



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CONTROL UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS PARA LA CENTRAL AGOYÁN**

**HERNÁN ANDRÉS RAMOS CORDERO**

Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

## **MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Riobamba – Ecuador

Abril 2017



## ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

### CERTIFICACIÓN

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: “DISEÑO DE UN ALGORITMO DE CONTROL UTILIZANDO REDES INALÁMBRICAS PARA LA CENTRAL AGOYÁN”, de responsabilidad del Ing. Hernán Andrés Ramos Cordero ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

ING. WILSON ZUÑIGA VINUEZA; M.Sc.

**PRESIDENTE**

\_\_\_\_\_

FIRMA

ING. DARÍO MENDOZA CHIPANTASI; M.Sc.

**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_

FIRMA

ING. ANDRÉS GORDÓN GARCÉS; M.Sc.

**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_

FIRMA

ING. PATRICIA CONSTANTE PRÓCEL; M.Sc.

**MIEMBRO**

\_\_\_\_\_

FIRMA

Riobamba, abril - 2017

## DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Hernán Andrés Ramos Cordero, declaro soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

HERNÁN ANDRÉS RAMOS CORDERO

FIRMA

N° Cédula: 180453039-0

## DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Hernán Andrés Ramos Cordero, declaro que el presente **Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo**, es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Proyecto de Investigación de Maestría.

Riobamba, abril de 2017

---

HERNÁN ANDRÉS RAMOS CORDERO

FIRMA

Nº Cédula: 180453039-0

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a Dios, a mi familia y amigos que estuvieron apoyándome en todo momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, a mi familia y mis amigos por su colaboración en el desarrollo de este proyecto.

Hernán

## ÍNDICE

PORTADA .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
DERECHOS INTELECTUALES.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
ÍNDICE .....	vii
LISTA DE TABLAS .....	x
LISTA DE GRÁFICOS .....	xi
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY .....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Formulación del Problema .....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. Objetivo general. ....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Hipótesis.....	4
1.4.1. Hipótesis Nula .....	4
1.4.2. Hipótesis Alternativa.....	5
1.5. Diseño de Investigación .....	5
1.5.1. Modalidad de la investigación.....	5
1.5.2. Desarrollo del Proyecto.....	5
1.6. Matriz de consistencia.....	6
1.7. Introducción .....	8
CAPÍTULO II .....	9
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1. Modelamiento Matemático .....	9
2.1.1. Representación Matemática de elementos .....	10
2.1.2. Herramientas Computacionales.....	11
2.2. Funciones de Transferencia.....	12
2.2.1. Funciones de Transferencia de un Sistema Eléctrico.....	13
2.2.2. Funciones de Transferencia de un Sistema Mecánico .....	14
2.2.3. Diagramas de Bloques.....	15
2.3. Controladores Industriales.....	17
2.3.1. Tipos de controladores por retroalimentación.....	17

2.3.2.	Controlador Proporcional (P) .....	18
2.3.3.	Controlador Proporcional Integral (PI) .....	18
2.3.4.	Controlador Proporcional Derivativo (PD) .....	19
2.3.5.	Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) .....	20
2.4.	Redes de Comunicación .....	21
2.4.1.	Dirección MAC .....	21
2.4.2.	Dirección IP .....	22
2.4.3.	Medios de Comunicación Compartidos .....	22
2.4.4.	Tecnología Ethernet .....	23
2.5.	Redes Inalámbricas .....	23

CAPÍTULO III.....27

3.	DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL Y SELECCIÓN DE EQUIPOS .....	27
3.1.	Modelo matemático del Puente Grúa .....	27
3.1.1.	Representación del ángulo de pandeo del gancho del puente grúa .....	30
3.1.2.	Desplazamiento del carro del puente grúa. ....	32
3.2.	Controlador para carro del puente grúa.....	33
3.2.1.	Función de transferencia a lazo abierto del carro del puente grúa .....	35
3.2.2.	Diseño del regulador del carro del puente grúa.....	39
3.2.3.	Control Proporcional ( $K_p$ ) .....	40
3.2.4.	Controlador Proporcional Derivativo $PD = kPD(s + a)$ .....	42
3.2.5.	Controlador Proporcional Integral $PI = kPI(s + b)s$ .....	43
3.2.6.	Control Proporcional Integral Derivativo $PID = kPI(s + b)(s + a)s$ .....	43
3.3.	Controlador para Gancho 150T.....	43
3.3.1.	Función de transferencia a lazo abierto del gancho de 150T .....	45
3.3.2.	Diseño del regulador del gancho de 150T.....	48
3.3.3.	Control proporcional ( $K_p$ ).....	49
3.3.4.	Controlador Proporcional Derivativo $PD = kPD(s + a)$ .....	50
3.3.5.	Controlador Proporcional Integral ( $PI = kPI(s + b)s$ ).....	51
3.3.6.	Controlador Proporcional Integral Derivativo $PID = kPI(s + b)(s + a)s$ .....	52
3.4.	Controlador para Gancho Auxiliar 15T .....	52
3.4.1.	Función de transferencia a Lazo Abierto para Gancho 15T.....	54
3.4.2.	Diseño del regulador del gancho de 15T.....	56
3.4.3.	Control Proporcional ( $K_p$ ) .....	57
3.4.4.	Controlador Proporcional Derivativo $PD = kPD(s + a)$ .....	58
3.4.5.	Controlador Proporcional Integral ( $PI = kPI(s + b)s$ ).....	60
3.4.6.	Controlador Proporcional Integral Derivativo $PID = kPI(s + b)(s + a)s$ .....	60
3.5.	Diseño de la Red Inalámbrica .....	60

CAPÍTULO IV.....64

4.	SIMULACIÓN Y RESULTADOS .....	64
----	-------------------------------	----



4.1.	Simulación del Controlador .....	64
4.1.1.	Controlador del Carro Testero del Puente Grúa.....	64
4.1.2.	Controlador del Gancho de 150T .....	69
4.1.3.	Controlador del Gancho de 15T .....	73
4.2.	Resultados de Diseño de la Red Inalámbrica .....	78
4.2.1.	Análisis de la señal transmitida.....	78
4.2.2.	Cobertura de la señal .....	79
4.2.3.	Selección de Equipos Inalámbricos.....	81
4.3.	Comprobación de Hipótesis .....	81

CONCLUSIONES .....	84
--------------------	----

RECOMENDACIONES .....	87
-----------------------	----

## BIBLIOGRAFÍA

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Aspectos Específicos .....	6
Tabla 2-1: Aspectos Generales.....	7
Tabla 1-4: Valores obtenidos de la simulación de los sistemas .....	77
Tabla 2-4: Tipos de señal dependiendo del valor de SNR .....	78
Tabla 3-4: Cálculo de la Correlación de Pearson.....	82

