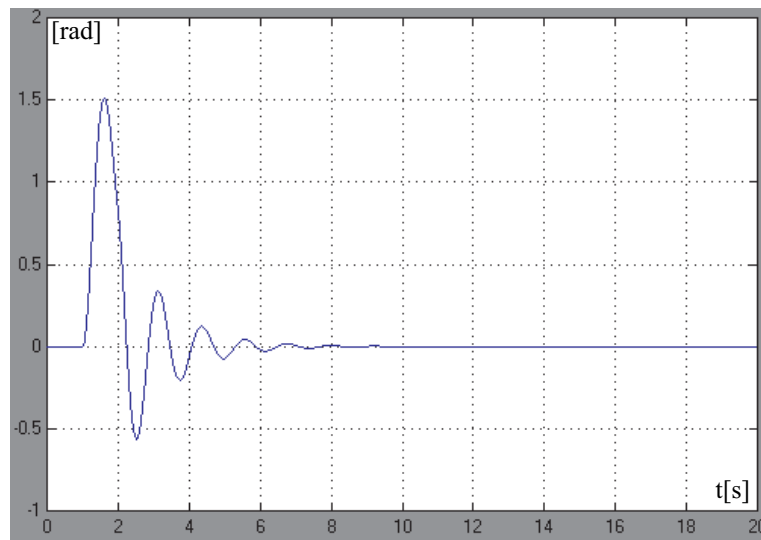


Figura 5.14. Respuesta del ángulo del sistema con un PD y la planta, ante un pulso de 1 N y 1 s de duración.

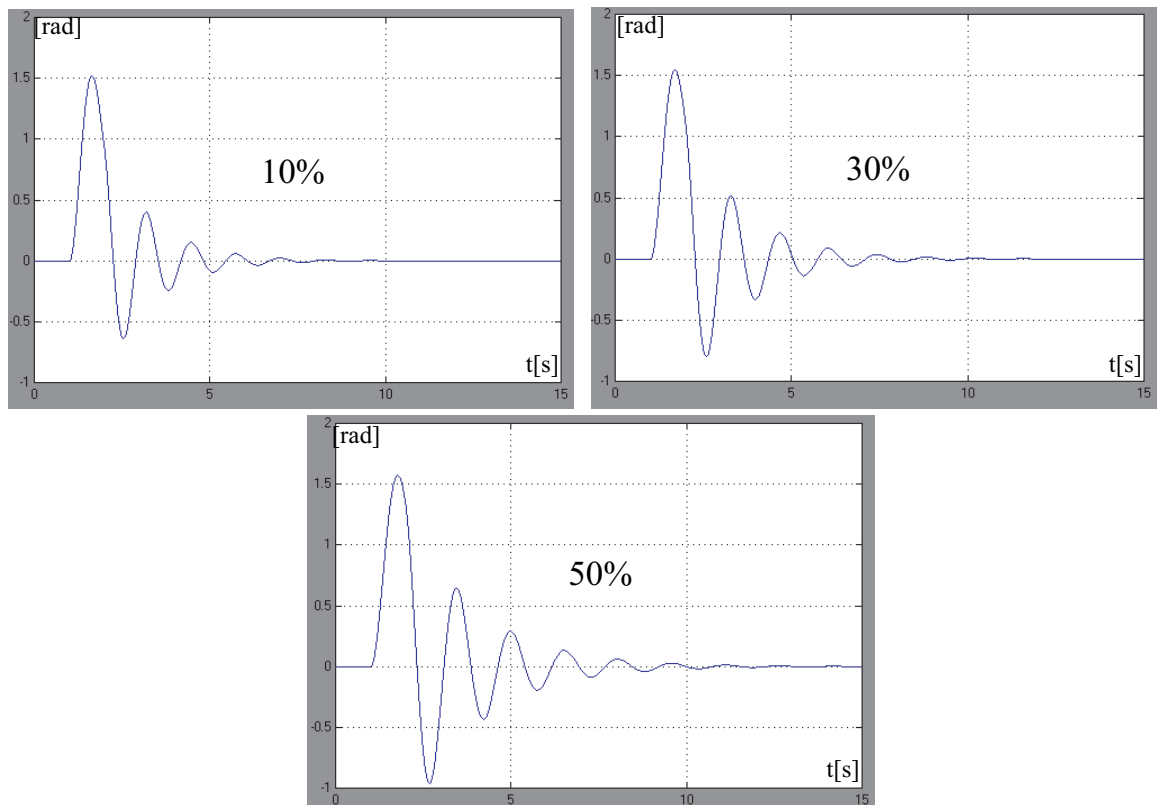


Figura 5.15. Respuesta del ángulo del sistema ante 10, 20 y 50% de variación en L.

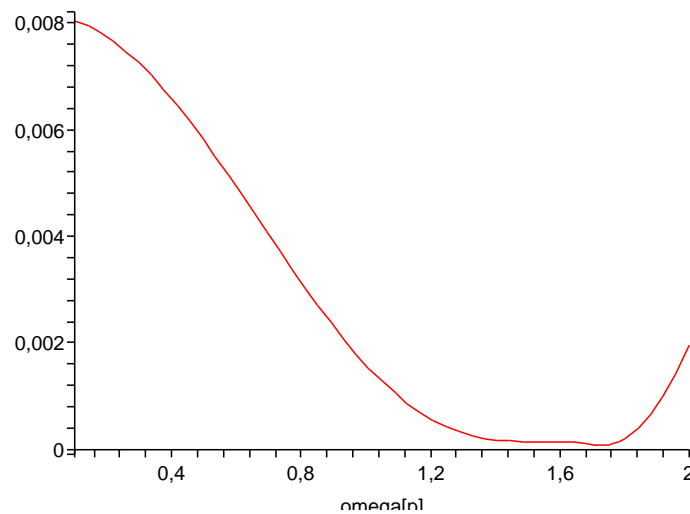


Figura 5.16. Respuesta del PD, ante la variación de  $\omega_n$ .

Se muestra en la figura (5.16), la curva de vibración residual del sistema con el PD a lazo cerrado, al variar la frecuencia  $\omega_n$  desde 0.1 hasta 2 ( $\omega_n = 1,26 \text{ [seg}^{-1}\text{]}$ ), con un Moldeador de forma ZVDD.

Al comparar esta curva con la presentada en la figura (4.6) del capítulo 3, se observan una reducción de los niveles de vibración en factores cercanos a 100, en el rango de 0.4 a 1.6 con variaciones similares de la frecuencia natural  $\omega_n$  con la presentada en un filtro ZVDD aplicado al sistema a lazo abierto.

## 5.2. Control Propuesto.

En los capítulos anteriores se explicaron diversos procedimientos para el diseño de controladores en las que se pueden mencionar para el control clásico: control adaptativo, control PD, compensadores entre otros. La propuesta de este trabajo de grado es unir la técnica del *Input Shaping* con la estrategia de control clásica mediante el uso de un PD y este último surtirá efecto para el caso de que la planta presente variaciones que sobrepasen las del ancho de sensibilidad de la técnica *Input Shaping*.

El *Input Shaping* es una técnica robusta según el número de pulsos que se calculen al sistema, pero cuando la planta sobrepasa el límite de diseño (ancho de sensibilidad) y al ser de lazo abierto tiende el sistema a desestabilizarse y perder el patrón original, por lo que se ha pensado en agregarle al sistema un PD.

En la figura (5.17) se muestra la propuesta de un sistema de control.