## LISTA DE GRÁFICOS

Figura 1-2:	Función de Transferencia .....	12
Figura 2-2:	Tabla de relaciones de elementos eléctricos.....	13
Figura 3-2:	Tabla de relaciones para sistemas mecánicos traslacionales .....	14
Figura 4-2:	Tabla de relaciones para sistemas mecánicos rotacionales .....	15
Figura 5-2:	Diagrama de Bloques en lazo cerrado.....	16
Figura 6-2:	Diagrama de Bloques en lazo abierto.....	17
Figura 7-2:	Diagrama de Bloques de un Controlador Proporcional.....	18
Figura 8-2:	Control Proporcional Integral.....	19
Figura 9-2:	Control Proporcional Derivativo .....	19
Figura 10-2:	Control Proporcional Integral Derivativo.....	20
Figura 11-2:	Red de Comunicación .....	21
Figura 12-2:	Tecnología Ethernet .....	23
Figura 13-2:	Red Inalámbrica .....	24
Figura 1-3:	Representación física del carro del puente grúa.....	27
Figura 2-3:	Representación física del gancho de 150T .....	28
Figura 3-3:	Diagrama de control del ángulo de pandeo del gancho del puente grúa .....	31
Figura 4-3:	Diagrama de control del ángulo de desplazamiento del carro del puente grúa ....	32
Figura 5-3:	Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia.....	36
Figura 6-3:	Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros .....	37
Figura 7-3:	Representación de los ángulos de llegada de los ceros desde los polos .....	38
Figura 8-3:	Representación de los polos y ceros del sistema.....	39
Figura 9-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional .....	41
Figura 10-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo .....	42
Figura 11-3:	Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia.....	46
Figura 12-3:	Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros .....	47
Figura 13-3:	Representación de los polos y ceros del sistema.....	48
Figura 14-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional .....	49
Figura 15-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo .....	51
Figura 16-3:	Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia.....	54
Figura 17-3:	Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros .....	55
Figura 18-3:	Representación de los polos y ceros del sistema.....	56
Figura 19-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional .....	58
Figura 20-3:	Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo .....	59
Figura 21-3:	Distribución de los equipos de la red inalámbrica .....	61
Figura 1-4:	Lugar geométrico de las raíces.....	65
Figura 2-4:	Comportamiento del sistema ante una entrada impulso .....	66
Figura 3-4:	Simulación del Controlador Proporcional.....	67
Figura 4-4:	Simulación del Controlador Proporcional Derivativo.....	68
Figura 5-4:	Simulación del Control Proporcional Integral Derivativo.....	69
Figura 6-4:	Lugar geométrico de las raíces.....	70
Figura 7-4:	Comportamiento del sistema ante una entrada impulso .....	71
Figura 8-4:	Simulación del Controlador Proporcional.....	71
Figura 9-4:	Simulación del Controlador Proporcional Derivativo.....	72
Figura 10-4:	Simulación del Control Proporcional Integral Derivativo.....	73
Figura 11-4:	Lugar geométrico de las raíces.....	74
Figura 12-4:	Comportamiento del sistema ante una entrada impulso .....	75
Figura 13-4:	Simulación Controlador Proporcional.....	76
Figura 14-4:	Simulación Controlador Proporcional Derivativo.....	76
Figura 15-4:	Simulación del Controlador Proporcional Integral Derivativo .....	77

Figura 16-4:	Área de Cobertura de la Red Inalámbrica .....	79
Figura 17-4:	Área de cobertura del SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2 .....	80
Figura 18-4:	Comprobación Gráfica de la Correlación de Pearson .....	83

## RESUMEN

El diseño de un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para la central Agoyán ubicada en el cantón Baños de la provincia Tungurahua. Mediante el método experimental se simula el algoritmo de control usando software matemático para comprobar que el controlador sea eficaz y se adapte a las condiciones físicas mejorando los movimientos actuales de la máquina; en el caso del carro testero mejora el tiempo de establecimiento a  $1.99 \times 10^5$  seg, los ganchos de 150 y 15T se mejora en  $7.09 \times 10^7$  seg y  $1.62 \times 10^7$  seg respectivamente. Como medio de transmisión de la señal de control se propone una red inalámbrica con equipos que sean instalados en piso principal, cubriendo el área de  $40 \times 17$  m que es la superficie de trabajo del puente grúa que se ubica a una altura de 5m. Por las perturbaciones existentes se presenta el estudio de la afectación sobre la señal de la red inalámbrica obteniendo como resultado un valor de 17.258 dB. El controlador mejora la precisión de los movimientos en las maniobras de transporte, montaje y desmontaje de las unidades generadoras de electricidad. Se recomienda a los técnicos calibrar del controlador cuando se instalen los equipos debido a que es necesaria las pruebas físicas.

### Palabras Claves:

<ALGORITMO DE CONTROL> <SOFTWARE MATEMÁTICO> <RED INALÁMBRICA>  
<AFECTACIÓN SOBRE LA SEÑAL> <CONTROLADOR> <SISTEMAS DE CONTROL>  
<BAÑOS (CANTÓN)>

## SUMMARY

The design of a control algorithm using wireless networks was made for the Agoyán plant located in the Baños canton of Tungurahua province. The control algorithm is simulated by means of the experimental method, using mathematical software to verify that the controller is efficient and adapts to the physical conditions improving the current movements of the machine. The short headroom trolley improves set-up time to  $1.99 \times 10^5$  sec, the crane hooks of 150 and 15T are improved by  $7.09 \times 10^7$  sec and  $1.62 \times 10^7$  sec respectively. A wireless network as a means of transmission of the control signal is proposed with equipment that is installed on the main floor, covering the area of  $40 \times 17$  m which is the working surface of the crane bridge located at a height of 5m. The study of the effect on the signal of the wireless network is presented, due to the existing disturbances resulting in a value of 17.258 dB. The controller improves the precision of the movements in the transport, assembly and disassembly of the generating units of electricity. It is recommended that technicians calibrate the controller when equipment is installed because physical evidence is required.

### Key Words:

<CONTROL ALGORITHM> <MATHEMATICAL SOFTWARE> <WIRELESS NETWORK> <SIGNAL AFFECTION> <CONTROLLER> <CONTROL SYSTEMS> <BAÑOS (CANTON)>

# CAPÍTULO I

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Formulación del Problema

En la ciudad de Baños de Agua Santa Km 6 de la provincia de Tungurahua se encuentra ubicada la Central Hidroeléctrica Agoyán. La central de generación eléctrica consta de las siguientes instalaciones:

- Edificio de control (CONTROL BUILDING): Aloja las estaciones de control del sistema SCADA y los tableros de control, en donde se encuentran los operadores que se encargan de la monitorización del funcionamiento de las unidades generadoras.
- Casa de máquinas (POWER HOUSE): es la ubicación de donde se encuentran todos los dispositivos eléctricos, electrónicos y los elementos mecánicos que forman parte de las unidades generadoras. Son 2 unidades generadoras, las mismas aportan al país 156MW, es decir, 78MW por unidad.
- Presa: o también llamado embalse, es el contenedor temporal del agua del río Pastaza, cuyo caudal mínimo es de 60 m<sup>3</sup>/h suficiente para poder mantener en funcionamiento 1 unidad generadora.
- Cámara de interconexión: el agua que es usada por la Central Agoyán es conducida a través de una cámara que conecta con el túnel de interconexión de 11km de longitud hacia la Central Hidroeléctrica San Francisco; de esta manera se crea una generación en cascada con las 2 centrales.

En casa de máquinas de la central existen varios sistemas que son necesarios para mantener el correcto funcionamiento de las unidades generadoras, entre ellos se encuentra el sistema de izaje y transporte usado para mover los equipos y elementos que conforman los generadores eléctricos.

El sistema de izaje y transporte constan de 3 equipos:

- un puente grúa ubicado en el piso principal de casa de máquinas

- un carro transportador
- un pórtico grúa ubicado en las afueras de la caverna en el piso de maniobras.

El carro transportador es el encargado de transportar las partes industriales y equipos desde el piso principal de casa de máquinas hacia el nicho de cables en donde el pórtico grúa se encarga de trasladar los elementos de casa de máquinas hacia el exterior y viceversa.

El puente grúa cuenta con 2 carros testeros con la capacidad de 15 y 150 toneladas respectivamente, usados para el transporte de equipos y segmentos pesados, así como para el montaje y desmontaje de las unidades generadoras por parte del personal de mantenimiento para cambio de piezas mecánicas, inspección, ajuste y mediciones manteniéndola en óptimas condiciones.

Los ganchos colocados en los carros testeros tienen una longitud máxima de 70m que es lo necesario para transportar los elementos y equipos al piso de válvulas, el cuál es el último piso que constituye casa de máquinas.

La precisión que se debe tenerse en el montaje es alta, debido a que la máquina debe estar alineada y balanceada, evitando cualquier colapso o choque de las partes de la turbina en el momento que empiece a girar y generar electricidad.

La manipulación del puente se lo hace de dos maneras, la primera es por medio de una botonera que se encuentra colgada a una distancia accesible al operador, ésta botonera se conecta directamente a los tableros de control para el movimiento del puente grúa. La segunda forma es por medio de una cabina de control local en la que se sitúa el operador para poder realizar las maniobras que le ordene el personal que se encuentre en la parte baja.

## **1.2. Justificación**

La evolución de las técnicas de control hace posible que se establezcan y se mejoren los sistemas reduciendo a un valor mínimo el error existente en todos los procesos. La evolución de la tecnología en el área de control ha ocasionado que se desarrollen nuevos equipos que se acoplen



a las necesidades de los procesos industriales aumentando su rendimiento, precisión y su robustez ante perturbaciones.

Los procesos de la globalización y el desarrollo de nuevas tecnologías de control comunicación, han desencadenado una revolución en las empresas hidroeléctricas actuales debido a la exigencia para que los procesos de automatización sean eficientes en su operación, bajos en costos y a su vez devengan aumentos de productividad en horas laborales y disminución de los tiempos de parada.

Los equipos actuales utilizados en el control de procesos hacen posible que no se reemplace el sistema por completo, simplemente una actualización menor para mejorar su rendimiento e incrementar su eficiencia. Conforme se actualizan los sistemas se minimizan los errores, reduciendo los tiempos de parada de los equipos incrementando su productividad que, en este caso, es la disponibilidad que se tiene después de mantenimiento.

La Hidroeléctrica Agoyán, cuenta con tecnología de hace 25 años dentro de las cuales uno de sus sistemas implementados con control electromecánico es el de izaje y transporte en el que se encuentra el puente grúa. El control electromecánico implementado en el puente grúa ocasiona picos de voltaje por los cambios violentos de tensión para el control del proceso, trayendo como consecuencia costos de producción más elevados por el consumo de energía y el mantenimiento de los equipos. El control on-off hace que los movimientos del puente sean bruscos, siendo necesaria la habilidad de los técnicos operarios para realizar su trabajo con eficiencia.

Dentro de la planificación estratégica de talento humano podemos entrever que, en el plan de capacitación propuesto al personal encargado del mantenimiento y operación, contempla el uso de tecnologías actuales, lo que no representa un avance significativo ni mejora la productividad del talento humano debido a que las mismas se centran en tecnologías de vanguardia mientras que, la tecnología estándar de la Central Hidroagoyán posee 25 años de servicio.

Es en este orden de ideas la necesidad y urgencia de establecer un controlador para mejorar la precisión de los movimientos del puente grúa utilizando como medio de transmisión una red inalámbrica que cubra el área de trabajo del puente grúa; lo cual incrementa la eficiencia operativa disminuyendo los picos de voltaje y los movimientos bruscos del puente.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo general.***

- Diseñar un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa con el Carro Testero de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN.

#### ***1.3.2. Objetivos específicos.***

- Diseñar un algoritmo de control para el puente grúa y el carro testero que permita integrar el control conjunto de ambos equipos.
- Simular el algoritmo de control usando software matemático para comprobar la respuesta del sistema ante una señal de entrada.
- Estudiar la cobertura de la red inalámbricas para dotar al operador del puente grúa y del transportador un mayor radio de operación de los dos sistemas en conjunto.
- Analizar la red inalámbrica expuesta a obstáculos y ruido presente en casa de máquinas de la Central Agoyán que puedan afectar al diseño del control propuesto.

### **1.4. Hipótesis**

#### ***1.4.1. Hipótesis Nula***

El diseño de un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN, no mejora la precisión de los movimientos en maniobras de transporte, montaje y desmontaje de las unidades generadoras de electricidad.

#### ***1.4.2. Hipótesis Alternativa***

El diseño de un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN, mejora la precisión de los movimientos en maniobras de transporte, montaje y desmontaje de las unidades generadoras de electricidad.

### **1.5. Diseño de Investigación**

#### ***1.5.1. Modalidad de la investigación.***

- El método a usar es el método bibliográfico, que consiste en obtener toda la información del funcionamiento del puente grúa (planos eléctricos, mecánicos y manuales de funcionamiento).
- Recopilar información actualizada acerca de software matemático con la capacidad de agregar funciones de transferencia y con la robustez de realizar simulaciones del comportamiento del sistema al agregar un algoritmo de control. Además, de un software con la capacidad de simular una red inalámbrica con los diferentes equipos que sean necesarios agregar al sistema.
- El método descriptivo obteniendo los datos almacenados de las mediciones de ruido realizadas por parte del área de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional de la Unidad de Negocio Hidroagoyán.
- Usando el método experimental se realizará las debidas pruebas de simulación para corroborar el buen funcionamiento del diseño del sistema.

#### ***1.5.2. Desarrollo del Proyecto.***

Para el desarrollo del proyecto se propone en realizar los siguientes pasos en el orden en que se los coloca:

- Estudiar los planos de control eléctrico y mecánico del puente grúa.
- Realizar el modelado e identificación del sistema.
- Conseguir la función de transferencia para el puente grúa.
- Analizar los tipos de algoritmos de control que existen en la industria, sus ventajas y desventajas para ser implementados en el sistema.
- Diseñar el regulador basado en el lugar geométrico de las raíces.
- Simular la función de transferencia y el regulador en un software de análisis usando métodos numéricos.
- Obtener los datos de la cantidad de ruido existente en el piso principal de la Central Aگویán.
- Realizar el diseño de la red inalámbrica que se acople al controlador obtenido anteriormente.
- Estudiar la cobertura de la red inalámbrica.

## 1.6. Matriz de consistencia.

**Tabla 1-1: Aspectos Específicos**

Variable	Conceptualización	Dimensiones	Indicadores
Variable Dependiente: Algoritmo de Control	Los algoritmos de control se han desarrollado con el propósito de mejorar el comportamiento de los sistemas, aumentando la eficiencia y la precisión de los procesos cuya prioridad sean estos aspectos.	Función de Transferencia	Ecuación Matemática
		Controlador	Porcentaje Error
			Tiempo de Subida
			Tiempo de Establecimiento
			Ganancia Proporcional
Variable Independiente: Redes Inalámbricas	Permite la comunicación entre dispositivos eliminando la necesidad del uso de cable o de la conexión a internet.	Cobertura	Metros
		Velocidad	Hertz
		Transferencia	bps
		Robustez	dB

Realizado por: Ramos, H. (2016)

**Tabla 2-1: Aspectos Generales**

<b>Problema</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>Variables</b>	<b>Metodología</b>	<b>Población</b>
¿El control del puente grúa puede trabajar en forma conjunta con el control del carro testero de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN implementando redes inalámbricas?	Diseñar un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa con el Carro Testero de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN	Diseñar un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa con el Carro Testero de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN, mejorará la precisión de los movimientos en maniobras de transporte, montaje y desmontaje de las unidades generadoras de electricidad.	<b>Variable Dependiente:</b> Controlador Industrial  <b>Variable Independiente:</b> Red Inalámbrica	<b>Método bibliográfico</b> , que consiste en obtener toda la información del funcionamiento del puente grúa (planos eléctricos, mecánicos y manuales de funcionamiento).  <b>Método descriptivo</b> , obteniendo los datos almacenados de las mediciones de ruido realizadas por parte del área de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional de la Unidad de Negocio Hidroagoyan.  <b>Método experimental</b> , se realizará las debidas pruebas de simulación para corroborar el buen funcionamiento del diseño del sistema.	En el proyecto de investigación no es necesario el uso de población o de muestra
¿Es posible integrar el control del puente grúa en conjunto con el control del carro testero implementando un algoritmo de control?	Diseñar un algoritmo de control para el puente grúa y el carro testero que permita integrar el control conjunto de ambos equipos.				
¿Se puede simular el algoritmo de control usando software matemático para comprobar la respuesta del sistema ante una señal de entrada?	Simular el algoritmo de control usando software matemático para comprobar la respuesta del sistema ante una señal de entrada.				
¿Una red inalámbrica puede proporcionar un mayor radio de operación del puente grúa y del transportador para ser usado por el operador?	Estudiar la cobertura de redes inalámbricas para dotar al operador del puente grúa y del transportador un mayor radio de operación de los dos sistemas en conjunto.				

## continuación

¿La exposición a interferencias y ruido electromagnético presentes en casa de máquinas de la Central Agoyan disminuye la transmisión de señales inalámbricas del control propuesto?	Analizar el funcionamiento de redes inalámbricas expuestas a interferencias y ruidos electromagnéticos presentes en casa de máquinas de la Central Agoyan que puedan afectar al diseño del control propuesto.				
---	---	--	--	--	--

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 1.7. Introducción

El puente grúa contiene los 2 ganchos usados para el transporte y las maniobras de montaje y desmontaje. En las maniobras de montaje y desmontaje, la precisión en los movimientos son rigidos por las acciones del operador encargado de manipular el puente grúa.

El contenido del presente trabajo trata del diseño de un algoritmo de control para el puente grúa, cuya finalidad es la de ayudar a mejorar la precisión y suavidad de los movimientos del puente en las maniobras de transporte, montaje y desmontaje disminuyendo el pandeo ocasionado por los movimientos al izar y transportar equipos y partes industriales. El tiempo de respuesta del control a las órdenes enviadas debe ser lo más pronto posible, por lo que en el diseño del controlador el tiempo de accionamiento no debe exceder de 1.05 segundos que es un parámetro de diseño para el controlador.