El parámetro de la planta que más varía es la longitud del cable, con rangos que van desde 1 [m] hasta 6.1 [m], haciendo que la frecuencia natural del sistema varíe. Pues bien, el sistema a lazo abierto producto de la señal de entrada al filtro *Input shaping* y el controlador PD en lazo cerrado, servirá para eliminar variaciones presente en la planta (longitud y carga). Se presenta en la figura (5.18) la respuesta del sistema PD, Planta y el Moldeador de Entrada de Comando, ajustado a una

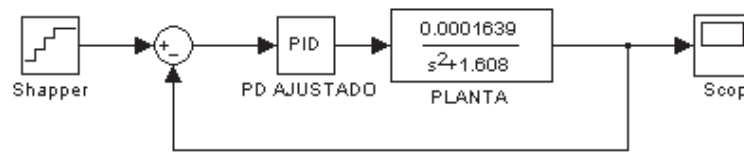


Figura 5.17. Propuesta del sistema de control para un puente grúa.

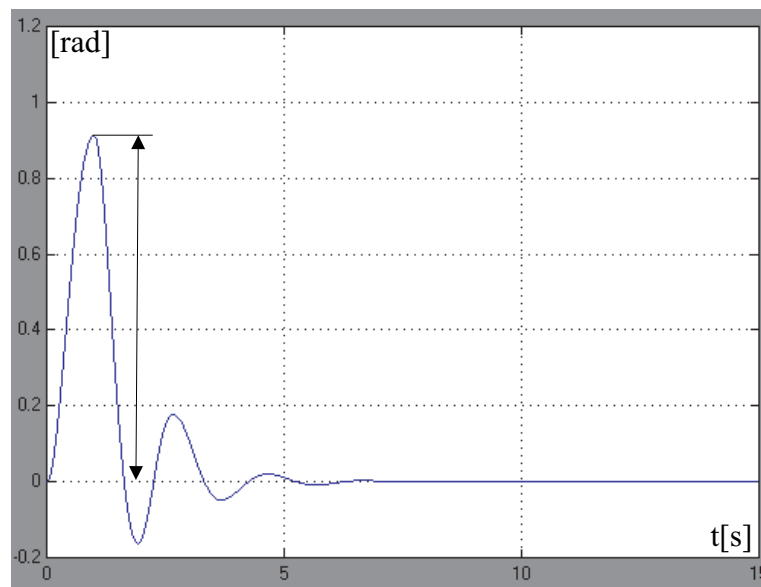


Figura 5.18. Propuesta del sistema de control para un puente grúa.

$\zeta = 0,6$  y  $\omega_n = 3$  como se muestra en la figura 5.17. Observando una señal más suave y de amplitud en primer semiciclo de  $0.9$  [rad]. Las variaciones de la planta, se pueden observar en la figura (5.19). En donde la misma altura del primer semiciclo posee una amplitud de  $0.9$  [rad] y presenta una misma respuesta de reducción de vibración. Lo importante de lo observado en la figura (5.19) es la variación del parámetro  $L$  a casi el doble de la longitud original, presentando las características necesarias ante una planta que cambia su dinámica ocasionada por variaciones internas. Este sistema es el propuesto para el diseño del control para un puente grúa por tener esta capacidad de anular efectos de variación en los parámetros.

### 5.3. Propuesta de un dispositivo de control electrónico.

Se presenta en la figura (5.20) un posible diseño de control electrónico el cual se puede dividir de la siguiente manera: etapa de control o DSP, etapa de acondicionamiento de los sensores, etapa de potencia.

La figura muestra un sistema de control típico utilizando como computador un DSP, algunos de los modelos poseen su convertidos AD/DA. Unas de las ven-

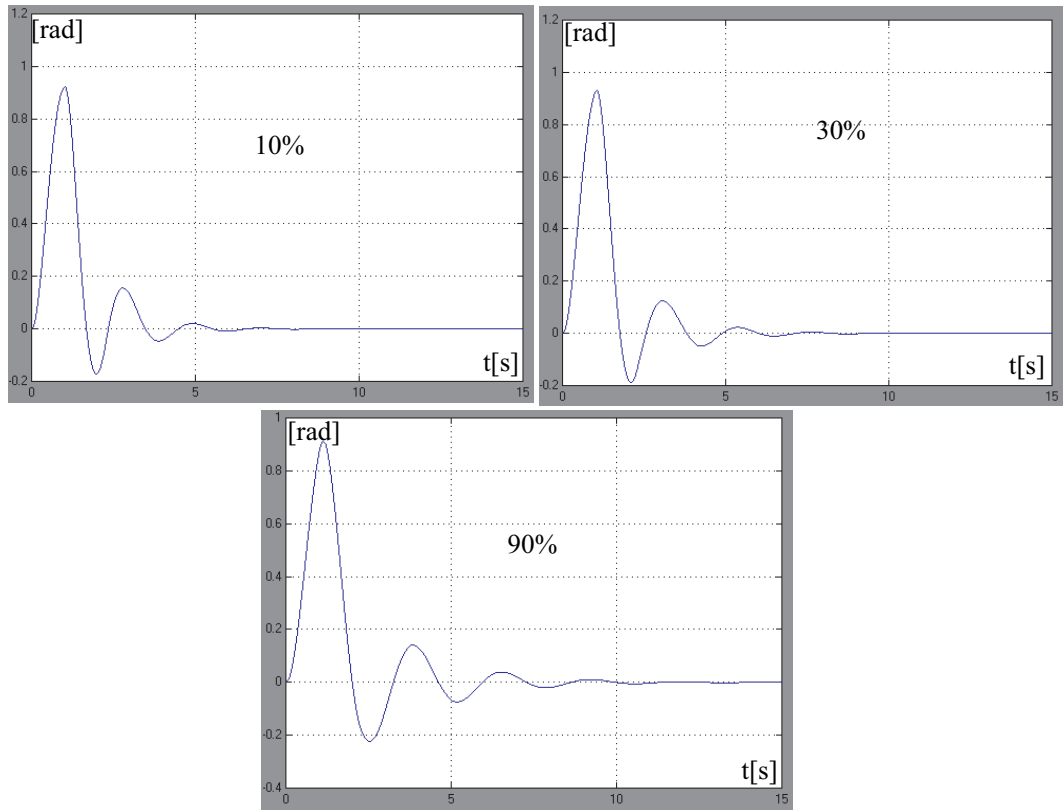


Figura 5.19. Respuesta del sistema de control propuesto para un puente grúa.