El diseño incluye el análisis del mejor tipo de comunicación inalámbrica posible para lograr un buen funcionamiento del control propuesto del puente grúa, cuyo objetivo es el de proveer al operario del puente un mayor grado de visibilidad cuando no se encuentre en la cabina haciendo las maniobras de transporte. Se realiza un análisis de las interferencias presentes en el piso principal de casa de máquinas que es el lugar donde se ubica el puente grúa y donde se realizan las maniobras de izaje y transporte. La cobertura de la red comprende todo el piso principal y con una robustez capaz de soportar el ruido electromagnético ocasionado por los reguladores de voltaje de las unidades generadoras.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Modelamiento Matemático

El modelo matemático de los procesos de control analiza el comportamiento del sistema de forma matemática. Las características dinámicas del sistema se representan con variables relacionadas entre sí mediante leyes físicas, proporcionando ecuaciones matemáticas.

El paso principal para realizar el diseño de los sistemas de control es el modelo matemático para tener en conocimiento el comportamiento de las variables dinámicas en función del tiempo, estimando el comportamiento del proceso en presencia de perturbaciones externas. Sin embargo, “Es imposible capturar perfectamente todos los detalles del comportamiento real de un proceso de forma matemática.” (Hurtado & Villareal, 2010, p. 214).

Al realizar el modelamiento del proceso se asume que se trata de un sistema lineal, dicha suposición es con el objetivo de estudiar al proceso. “En un modelo, los parámetros pueden variar debido a las no linealidades o a los cambios en las condiciones de operación.” (Hurtado & Villareal, 2010, p. 214).

Además, se emplean suposiciones que vayan de acuerdo a las leyes físicas de las propiedades del sistema sean mecánicas, eléctricas o térmicas. Las suposiciones se las debe tomar con criterio debido a que existen sistemas cuya dinámica está sometida a varias dinámicas, por ejemplo, un horno de tratamiento térmico usando niquelinas; la temperatura de la resistencia es directamente proporcional a la distancia de la niquelina, el flujo de corriente que circula y a la temperatura ambiente en la que se encuentra.

Las ecuaciones obtenidas son integro-diferenciales, es decir, contiene operaciones de derivación o integración de la variable dependiente en función del tiempo que es la variable independiente. La solución a estas ecuaciones se las obtiene usando el método común de resolución de

ecuaciones diferenciales e integrales o usando herramientas computacionales con el objetivo de realizar un buen análisis y resolución del modelado.

Mientras más compleja se vuelvan las ecuaciones, el modelo matemático es más exacto abarcando casi todos los parámetros del sistema, por lo que es necesaria una herramienta computacional que permita la resolución adecuada de estas ecuaciones. Se puede realizar ecuaciones más simples de los sistemas para su rápida resolución siempre y cuando en el diseño del proceso la exactitud no sea una prioridad.

En general, dado un fenómeno físico que se desea controlar disponemos de un modelo matemático que representa dicho fenómeno, o bien se tiene una curva de respuesta del proceso, que mediante técnicas de identificación de procesos podemos obtener los parámetros de un modelo aproximado del fenómeno real, y de esta forma diseñar y obtener el controlador del proceso. (Álvarez, Soto, & Watkins, 2009, p. 309).

### ***2.1.1. Representación Matemática de elementos***

Cada sistema contiene elementos físicos que trabajan en conjunto para realizar una tarea permitiendo que el sistema cumpla con el objetivo para el cual se ha diseñado. En el modelado cada característica del sistema se lo representa con una variable dependiente del tiempo.

Al usar las variables en el modelo matemático se deben considerar las leyes físicas que rigen a los componentes para que el modelamiento del proceso sea el más cercano al funcionamiento del sistema.

Las ecuaciones resultantes son generalmente ecuaciones diferenciales o integrales; éstas ecuaciones deben considerarse la entrada, el proceso y la salida, obteniendo como resultado una relación entre la entrada al proceso con la respuesta de salida del sistema.



### **2.1.2. Herramientas Computacionales**

El desarrollo tecnológico fortalece el diseño de sistemas más complejos mejorando la industria y su productividad; en control esto significa que el modelamiento matemático es más complejo, ecuaciones diferenciales e integrales con una mayor cantidad de variables dependientes que representen las características del proceso.

Debido a la complejidad y el tiempo empleado para la resolución de estas ecuaciones, es necesario que al diseñar el control de un sistema se utilicen herramientas computacionales con la capacidad de realizar operaciones complejas para dar solución al modelo matemático del proceso.

“Existen variadas herramientas de software que permiten simular controladores, entornos robustos para la programación de rutinas en diferentes lenguajes y software orientado a la construcción de los circuitos electrónicos.” (Álvarez, Soto, & Watkins, 2009, p. 309).

Una solución gráfica de las operaciones permite analizar visualmente el comportamiento del sistema en un período de tiempo. Siendo la respuesta el valor de la salida del modelo matemático, cuya entrada es asumida para el estudio de la conducta del sistema.

Cuando se plantea un control industrial, lo primero es establecer un modelo dinámico del proceso a controlar. Esto se logra realizando ensayos experimentales excitando al sistema con una señal, registrando la respuesta, y aplicando algún método para la obtención del modelo, luego se escoge el controlador y se seleccionan adecuadamente sus parámetros, con la asistencia de programas computacionales. (Alfonsi & Pérez, 2009, p. 43).

Una de estas herramientas es el software Matlab, que consiste en un procesador de cálculos matemáticos basándose en matrices para la resolución de cualquier operación, además de ser un poderoso motor de simulación y modelado de sistemas.

La plataforma de programación es propia de MathWorks, con su estructura, funciones, operaciones y librerías que son especiales para el programa trabaje usando matrices complejas proveyendo una solución rápida y fiable a operaciones complejas.

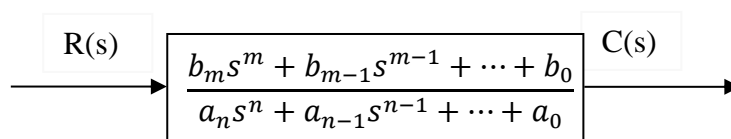
El motor de simulación de MathWorks, Simulink contiene una programación en bloques que contienen librerías especiales para simulación de procesos y representación matemática. Además, un editor gráfico y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos integrándose con Matlab permitiendo importar y exportar resultados haciéndolo más robusto en la resolución y análisis en operaciones complejas.

## 2.2. Funciones de Transferencia

Las funciones de transferencia no son más que la representación matemática de un sistema, relacionando la entrada con la salida. “Esta función permitirá la separación de la entrada, el sistema y la salida en tres partes separadas y distintas, a diferencia de las ecuaciones diferenciales.” (Nise, 2002, p. 49).

La función de transferencia es el resultado de la aplicación de la transformada de Laplace y su inversa (Figura 1-2), es decir, la función permite combinar las representaciones algebraicas de subsistemas para obtener la representación final del sistema total.

“La función de transferencia se puede representar como un diagrama de bloques, con la entrada a la izquierda y la salida a la derecha, y la función de transferencia del sistema dentro del bloque.” (Nise, 2002, p. 50).



**Figura 1-2: Función de Transferencia**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Siendo  $R(s)$  la entrada del sistema,  $C(s)$  la salida y  $G(s)$  la función de transferencia dentro del bloque, por lo tanto, la salida es igual al producto de la entrada por la función como se muestra en la Ecuación 1-2.

$$C(s)=R(s)G(s) \qquad \text{Ecuación 1-2}$$




“En general, un sistema físico que puede ser representado por una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo se puede modelar como una función de transferencia.” (Nise, 2002, p. 52).

Mediante la función de transferencia se obtiene la estabilidad de la salida del sistema en relación con la entrada. “Se dice que el sistema o proceso es estable cuando su salida se mantiene limitada (finita) para una entrada limitada” (Smith & Corripio, 1991, p. 105).

### 2.2.1. Funciones de Transferencia de un Sistema Eléctrico

En la representación de los elementos de una red eléctrica se consideran las relaciones voltaje-corriente y voltaje-carga. Lo elementos pasivos que generalmente se encuentran en una red eléctrica son: resistencias, capacitores y bobinas.

En la figura 2-2 se muestran los elementos eléctricos y sus respectivas relaciones voltaje-corriente y voltaje-carga.

Componente	Voltaje-corriente	Corriente-voltaje	Voltaje-carga	Impedancia $Z(s) = V(s)/I(s)$	Admitancia $Y(s) = I(s)/V(s)$
 Capacitor	$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau$	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$	$v(t) = \frac{1}{C} q(t)$	$\frac{1}{Cs}$	$Cs$
 Resistor	$v(t) = Ri(t)$	$i(t) = \frac{1}{R} v(t)$	$v(t) = R \frac{dq(t)}{dt}$	$R$	$\frac{1}{R} = G$
 Inductor	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v(\tau) d\tau$	$v(t) = L \frac{d^2q(t)}{dt^2}$	$Ls$	$\frac{1}{Ls}$

Nota: El siguiente conjunto de símbolos y unidades se utiliza en todo este libro:  $v(t) = V$  (volts),  $i(t) = A$  (ampere),  $q(t) = Q$  (coulombs),  $C = F$  (farads),  $R = \Omega$  (ohms),  $G = \text{Mhos}$ ,  $L = H$  (henrys).

**Figura 2-2: Tabla de relaciones de elementos eléctricos**

Fuente: NISE, N. S. (2002), p. 52

Para la resolución de las redes se usa las leyes de Kirchhoff, resolviendo las mallas y reemplazando los elementos de la red por las relaciones de voltaje-corriente o voltaje-carga, dependiendo los indicadores que se usen para hallar la solución.

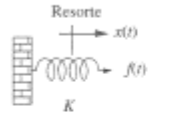

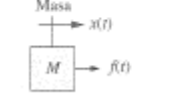
La resolución de las redes eléctricas tiene varios caminos, el adecuado depende de la cantidad de elementos y la complejidad del circuito eléctrico, queda a libertad del diseñador escoger el

método de solución. Las ecuaciones diferenciales e integrales obtenidas contienen los valores de los elementos y las fuentes que forman parte del circuito eléctrico.

### 2.2.2. Funciones de Transferencia de un Sistema Mecánico

Todo sistema es representado matemáticamente, en el caso de los sistemas mecánicos se consideran las relaciones fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento. Dentro de los elementos pasivos de un sistema mecánico tenemos: resorte, amortiguador y masa.

En la figura 3-2 se muestran las relaciones fuerza-velocidad y fuerza-desplazamiento que representan a los elementos que almacenan energía (resorte y masa) y los disipadores (amortiguador). Estas relaciones son adecuadas para sistemas traslacionales, cuya resolución se la realiza con sumatorias de fuerzas asumiendo una dirección positiva para su solución.

Componente	Fuerza-velocidad	Fuerza-desplazamiento	Impedancia $Z_M(s) = F(s)/X(s)$
 <p>Resorte <math>K</math></p>	$f(t) = K \int_0^t v(\tau) d\tau$	$f(t) = Kx(t)$	$K$
 <p>Amortiguador viscoso <math>f_v</math></p>	$f(t) = f_v v(t)$	$f(t) = f_v \frac{dx(t)}{dt}$	$f_v s$
 <p>Masa <math>M</math></p>	$f(t) = M \frac{dv(t)}{dt}$	$f(t) = M \frac{d^2 x(t)}{dt^2}$	$Ms^2$

Nota: El siguiente conjunto de símbolos y unidades se utiliza en todo este libro:  $f(t) = \text{N}$  (newtons),  $x(t) = \text{m}$  (metros),  $v(t) = \text{m/s}$  (metros/segundo),  $K = \text{N/m}$  (newtons/metro),  $f_v = \text{N-s/m}$  (newton-segundo/metro),  $M = \text{kg}$  (kilogramos = newton-segundos<sup>2</sup>/metro).

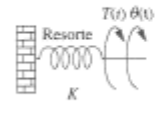
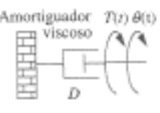
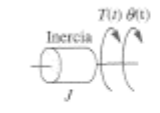
**Figura 3-2: Tabla de relaciones para sistemas mecánicos traslacionales**

Fuente: NISE, N. S. (2002), p. 69

Para los sistemas mecánicos rotacionales los elementos pasivos son los mismos, sin embargo, cambia el movimiento que se realiza en el sistema por lo que sus relaciones cambian a par-velocidad angular y par-desplazamiento angular (Figura 4-2).

Tanto para los sistemas eléctricos o mecánicos las ecuaciones resultantes son diferenciales o integrales, por lo tanto, mientras más complejas sean las ecuaciones, más compleja es su resolución.

Las ecuaciones obtenidas se encuentran en función del tiempo, por lo que, se aplican las transformadas de Laplace para obtener ecuaciones en función de la frecuencia. Las condiciones iniciales son necesarias para cualquier sistema, sin embargo, si se desconoce dicho valor se asume con el valor de 0 a las condiciones iniciales.

Componente	Par velocidad angular	Par desplazamiento angular	Impedancia $Z_M(s) = T(s)/\theta(s)$
 <p>Resorte <math>K</math></p>	$T(t) = K \int_0^t \omega(\tau) d\tau$	$T(t) = K\theta(t)$	$K$
 <p>Amortiguador viscoso <math>D</math></p>	$T(t) = D\omega(t)$	$T(t) = D \frac{d\theta(t)}{dt}$	$Ds$
 <p>Inercia <math>J</math></p>	$T(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt}$	$T(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}$	$Js^2$

Nota: El siguiente conjunto de símbolos y unidades se utiliza en todo este libro:  $T(t)$  = N-m (newton-metros),  $\theta(t)$  = rad (radianes),  $\omega(t)$  = rad/s (radianes/segundo),  $K$  = N-m/rad (newton-metros/radián),  $D$  = N-m-s/rad (newton-metros-segundos/radián),  $J$  = kg-m<sup>2</sup> (kilogramo-metros<sup>2</sup> = newton-metros-segundos<sup>2</sup>/radián).

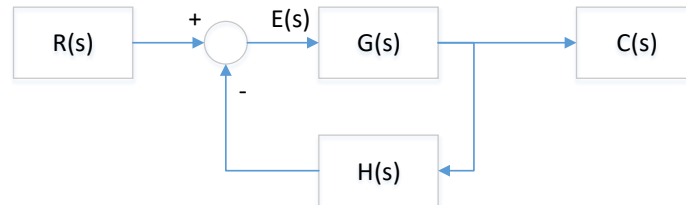
**Figura 4-2: Tabla de relaciones para sistemas mecánicos rotacionales**

Fuente: NISE, N. S. (2002), p. 77

### 2.2.3. Diagramas de Bloques

Los diagramas de bloques son herramientas para el análisis de sistemas de control, básicamente es la representación gráfica de las funciones de transferencia obtenidas de los modelos matemáticos. “En general, los diagramas de bloques constan de cuatro elementos básicos: flechas, puntos de sumatoria, puntos de derivación y bloques.” (Smith & Corripio, 1991, p 106).

Como se muestra en la figura 5-2, el flujo en el que circula la información se indica por la dirección de las flechas; donde la función de transferencia se encuentra dentro de un bloque cuya entrada es el error que existe en el proceso (la diferencia entre el valor deseado con el valor medido) y su salida es el resultante de los procesos realizados por la función de transferencia.



**Figura 5-2: Diagrama de Bloques en lazo cerrado**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Los diagramas de bloques son la base para la simulación de un proceso usando una herramienta computacional, es decir, obteniendo la función de transferencia se puede simular una entrada ( $R(s)$ ) de cualquier tipo para obtener como salida ( $C(s)$ ) un resultado gráfico, facilitando el análisis de la fiabilidad y estabilidad del sistema.

En el caso de la figura 5-2 se trata de un diagrama de bloques en lazo cerrado con retroalimentación; el bloque donde se encuentra la función de transferencia tiene como entrada el error ( $E(s)$ ) que es la diferencia entre el valor deseado o programado y la retroalimentación ( $H(s)$ ).

Existen también lazos de control abiertos implementados en procesos en los que no es necesaria una retroalimentación, este tipo de control es clásico y muy común en sistemas en los que la precisión no es un requerimiento. En la figura 6-2 se puede apreciar el diagrama de bloques en lazo abierto.