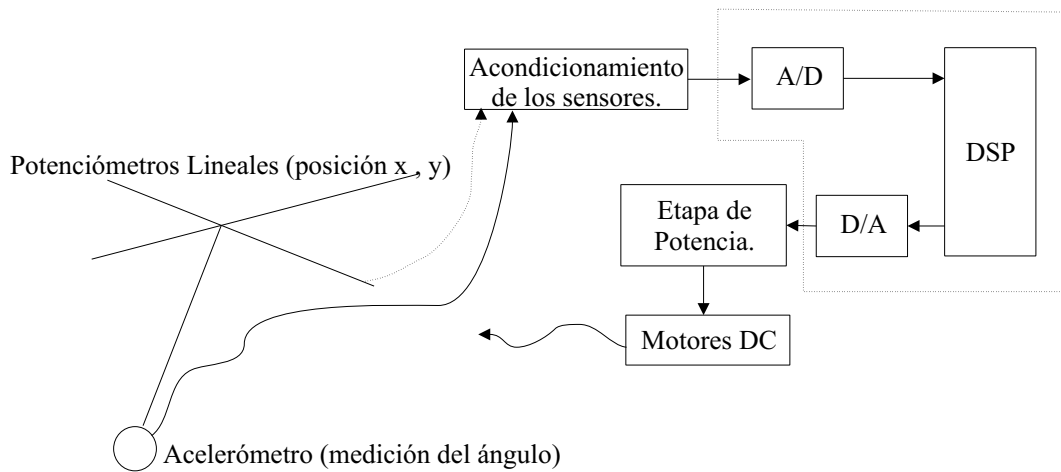


Figura 5.20. Sistema de control propuesto para un puente grúa.

tajas de usar un DSP es poder desarrollar las técnicas de control empleando un programa y con esto el ajuste de sus variables y manejo de punto flotante. La etapa de acondicionamiento de los sensores llevan a niveles de voltaje la entrada necesaria por el DSP, normalmente 0-5 [Volt]. La etapa de sensores se encuentra compuesta por un acelerómetro, que medirá el ángulo en el que se encuentra la carga (en un eje, se requerirá que la carga tenga un sólo movimiento en un eje); y los potenciómetros lineales darán al DSP la posición X, y Y de la carga, de esta manera corregirlo mediante la etapa de control de motores, dispositivos o amplificadores lineales que controlan el ancho del pulso (PWM) de los motores X y Y.■

## Capítulo 6

# Aplicación, Simulación 3D.

En este capítulo se explicará todo lo relacionado al software que se desarrolló para aplicar las técnicas de control estudiadas: *Input Shaping*, sin control y el sistema propuesto. Al hablar de simulación en 3D se deben tomar en cuenta cinco factores:

- El sistema operativo empleado.
- Las características del Hardware, en el cual se desarrolla la aplicación 3D.
- El motor del programa.
- Las librerías de diseño 3D, ya que hay muchas disponibles.
- La interface, interface física o la conexión entre el usuario y la simulación.

Cada una de las características anteriores son indispensables para el correcto funcionamiento de la simulación 3D. Se realizará una breve descripción del software diseñado para las pruebas y simulaciones de los diversos sistemas de control estudiados.

### 6.1. ¿Por qué el uso de un simulador en 3D?

Actualmente es muy difícil para el estudiante de pre y post grado realizar pruebas físicas de toda la teoría, por diversas situaciones; tales como el costo de los materiales y disponibilidad de un espacio físico para realizar dichas pruebas (Laboratorio), por lo que se hace indispensable recrear un mundo virtual, pero con ciertas características reales” (Modeladas a través de un conjunto de ecuaciones numéricas a partir de varios principios físicos fundamentales). Esto se aprecia en la ingeniería, la medicina, la física, en fin en el mundo científico, se pueden poner ejemplos muy particulares: simuladores de comportamiento humano, simuladores de crecimiento de población, el uso del software Matlab® para recrear situaciones físicas con soluciones de forma numérica ó matricial; el uso de el software PSPICE® para simulaciones de fenómenos eléctricos y electrónicos,



los más recientes Juegos Arcades con punto de vista en primera persona y ambiente tridimensional de un mundo idealizado (policías y ladrones, ser astronauta, construcción de su propia ciudad, comandar un regimiento), entre otros.

El mundo virtual proporciona seguridad en las pruebas, ya que todo el software esta en bits; con lo que se pueden diseñar complejos elementos y ponerlos a extremas situaciones, esto es económicamente óptimo puesto que no es necesario disponer de las estructuras reales para estudiar ciertos aspectos de su comportamiento físico ó químico.

El mundo virtual es un laboratorio muy económico, sobre todo en los años recientes, este permite diseñar, construir y poner en marcha sistemas muy complejos; aprender de ello y ponerlo en practica. Esto es la esencia del diseño óptimo en la ingeniería.

## 6.2. Sistemas Operativos.

A partir del año 1981. en que salió al mercado el primer sistema operativo, la forma de ver el computador digital cambió de manera radical, puesto que antes de esa fecha un computador era nétamente hardware, con complejas formas de programación y de escasos resultados. Pues a partir de esa fecha la manipulación del computador fue más fácil al usuario. En ese período, se desarrollaron muchos sistemas operativos prevaleciendo dos tipos: el sistema operativo gráfico o de ventana y el sistema operativo UNIX y cuya interface es un shell o línea de comando, desarrollado por los Laboratorios Bell para intercambio de información entre universidades. Para no ahondar en la historia de los sistemas operativos, se debe mencionar que en la actualidad el sistema operativo conocido como LINUX tiene raíces (el Kernel o núcleo) del UNIX.

El SO. Linux tiene muchas ventajas, entre las cuales se pueden citar: código fuente estable, esto es por la adecuada organización de sus archivos; posee niveles de seguridad muy altos en protocolos de red, producto de su diseño y características de su sistema de archivos; actualmente, amigable al usuario, ya que hace algunos años atrás este sistema era muy rústico en cuanto a la instalación y configuración, de ahí que en versiones posteriores se le han incorporado muchas características, de facilidad de manejo y mantenimiento, ventanas con configuraciones adaptables por el usuario; es de licencia libre, más concretamente de código abierto en consecuencia puede sufrir modificaciones hechas por el usuario en un 100 por ciento, entre otras cosas por supuesto posee desventajas entre las que se mencionan: de uso no común, la mayoría de las personas con PC prefieren adaptar el sistema operativo con interface gráfica; presenta pocos manejadores para configuración de hardware, al ser un sistema operativo en evolución no comercial, depende de muchas personas y estas en su mayoría no reciben remuneración por su trabajo, por lo que depende de donaciones de otros usuarios y de esta manera se alimenta; existe poca información de programación digerible de manera rápida, los usuarios ven este SO. muy difícil por su forma de trabajo.

De lo anterior se desprende el punto más importante que es un software de uso libre y de esta manera no posee licencia privada sino pública, que es uno de los beneficios que los usuarios y programadores de Linux buscan, lo que queda es aprender a usar las diversas herramientas. Partiendo del análisis económico, las Universidad públicas en su mayoría poseen presupuesto limitado para el desarrollo de proyectos de gran envergadura, por lo que un sistema operativo de licencia pública les viene como anillo al dedo.

De aquí parte la importancia del diseño de sistemas en Linux. El programa de simulación física **SP2F** que se desarrolló con la distribución Linux SUSE 9.2. y se realizaron diversas compilaciones de varios paquetes necesarios para implementar el ambiente de simulación.

### 6.3. Características del PC.

Para el desarrollo de la simulación necesaria en el trabajo que ocupa el trabajo de grado, se dispuso de un computador con un CPU AMD Athlon de 2GHz, Memoria RAM de 512 Mb, un Disco Duro de 40 Gb, El sistema operativo propiamente dicho con todas las librerías necesarias y el ambiente de programación o "IDE", una tarjeta gráfica de AGP de 32Mb y mucha paciencia.

### 6.4. Motor o Programa Base.

El motor que se aconseja usar tiene pocos años de uso y se denomina PyTHON. PyTHON es un lenguaje de muy alto nivel, complejidad y capacidad. Este esta orientado a objetos semejante al C++ pero con ciertas características de anidamiento y procesamiento que lo hacen ideal para la confección de Juegos, Simulaciones y otros tipos de programas. Posee un muy alta capacidad de procesamiento y organización de memoria que lo hacen muy cómodo. Por ultimo pertenece a los software tipo GNU o de licencia pública de uso libre. El programa de simulación esta desarrollado en este lenguaje de programación PyTHON de SUSE 9.2.