**Figura 6-2: Diagrama de Bloques en lazo abierto**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 2.3. Controladores Industriales

Los controladores industriales se han desarrollado con el propósito de mejorar el comportamiento de los sistemas, aumentando la eficiencia y la precisión de los procesos cuya prioridad sean estos aspectos. “El control fuerza al sistema para que tenga el comportamiento lo más cercano posible a las expectativas del diseñador, las cuales son conocidas también como criterios de respuesta” (Rairán-Antolines & Fonseca-Gómez, 2011, p. 339). La implementación de controladores tiene como objetivo reducir el error, incrementar la robustez del sistema y disminuir su tiempo de respuesta.

“Las especificaciones en el dominio del tiempo que se han proporcionado son muy importantes, ya que casi todos los sistemas de control son sistemas en el dominio del tiempo; es decir, deben presentar respuestas de tiempo aceptables” (Ogata, 2010, p. 170-171).

“La habilidad de un sistema de control de operar en múltiples ambientes y con multi-objetivos, partiendo del reconocimiento de la situación específica y sirviéndola adecuadamente, se puede definir como control inteligente.” (Addison, 2007, p. 263).

#### 2.3.1. Tipos de controladores por retroalimentación

“La manera en que los controladores por retroalimentación toman una decisión para mantener el punto de control, es mediante el cálculo de la salida con base en la diferencia entre la variable que se controla y el punto de control.” (Smith & Corripio, 1991, p. 203).

### 2.3.2. Controlador Proporcional (P)

Este tipo de controlador provee de una señal proporcional al error, esta proporcionalidad la da la ganancia del controlador en el cual se modifica la señal de salida alterando el error entre el valor deseado con el valor medido. La figura 7-2 muestra el diagrama de bloques correspondiente al controlador proporcional.



**Figura 7-2: Diagrama de Bloques de un Controlador Proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Donde  $e(t)$  es la señal de error en régimen permanente,  $u(t)$  es la señal de salida del controlador y  $G_c(s)$  es la representación del controlador (también denominado  $K_c$ ). Gracias a la ganancia proporcional, físicamente vuelve más robusto al proceso, permitiéndolo ser menos inmune ante las perturbaciones externas.

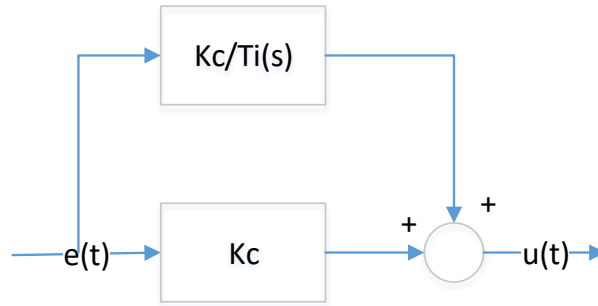
Sin embargo, mientras la ganancia sea mayor la desviación tiende a reducirse, pero existe un valor límite superior de  $K_c$  desde el que empieza a volverse inestable el sistema, dando como salida un resultado totalmente diferente del deseado.

### 2.3.3. Controlador Proporcional Integral (PI)

La parte integral del controlador elimina el error en instantes de tiempo. Este controlador actúa siempre que exista un error; físicamente siempre va a existir un error que es normal debido a condiciones externas tanto por el ambiente y equipos montados en el sistema.

En la figura 8-2 podemos observar el controlador, siendo el control proporcional aumentado la parte integral.





**Figura 8-2: Control Proporcional Integral**

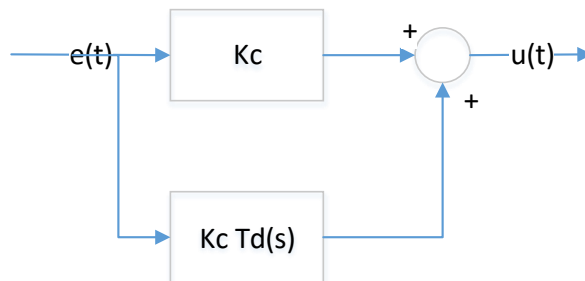
Realizado por: Ramos, H. (2016)

Técnicamente hablando el control proporcional integral agrega un polo en el eje real mejorando el error en régimen permanente (parte integral) pero se deteriora el error en régimen transitorio, por lo que es necesaria la parte proporcional.

#### 2.3.4. Controlador Proporcional Derivativo (PD)

El controlador tiene en cuenta la posición anticipada del error debido a la parte derivativa. “(...) también se conoce como rapidez de derivación o preactuación; tiene como propósito anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, su derivada.” (Smith & Corripio, 1991, p. 212).

En la figura 9-2 se muestra el controlador proporcional incrementando la parte derivativa.



**Figura 9-2: Control Proporcional Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

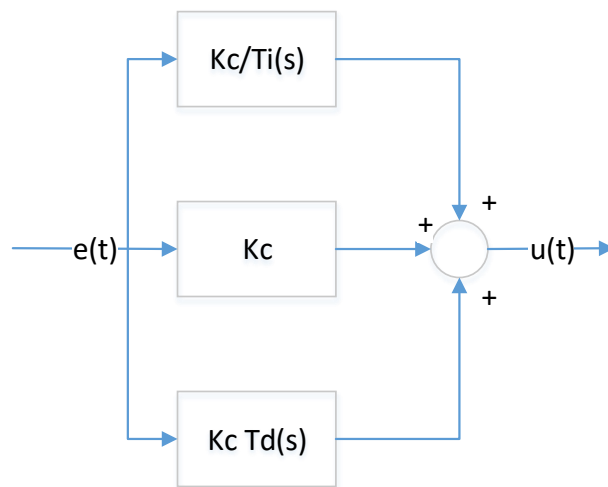
### 2.3.5. Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID)

El controlador más usado en la industria debido a que conlleva lo mejor de todos los controladores es el PID, el cual combina el efecto del PI (mejorando la respuesta en régimen permanente) con el PD (mejorando la respuesta en régimen transitorio).

“El control PID proporciona un tratamiento tanto para la respuesta de estado estacionario como la respuesta transitoria, y ofrece una solución genérica y eficiente a los problemas de control del mundo real.” (Lozano-Valencia, Rodríguez-García, & Giraldo-Buitrago, 2012, p. 35).

“La sintonización de los controladores PID consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros ( $K_c$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ ), para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto de conformidad con algún criterio de desempeño establecido.” (Ruge-Ruge, 2011, p. 24).

En la figura 10-2 se muestra el controlador PID con su parte proporcional, integral y derivativa.



**Figura 10-2: Control Proporcional Integral Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

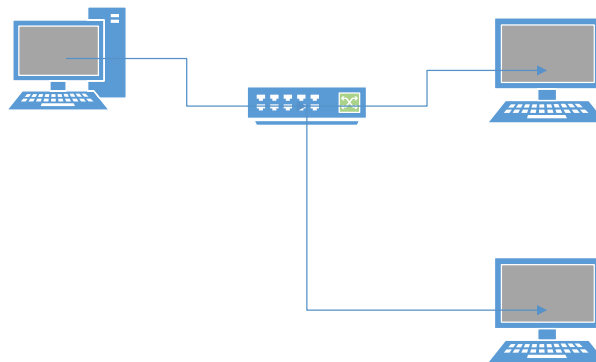
El 90% de controladores son PID debido a que son los más comunes y fáciles de implementar. Otra de las cualidades de este controlador es que disminuye la sobreoscilación. “Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son largas. Ejemplos

típicos de ello son los circuitos de temperatura y los de concentración.” (Smith & Corripio, 1991, p. 213).

“(…) si bien es el más popular en la industria, es reconocida su deficiencia cuando el sistema es no lineal” (Rairán-Antolines, Guerrero-Cifuentes, & Mateus-Pineda, 2010, p. 140).

## 2.4. Redes de Comunicación

Una red de comunicación es un sistema formado por un conjunto de dispositivos y medios de transmisión de datos diseñados para compartir información y optimizar recursos (figura 11-2). Con el desarrollo tecnológico ha sido necesaria la compartición de datos para mejorar los procesos, inclusive volviéndolos más confiables y robustos.



**Figura 11-2: Red de Comunicación**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 2.4.1. Dirección MAC

Es un número de serie asociado a cada dispositivo que forma parte de la red. Es una dirección física que es única para cada dispositivo de fábrica, viene almacenado en la memoria ROM de la tarjeta NIC (Network Interface Card).