### 6.5. Librerías.

Para el desarrollo del programa de simulación se requirieron de 5 librería de tipo GNU, estas posee característica especiales y necesarias para el desarrollo de un simulador físico en 3D:

- ODE (Open Dynamics Engine). generador del mundo físico.
- PyODE. Librería para usarse en PyTHON. Conecta la anterior biblioteca al lenguaje empleado.
- OPENGL. Desarrollado por Silicon Graphics y posteriormente liberada es una librería de interface visual en 3D.
- PyOPENGL. Librería para desarrollo que conecta al lenguaje PyTHON.
- PyGAME. Librerías de desarrollo de juegos primordialmente aunque puede implementarse aplicaciones de otra indole.

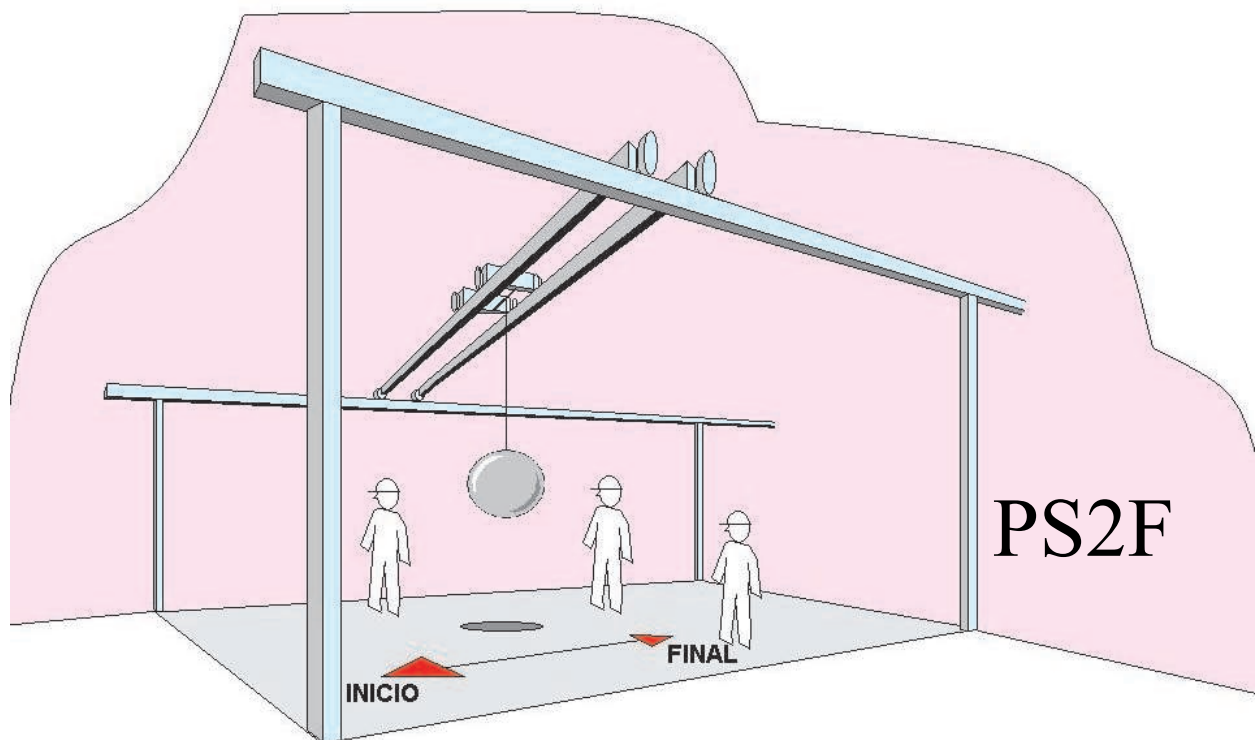


Figura 6.1. Grúa 3D.

## 6.6. Programa Desarrollado

El programa desarrollado es un mundo físico virtual en el cual pueden interactuar objetos de tres formas básicas: esferas, cajas y cilindros; los cuales poseen características de masa, centro de gravedad, gravedad, callback de choque (desarrollo *Ad Hoc*), densidades, fuerzas y uniones. Todo esto es posible por el uso de ODE que es un motor que posee una base de datos física en donde calcula numéricamente ecuaciones diferenciales para cada fotograma de un ciclo de simulación, en pocas palabras, corre una película en tiempo real con acción en teclado, joystick o mouse.

En este mundo virtual se encuentra diseñado un puente grúa, con todas sus características y una esfera que se sostiene de un cable que simula la carga a transportar de un punto a otro. Al tener características reales (Roce, densidad, masa, choque, inercia, uniones) se puede visualizar lo que realmente ocurriría en el mundo real dentro de los parámetros aproximados del modelo; sirviendo para el diseño y simulación de estructuras que el autor pudiese manipular y sobre todo para realizar experimentos y verificación de usos de sistemas de control, que nos interesa para este trabajo de grado.

En la figura (6.1) se muestra la interface visual que se ha denominado **PS2F** (Programa de Simulación Física), la cual muestra en perspectiva un puente grúa con 4 pilotes y dos cajas en movimiento que simulan el eje horizontal y el eje vertical del puente grúa. El eje y se deja para aumentar o disminuir el cable de la planta.

El software desarrollado en ODE y PyTHON puede tener muchas más aplicaciones, por ejemplo: simulación de Robots de diversas topologías, simulación de estructura civiles como paredes y edificios, efectos de terremotos, creación de juegos educativos, simulación de rebotes y caídas de estructuras (Es posible simular la caída de un puente).

El programa posee dos interface al usuario, la primera es el Mouse con este puede cambiar la vista al mundo virtual; y el teclado, con el cual se puede controlar la grúa y otro efectos del programa.■

## Capítulo 7

# Conclusiones y Recomendaciones.

A lo largo de este trabajo de grado se pudo estudiar y llevar a cabo una completa investigación en los sistemas de control clásicos y técnicas actuales de control en espera que con la utilización de mejores herramientas de análisis, en las cuales se tengan en cuenta datos físicos más precisos del modelo mecánico, se pueda lograr métodos de identificación que se puedan utilizar para el diseño de mejores aplicaciones de control (más eficientes, más rápidas, con menor consumo de energía).

La técnica del *Input Shaping* es un conjunto de técnicas que se emplean de manera regular en el área de la industria y la defensa, se puede mencionar aplicaciones reportadas en artículos especializados que van desde la agencia aero espacial norte americana NASA, con controles óptimos on-off (mediante la técnica de *Input Shaping*) diseñado para colocar satélites en orbita; controles de movimiento de nano robots sin vibraciones; y movimientos de estructura gigantescas en donde el sistema de control clásico se aplica en conjunto con esta técnica.

En el proyecto se estudiaron los problemas que surgen del modelado matemático, identificación y control de sistemas vibratorios. Para efectos del análisis del sistema, se tomaron los datos obtenidos de la simulación en Matlab del modelo matemático desarrollado. Los resultados obtenidos durante la simulación, sirvieron de referencia para el diseño del control con la técnica de *Input Shaping*.