Cuando se inicializa, la NIC, la dirección MAC de ROM pasa a la memoria RAM del PC. En la compartición de información en una red, si la dirección MAC coincide, el dato es aceptado por el dispositivo caso contrario lo desecha.

#### **2.4.2. Dirección IP**

Cada dispositivo que forma parte de la red debe tener un único identificador, llamado dirección IP. También conocida como dirección lógica, puede ser asignada estáticamente (se utiliza el modelo TCP/IP) o dinámicamente (se utiliza servidores de IP (DHCP)).

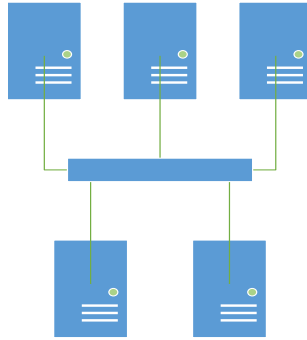
Todos los paquetes de datos que son compartidos en la red tienen un encabezado o HEADER, en el que se encuentran las direcciones MAC e IP con lo que el dispositivo sabe qué dato debe adquirir y cuál ignorar.

Es importante tener en cuenta que una dirección IP en realidad no se refiere a un host, sino a una interfaz de red, por lo que, si un host está en dos redes, debe tener dos direcciones IP. Sin embargo, en la práctica la mayoría de los hosts están en una red y, por ende, tienen una dirección IP. En contraste, los enrutadores tienen varias interfaces y, por lo tanto, múltiples direcciones IP. (Tanenbaum & Wetherall, 2012, p. 379).

#### **2.4.3. Medios de Comunicación Compartidos**

Los Host que se conectan directamente utilizan medios que son compartidos, es decir, que utilizan el cable de cobre, F.O. (fibra óptica), aire como medio común para la transferencia de datos.

El flujo de información es topología lógica BUS con diferentes topologías físicas, siendo la más común la topología estrella y estrella extendida donde los datos se difunden en toda la red (Broadcast). Entre los diferentes tipos de tecnología de red tenemos Ethernet, Token Ring, FDDI.



**Figura 12-2: Tecnología Ethernet**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

#### **2.4.4. Tecnología Ethernet**

Fue diseñada en la época de los 70 en la universidad de Hawai. Creada con el fin de evitar corte de datos en la red de internet. Su configuración permite transmitir datos a alta velocidad: 10Mbps -> 100Mbps -> 1Gbps -> 10Gbps (fast Ethernet). Puede adaptarse a diferentes tecnologías de dispositivos. Es fácilmente escalable (se amplía fácilmente), mantenimiento e instalación (figura 12-2).

#### **2.5. Redes Inalámbricas**

Las redes inalámbricas se han convertido en el foco del desarrollo tecnológico implementándose en varios lugares (hogar, oficinas, industria, etc.) gracias a que permite la comunicación entre dispositivos eliminando la necesidad del uso de cable o de la conexión a internet. “Los estándares más utilizados a nivel comercial son el 802.11, conocido como WiFi (“Wireless Fidelity”, Fidelidad Inalámbrica) y el 802.16 también llamado WiMAX (“Worldwide Interoperability for Microwave Access”, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas)” (García, y otros, 2010, p. 110).

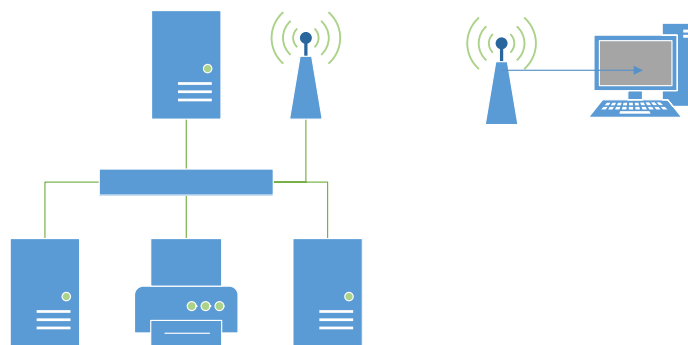
“En los sistemas de control en red, por ejemplo, hay un gran interés en el desarrollo de la tecnología inalámbrica como un reemplazo potencial para la actual generación de redes cableadas industriales” (Monsalve Posada, Arias Londoño, & Mejía Arango, 2015, p.89).

Con la red inalámbrica los sistemas tienen una mayor movilidad sin la restricción del cableado para el control del proceso. Sin embargo, esta tecnología aún no es posible ser implementada en todos los ambientes industriales debido a la afectación que tiene el ambiente en la comunicación y transferencia de datos de la red.

El ambiente industrial se encuentra lleno de perturbaciones, en la cual la más común es el ruido, en un sistema no se puede eliminar completamente debido a los componentes físicos (mecánicos y eléctricos) que forman el proceso. Por lo tanto, en el diseño de la red inalámbrica se consideran estos puntos cuya influencia es alta en el trabajo normal de la red.

Un objetivo de Industrial Ethernet es extender sus aplicaciones hasta la base de la pirámide de automatización para comunicar procesos de control en tiempo real bajo condiciones extremas teniendo en cuenta que, dependiendo de la aplicación, la mayoría de los procesos de control industrial pueden tolerar latencias entre 10 - 50 ms. (Monsalve Posada, Arias Londoño, & Mejía Arango, 2015, p.89).

Los elementos que conforman una red inalámbrica son los mismos usados para una red convencional industrial, cambiando las características del medio de transmisión de los equipos. Sin embargo, también se puede usar los elementos de una red industrial normal agregándole un punto de acceso (AP) para poder enviar los comandos de control o datos desde un equipo inalámbrico (Figura 13-2).



**Figura 13-2: Red Inalámbrica**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Para poder analizar el desempeño de la red inalámbrica, se toman los siguientes aspectos en consideración:

- Relación entre la señal y el ruido o SNR: “La SNR se debe tener en cuenta a la hora de establecer una comunicación inalámbrica ya que afecta considerablemente su desempeño, sobre todo en ambientes industriales donde el nivel de potencia del ruido es grande.” (Monsalve Posada, Arias Londoño, & Mejía Arango, 2015, p. 90).

Para poder calcular la SNR usamos la ecuación 2-2.

$$SNR = 10\text{Log}P_s - 10\text{Log}P_n \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Donde  $P_s$  es la potencia de la señal de comunicación (Watts) y  $P_n$  es la potencia del ruido que se encuentra en el ambiente donde se ubica el sistema.

- Distancia: hace referencia a la cobertura que va a tener la red inalámbrica cubriendo con las necesidades del sistema, asegurando que se conserve la comunicación entre los dispositivos. Para definir la distancia usamos la ecuación 3-2 y ecuación 4-2.

$$L_p = 20 \left( \log \frac{4\pi}{c} + \log f + \log D \right) \quad \text{Ecuación 3-2}$$

- Siendo  $L_p$  las pérdidas de la trayectoria en un espacio libre (dB),  $c$  la velocidad de la luz en el vacío,  $D$  la distancia total de cobertura de la red (m),  $f$  frecuencia (Hertz).

$$F_m = 30\log D + 10 \log(6ABf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde  $F_m$  es el margen de desvanecimiento,  $A$  factor de aspereza del terreno,  $B$  factor climático,  $R$  confiabilidad.

- Número de bytes: “el número de bytes de datos es pequeño y dependiendo del número de dispositivos conectados, el flujo de información puede ser alto.” (Monsalve Posada, Arias Londoño, & Mejía Arango, 2015, p.91).

$$p_k = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde  $p_k$  es la probabilidad de error en una cantidad  $k$  de paquetes,  $p$  probabilidad de error,  $n$  número total de paquetes.

$$PER = \frac{\textit{Errores Recibidos}}{\textit{Cantidad de Tama Recibida}} \times 100$$

**Ecuación 6-2**

El PER tiene una relación directa con la interferencia y potencia de la señal, además, también se lo considera como aspecto importante en la modulación y ancho de banda.