A continuación se presenta de manera puntual las conclusiones obtenidas en el presente trabajo de grado:

- La técnica del *Input Shaping* es uno de las técnicas más indicadas para resolver un conjunto de problemas, en los cuales se desea una rápida acción, una respuesta de vibración mínima (según la forma diseñada), así como su incorporación del mismo como filtro de entrada en un sistema diseñado, ya que se emplea en lazo abierto.
- La técnica del *Input Shaping* en comparación con las técnicas clásicas de control es más robusta y flexible, esto según la forma de la señal de entrada que se halla diseñado, ZV, ZVD, ZVDD.
- La curva de sensibilidad de la técnica del *Input Shaping*, es una manera cuantitativa para la elección del tipo de sistema a emplear. La curva indica, por medio del ancho de sensibilidad, cuanto es el valor máximo de desajuste

---

que puede presentar una planta (en este caso el puente grúa) de vibraciones residuales que para un valor pre-establecido.

- Un sistema de control PD en conjunto con la técnica del *Input Shaping*, es ideal para controles de plantas en las cuales exista variación en sus parámetros.
- El uso del software de código abierto, (Linux, ODE, Python, OpenGL) es una de las herramientas indispensables, económica y óptima al momento de diseñar y poner en práctica un sistema de control.

Además se ha de mencionar que uno de los aportes de este trabajo de grado es el desarrollo de una interface gráfica de simulaciones físicas **PS2F** que se puede aplicar para otros tipos de problemas en la que la interacción con el modelo físico es importante. Otro aporte del presente trabajo de grado es el diseño de la plantilla para Tesis de Grado hecha en el programa  $\text{\LaTeX}$ (LyN y KILE) para LINUX, con los parámetros necesarios que cumple con la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la U.C.V. ■

# Referencias Bibliográficas

- [1] Belove, Charles y Paniagua B, F. (1990). Enciclopedia de la Electrónica Ingeniería y Técnica. In P. Basurto Samperio (Ed.), *3 y 5*, Chapter 4-5-7, pp. 593, 739, 875, 903. Paseo de Gracia, 26 - 08007 Barcelona - España: Grupo Editorial Oceano.
- [2] Kanneth N. G., Gordon G. Parker, R. D. R. F. L. (1999, Agosto). Swing-Free Cranes via Input Shaping of Operator Commands. *Sandia National Laboratories-OSTI*, 1–5.
- [3] Lau, Mark A. y Pao, L. Y. (2003, Enero). Input shaping and time-optimal control of flexible structures. *Elsevier Science Ltd.*, 894–899.
- [4] Mohamed, Z. and M. Tokhi (2001, Diciembre). Vibration control of a single-link flexible manipulator using command shaping techniques. *Journal of Systems and Control Engineering* (Part 1), 192–201.
- [5] Morales Palacios, O. (1986, septiembre). *Manual de conceptos basicos, Grúa Electricas Viajeras*. México: Hecules.
- N, S. M. (215, 2001). [6] *Input shaping for vibration-free positioning of flexible systems* (469-472 ed.). IMechE.
- [7] Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna* (3ra ed.). Prentice Hall, hispanoamericana, S.A.
- [8] Peláez. G, Pelaez. Gu, P. J. V. A. B. E. (2004, Septiembre). Input shping reference commands for trajectory following Cartesian machines. *ELSEVIER-Control Engineering Practice*, 941–948.
- [9] Sing, T., y. V. S. R. (1995). Robust time-delay control of multimode systems. *International Journal of Control*, 1319–1336.
- [10] Singer, N. C. (1989). Residual vibration reduction in computer controller machines. *MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical Report number AITR-1030*.
- [11] Singer, N.C., y. S. W. P. (1990). Presahping command inputs to reduce system vibration. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, 76–82.
- [12] Singer N., S. W. y. K. E. An input shaping controller eabling cranes to move without sway. *American Nuclear Society 7th Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, 2–10.

- [13] Singh, Tarunraj y Singhouse, W. Tutorial on Input Shaping/ Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures. Technical report, University of Buffalo, Georgia, Institute of Tecnology.
- [14] Singhose, W. E., S. W. y. S. N. C. (1994). Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs. *ASME Journal of Dynamics Systems Measurement and Control*, 116.
- [15] Singhose W. E., P. L. J. y. S. N. C. (1995). Vibration reduction using Multi-Hump Extra-Insensitive Input Shaper. *American Control Conference*, 1–5.
- [16] Smith, O. J. M. (1957, Septiembre). Postcast control of damped of damped oscillatory systems. *Proceeding of the IRE*, 1249–1255.
- [17] Y Noakes M.W., K. R. L. (1994). RECENT SIMULATION CONCLUSIONS FOR DAMPED-OSCILLATION. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Robotics and Manufacturing*, 14–20.



# Bibliografía.

## **Normas.**

Covenin (53.020/030) EQUIPOS DE ELEVACIÓN / EQUIPOS DE MANTENCIÓN PARA MATERIALES. Determinación de su contenido y selección de los términos de indización.- Caracas: Comisión Venezolana de Normas Industriales.

## **Libros.**

Belove, Charles y Paniagua B, Francisco., Enciclopedia de la Electrónica Ingeniería y Técnica. Grupo Editorial Océano. Paseo de Gracia, 26 - 08007 Barcelona - España, 3 y 5, 1990.

Brown, James Ward and Churchill, Ruel V. Variable Compleja y Aplicaciones. Madrid, España. Editorial McGraw-Hill. 2004. 7ma Edición.

Duncan. A. J. Quality Control and Industrial Statistic, Editorial Irwin, Homewood, USA. Illinois, 4ta Edición.

Kopka, Helmut and Daly, Patrick W. A guide to LATEX: document preparation for beginner and advanced users. Harlow, England. Editorial Addison-Wesley., 1997.

Kuo B. C., Automatic Control Systems, Editorial Mc Graw-Hill, Nueva York, 2ra Edición.

Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de control moderna. México. Editorial Prentice Hall, hispanoamericana, S.A., 1998, 3ra Edición.

Morales Palacios, Otto. Manual de conceptos basicos, Grúa Electricas Viajeras. México. Editores Hecules, 1986.

Smith, O. J. M. Feedback control systems. USA New York. Editorial McGraw-Hill Book Company. Inc., 1958.

Wagner. H. M. Wagener, Principles of Oeprations Research, Editorial Prentice Hall, New York, Englewood Cliffs.

## **Internet.**

Página de ODE. [www.ode.org](http://www.ode.org)

Página de PYTHON. [www.python.org](http://www.python.org)

Página de Linux. [www.freelinux.com](http://www.freelinux.com)

Página de Información. [www.elprisma.com](http://www.elprisma.com)

Página de Download Linux. [www.sololinux.com](http://www.sololinux.com)

Página de Biblioteca Virtual UCV. [www.imeche.com](http://www.imeche.com)

Página de Biblioteca Virtual UCV. [www.idealibrary.com](http://www.idealibrary.com)

Página de Biblioteca Virtual UCV. [www.ieee.org](http://www.ieee.org)

Página de Biblioteca Virtual UCV. ELSEVIER/Control Engineering Practice Revistas

Journal of Sound and Vibration (2001) 243(1), 157-171.

Journal of Sound and Vibration (2000) 220, 11-50.

E.I. Jury y T Pavlisis, IEEE Trans. Autom. Contr. AC-8:210-217.

## Anexo A

### Definiciones.

**Grúa:** es un conjunto de mecanismos combinados armónicamente, que reciben una energía definida para transformarla en trabajo. Esto significa que la grúa es una máquina que utilizando la energía humana, en el caso de las grúas manuales, o la energía eléctrica, en este caso, es capaz de realizar diferentes tipos de trabajos, tales como subir, bajar, rotar, así como desplazar cargas diversas. Esta es una posible solución integral a un problema específico de manejo de materiales. La mayoría de estas definiciones fueron sacadas del manual de ([5] Morales. 1986).

la función de una grúa es para el manejo de materiales de muy diversos tipos, en forma segura y eficiente. Existe un diseño específico para cada tipo de operación y material. El máximo rendimiento de una grúa se obtiene cuando su selección y aplicación se hace en base a un ciclo de operación debidamente analizado y determinado.

*Abertura del carro:* Distancia entre centro de las ruedas del carro o bien, distancia horizontal entre los centros de rieles del carro, las cuales deben ser iguales.

*Abertura del puente:* Distancia entre centro de ruedas del cabezal del puente. Para puente con cabezales independientes será la distancia entre centro de las ruedas extremas en cada cabezal.

*Acercamiento del Gancho:* Distancia mínima horizontal entre el centro del riel de la trabe carril y el centro del gancho.

*Amortiguador:* Son dispositivos de seguridad y sirven para reducir el impacto de la grúa al chocar contra los topes o bien dos grúas o doca carros al chocar entre sí.

*Bastidor del carro:* La estructura básica del carro, donde se instalan los dispositivos para levantamiento de la carga y los mecanismos propios de traslación.

*Cabina:* Es la parte de la grúa que sirve para alojar al operador y a los controladores maestros; la cual puede instalarse suspendida de las traveses del puente o bien del bastidor del carro.

*Cable de carga:* Es un cable de acero que sirve para soportar la carga. Este cable se devana a través de un sistema formado por: el tambor, el aparejo inferior y el aparejo superior.

*Capacidad nominal:* Es el rango máximo de carga que debe manejar la grúa con seguridad y para el cual fue diseñada.

*Carga demasiado pesada:* Se le llama así a una carga mayor que la carga máxima para la que se fabricó la grúa y por lo tanto, es capaz de vencer el

mecanismo de elevación de la grúa y de ahí que esta carga no pueda ser manejada por la grúa en forma satisfactoria y con seguridad.

*Cargas muertas:* Las cargas sobre una estructura que permanecen en posición fija con relación a la estructura misma, las cargas muertas en una grúa las forman el peso de las traveses del puente, pasarelas, flechas de transmisión, soportes, motores y dispositivos que proporcionan el movimiento, tableros de control, cabina y cualquier otro componente fijo a la estructura de la grúa.

*Cargas vivas:* Las cargas que tienen movimientos relativos con respecto a la estructura de que se trate.

*Carro:* Es la parte de la grúa en donde van instalados los mecanismos de elevación para manejar la carga.

*Controlador maestro:* Unidad integral operada manualmente, que sirve para gobernar la operación de contactores, relevadores y dispositivos auxiliares de un tablero de control.

*Estación de botones:* Dispositivo integrado con botones, operados manualmente, que sirve para gobernar el funcionamiento de un tablero de control y/o equipos eléctricos auxiliares en una grúa.

*Gancho:* Es el dispositivo sobre el cual se soporta directamente la carga o los accesorios para manejar la misma.

*Grúa eléctrica:* Es aquella grúa controlada por un operados que no se encuentra en la cabina o plataforma de la grúa ni lo hace a través de conexión directa con cables eléctricos.

*Izaje:* Se entenderá la distancia libre vertical que debe recorrer el gancho.

*Movimiento longitudinal:* Se aplicará al movimiento del puente a lo largo de la nave.

*Movimiento transversal:* Se aplicará al movimiento del carro a lo largo de la nave.

*Movimiento de elevación:* Se aplicará al movimiento del gancho, debiéndose hacer la aclaración si es en el sentido de subida o bajada.

*Par del motor:* Es la habilidad del motor de ejercer fuerza al girar sobre su propio eje, para efectuar un trabajo.

*Polipasto:* Se entiende como un dispositivo para elevación de cargas, cuyos componentes forman una unidad compacta incluyendo su armazón estructural.

*Riel:* Se entenderá por el riel de la vía de rodamiento de las ruedas del puente o del carro.

*Sistema de Transmisión:* conjunto de partes mecánicas y eléctricas necesarias para transmitir potencia y accionamiento a los diferentes movimientos de la grúa (motor y freno, reductores de velocidad, flechas, acoples y chumaceras).

En general, este elemento sirve para el manejo de carga, principalmente en espacios limitados; ya que no disminuye las áreas útiles de trabajo; en otras palabras, permite mantener libre el área de trabajo durante las operaciones de transporte de materiales. Se muestra en la figura 2.1 la forma física de un puente grúa típico.

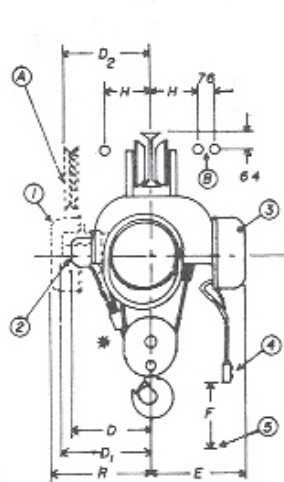
Anexo B

Planos y figuras de Puentes  
Grúas.

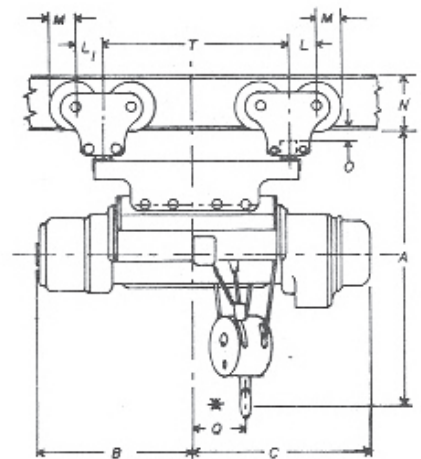
- Ⓐ Cadena para carro engranado
- Ⓑ Alimentadores
- ① Para polipastos con tablero de control de velocidad variable
- ② Interruptor límite engranado, cuando se solicite.
- ③ Tablero de control
- ④ Estación de botones
- ⑤ Nivel de piso de operación

\*Posición más alta del gancho con carga y el interruptor límite de contrapeso operado

Nota: Las dimensiones anotadas (en mm) son tan precisas como sea posible. Sólo para casos en que los librajes sean críticos se deberá solicitar dibujo certificado



Diámetro de rueda  
Radio mín. de giro  
Levantamiento



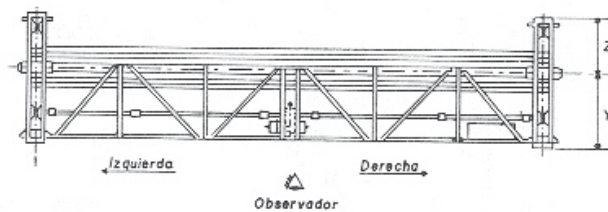
La dimensión Q se debe dar para la posición más baja y más alta del gancho.

### DIMENSIONES DEL POLIPASTO (Las debe proporcionar el fabricante)

Nota.- Las dimensiones en mm de la grúa son responsabilidad del fabricante. El dibujo de librajes lo proporciona el fabricante.

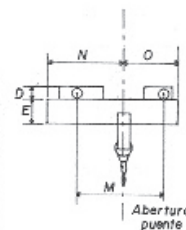
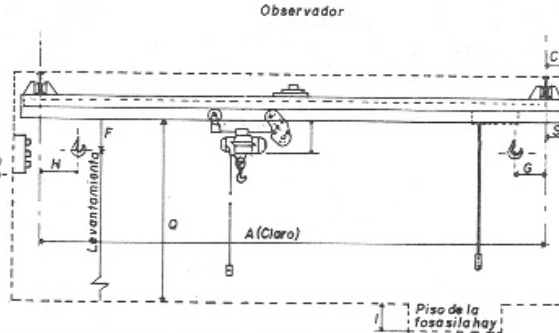


Indicar Orientación



Viga del puente

Indicar localización y tipo de alimentadores principales.



### CROQUIS DE LIBRAJES PARA GRUA COLGADA EQUIPADA CON POLIPASTO

Figura B.1. Dimensiones de polipasto y puente grúa.

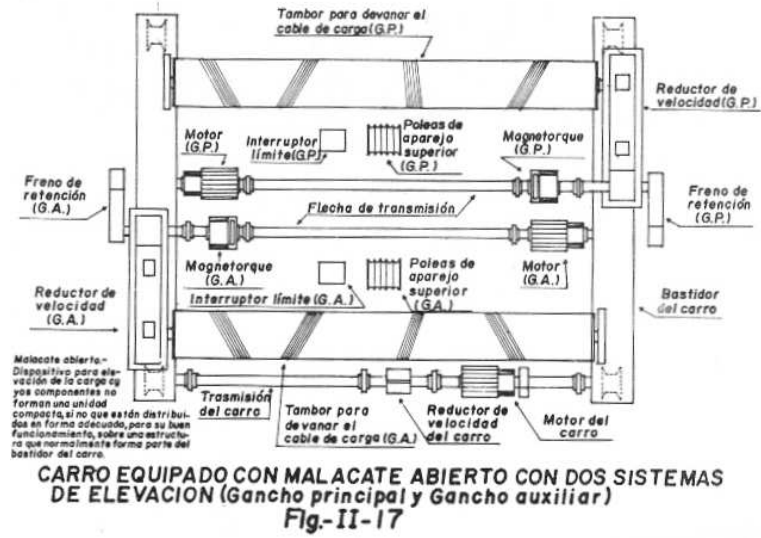


Figura B.2. Modelo de un carro para polipasto y puente grúa.

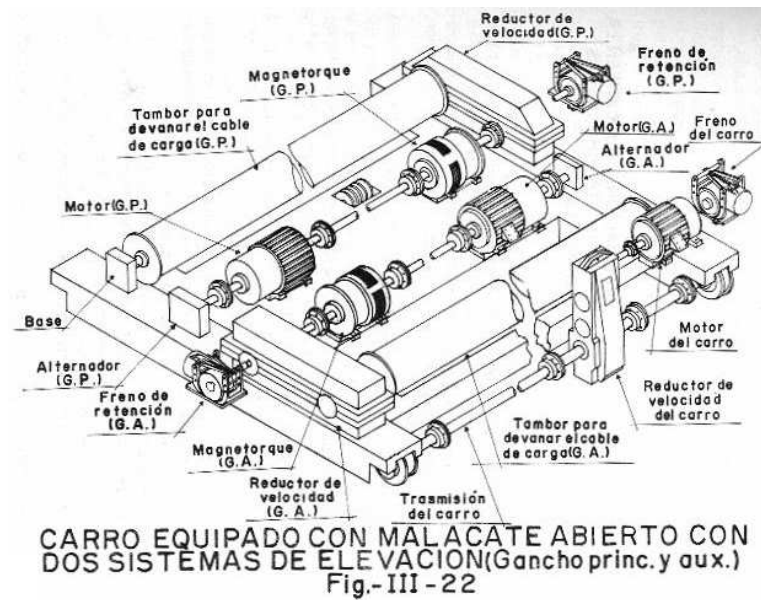
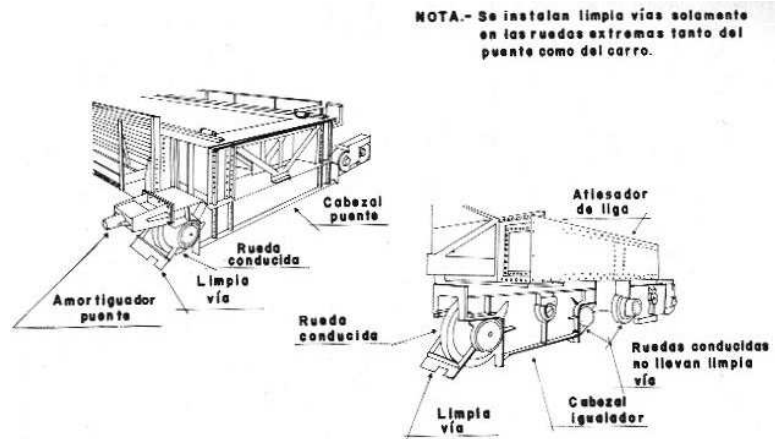


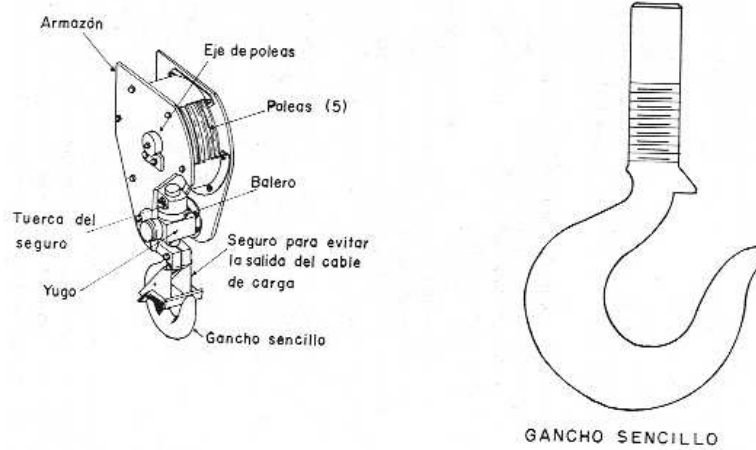
Figura B.3. Modelo de un carro para polipasto y puente grúa.



LIMPIAVIAS, AMORTIGUADORES Y RUEDAS CONDU-  
CIDAS DEL PUENTE

Fig. III- 23

Figura B.4. Limpiavias, amortiguadores y ruedas.

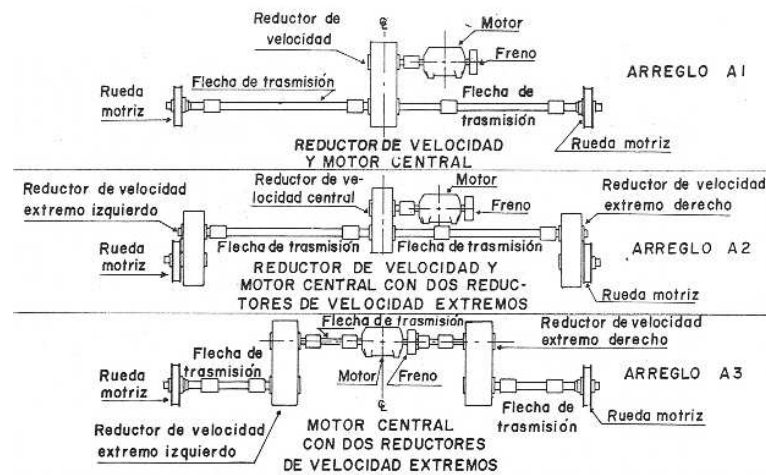


APAREJO INFERIOR

Fig. III- 24

Figura B.5. Ganchos para polipasto y puente grúa.

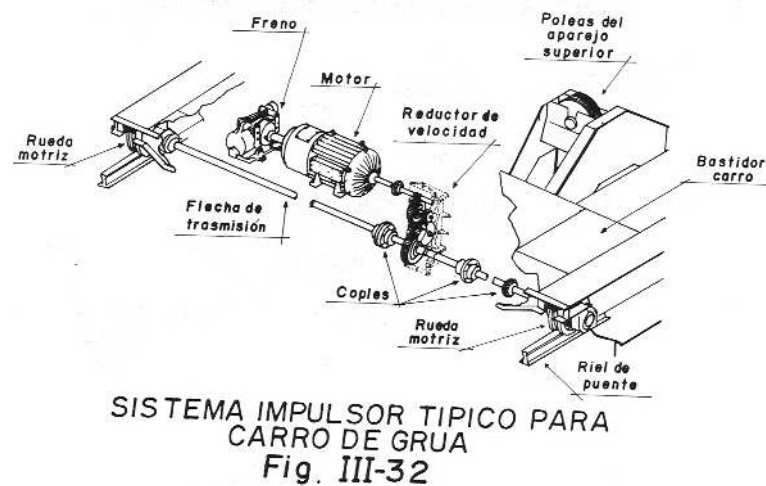




ARREGLOS MAS COMUNTE USADOS EN SISTEMAS IMPULSORES PARA PUNTES DE GRUAS ELECTRICAS VIAJERAS

Fig. III-26

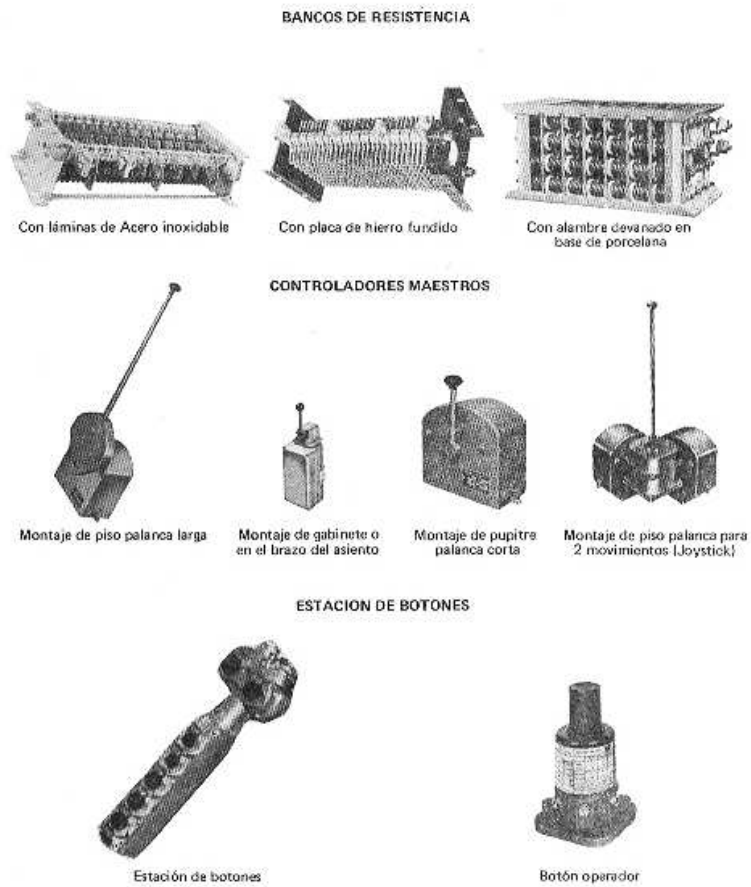
Figura B.6. Arreglos comunes para impulsores en puentes grúas.



SISTEMA IMPULSOR TIPICO PARA CARRO DE GRUA

Fig. III-32

Figura B.7. sistema impulsor típico para puente grúa.



**Fig. III-34**

Figura B.8. Botonería usada en polipasto y puente grúa.

# Índice Alfabético

- Input Shaping*, 18
- Adaptativo, 17
- Características del PC, 55
- Compensador, 16
- Control
  - Control abierto, 13
  - Control cerrado, 13
  - Control mixto, 14
- Control Óptimo, 18
- Controladores PD, 14
- Controladores PID, 14
- COVENIN 53.020, 8
- Curva de sensibilidad
  - ZV, 36
- Desarrollo analítico, 28
- Descripción de la Grúa, 11
- DSP, 50
- Elementos de la Grúa
  - Eléctricos, 8
  - Estructurales, 5
  - Mecánicos, 7
- Filtros
  - Butterworth, 18
  - Chebyshev, 18
  - Elipticos, 18
  - FIR, 18
  - IIR, 18
- Grúa
  - Abertura del carro, 64
  - Abertura del puente, 64
  - Acercamiento del gancho, 64
  - Amortiguador, 64
  - Bastidor del carro, 64
  - Cabina, 64
  - Cable de carga, 64
  - Capacidad nominal, 64
  - Carga demasiado pesada, 64
  - Cargas muertas, 65
  - Cargas vivas, 65
  - Carro, 65
  - Controlador maestro, 65
  - Estación de botones, 65
  - Gancho, 65
  - Grúa eléctrica, 65
  - Izaje, 65
  - Movimiento de elevación, 65
  - Movimiento longitudinal, 65
  - Movimiento transversal, 65
  - Par del motor, 65
  - Polipasto, 65
  - Riel, 65
  - Sistema de Transmisión, 65
  - Elementos, 10
  - Función de la grúa, 64
- Input Shaping
  - Demostración, 23
  - Importancia, 21
  - posicast, 21
  - Sumatoria igual a 1, 23
- Input shaping
  - Resultados, 39
- LGR, 16
- Linux, 54
- LNS, 5
- Moldeado de Entrada
  - N=2, 33
  - N=3, 34
  - N=4, 34
- Normas, 8
- ODE, 2, 55
- OPENGL, 55

- ORNL, 5
- Parámetros de una grúa, 10
- Planta
  - Características físicas, 32
  - Función de Transferencia, 31
  - Matriz controlable, 32
- Polipastos , *véase* Grúa, Elementos
- Practica
  - Control, 32
- Proposición del control, 46
- Proposición del control electrónico, 50
- PyGAME, 55
- PyODE, 55
- PyOPENGL, 55
- PyTHON, 2
- Python, 55
- Respuesta del sistema
  - Entrada escalón, 21
  - Entrada Input Shaping, 21
  - Entrada rampa, 21
- Resultados
  - ZV, 42
  - ZVD, 42
  - ZVDD, 46
- Simulación 3D
  - ¿Por qué?, 53
- Sintonización del PID, 15
- Sistemas de Control
  - Lazo Abierto, 12
  - Lazo Cerrado, 12
  - Mixtos, 12
- Valores de impulsos
  - N=2, 35
  - N=3, 35
  - N=4, 36
- Variables de Estados, 18
- Vibración Residual
  - Ecuación, 33
- Ziegler-Nichols, 15
  - método 1, 15
- ZV, 25
  - Vibración cero, 25