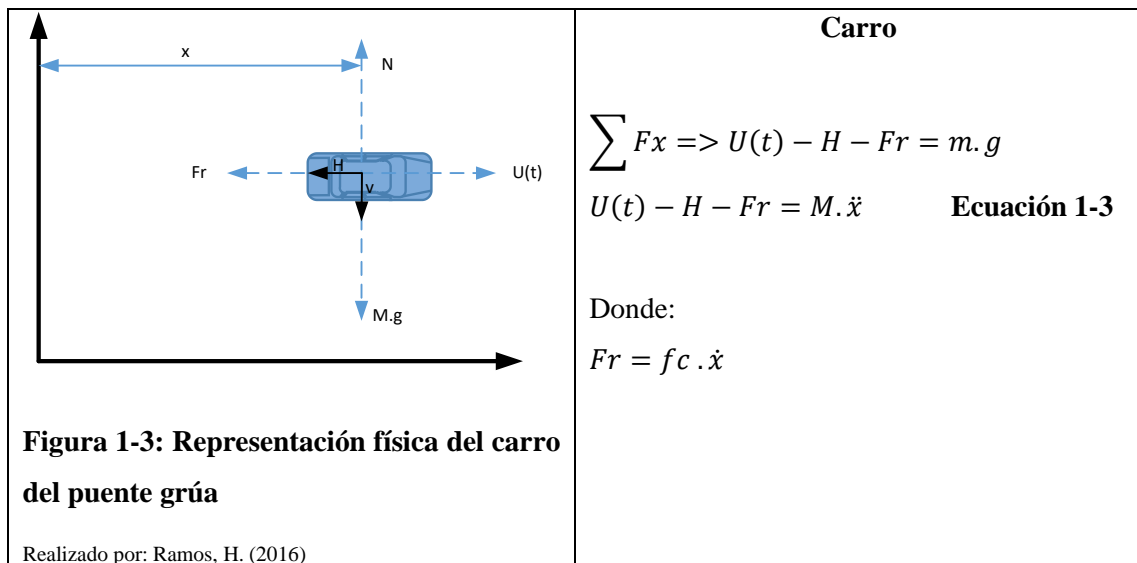
## CAPÍTULO III

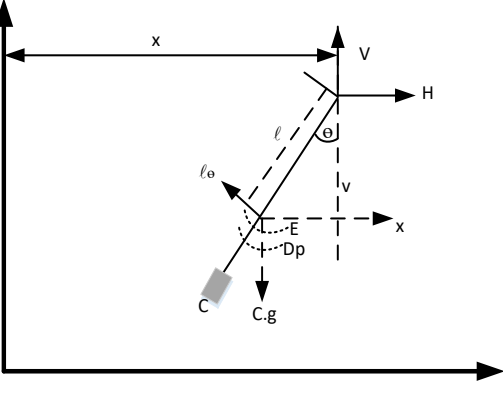
### 3. DISEÑO DE ALGORITMO DE CONTROL Y SELECCIÓN DE EQUIPOS

#### 3.1. Modelo matemático del Puesto Grúa

El puente grúa consta de un carro testero en el cual se encuentran los 2 ganchos de 150T y de 15T. Dependiendo del peso de las partes industriales y de las actividades a realizarse, se usan los ganchos; por seguridad al transportar las partes de la unidad generadora se usa un gancho a la vez.

PUENTE GRÚA



 <p><b>Figura 2-3: Representación física del gancho de 150T</b></p> <p>Realizado por: Ramos, H. (2016)</p>	<p style="text-align: center;"><b>Cable</b></p> $\sum F_x \Rightarrow H = m \cdot g$ $H = C \frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta)$ $\sum F_y \Rightarrow V - C \cdot g = C \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta)$ $V - C \cdot g = C \frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) \quad \text{Ecuación 2-3}$ <p>Donde:  <math>D_p</math> = fricción rotacional  <math>D_p = f p \theta</math></p>
---	---

Reemplazando

$$\frac{d}{dt} (x - l \sin \theta) = \dot{x} - l \dot{\theta} \cos \theta$$

$$\frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta) = \ddot{x} + l \dot{\theta}^2 \sin \theta - l \ddot{\theta} \cos \theta \quad \text{Ecuación 3-3}$$

$$\frac{d}{dt} (l \cos \theta) = -l \dot{\theta} \sin \theta$$

$$\frac{d^2}{dt^2} (l \cos \theta) = -l \dot{\theta}^2 \cos \theta - l \ddot{\theta} \sin \theta \quad \text{Ecuación 4-3}$$

$$\Rightarrow H = C \ddot{x} - C l \ddot{\theta} \cos \theta + C l \dot{\theta}^2 \sin \theta \quad \text{Ecuación 5-3}$$

$$V = C \cdot g + C l \dot{\theta} \sin \theta - C l \dot{\theta}^2 \cos \theta \quad \text{Ecuación 6-3}$$

$$\sum M \Rightarrow J \ddot{\theta} + D_p - H l \cos \theta + V l \sin \theta = 0 \quad \text{Ecuación 7-3}$$

Reemplazando H en Ecuación 1-3.

$$U(t) = M \ddot{x} + C \ddot{x} - C l \ddot{\theta} \cos \theta + C l \dot{\theta}^2 \sin \theta + f c \dot{x}$$

$$U(t) = (M + C) \ddot{x} - C l (\ddot{\theta} \cos \theta - \dot{\theta}^2 \sin \theta) + f c \dot{x} \quad \text{Ecuación 8-3}$$

Reemplazando H y V en Ecuación 7-3.

$$J\ddot{\theta} + Dp - [C\ddot{x} - Cl\ddot{\theta}\cos\theta + Cl\dot{\theta}^2\sin\theta]l\cos\theta + [Cg - Cl\ddot{\theta}\sin\theta - Cl\dot{\theta}^2\cos\theta]l\sin\theta = 0$$

$$J\ddot{\theta} + fp\dot{\theta} - Cl\ddot{x}\cos\theta + Cl^2\ddot{\theta}\cos^2\theta - Cl^2\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta + [Cg - Cl\ddot{\theta}\sin\theta - Cl\dot{\theta}^2\cos\theta]l\sin\theta = 0$$

**Ecuación 9-3**

Derivando Parcialmente Ecuación 8-3

$$U(t) = (M + C)\ddot{x} - Cl\ddot{\theta}\cos\theta + Cl\dot{\theta}^2\sin\theta + fc\dot{x}$$

$$\text{Siendo } f(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta, \ddot{x}, \dot{x}) = 0$$

$$\frac{du(t)}{d\ddot{\theta}} = -Cl\cos\theta \Delta\ddot{\theta}$$

$$\frac{du(t)}{d\dot{\theta}} = \cancel{2cl\theta\sin\theta} \Delta\dot{\theta} = 0$$

$$\frac{du(t)}{d\ddot{x}} = (M + C)\Delta\ddot{x}$$

$$\frac{du(t)}{d\dot{x}} = fc\Delta\dot{x}$$

$$\frac{du(t)}{d\theta} = \cancel{Cl\ddot{\theta}\sin\theta} + \cancel{Cl\dot{\theta}^2\cos\theta} = 0$$

$$\Rightarrow (M + c)\Delta\ddot{x} + fc \Delta\dot{x} - Cl\cos\theta\Delta\ddot{\theta} = U(t)$$

$$\text{Punto de equilibrio } x_0 = 0$$

$$\theta_0 = 0$$

$$\Rightarrow (M + c)\Delta\ddot{x} + fc \Delta\dot{x} - Cl\Delta\ddot{\theta} = U(t)$$

Transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas

$$L\{U(t)\} \Rightarrow (M + C)s^2X(s) + fcsX(s) - Cls^2\theta(s)$$

**Ecuación 10-3**

Derivando Parcialmente Ecuación 9-3

$$J\ddot{\theta} + fp\dot{\theta} - Cl\ddot{x}\cos\theta + Cl^2\ddot{\theta}\cos^2\theta - Cl^2\dot{\theta}^2\sin\theta\cos\theta + [Cg - Cl\ddot{\theta}\sin\theta - Cl\dot{\theta}^2\cos\theta]l\sin\theta = 0$$

$$\text{Siendo } f(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta, \ddot{x}, \dot{x}) = 0$$

$$\frac{df(t)}{d\theta} = (J + Cl^2 - Cl\cancel{\sin^2\theta}) \Delta\ddot{\theta}$$

$$\frac{df(t)}{d\dot{\theta}} = (fp - 2Cl^2\dot{\theta}\cancel{\cos\theta\sin\theta}) \Delta\dot{\theta}$$

$$\frac{df(t)}{d\theta} = (Cgl\cos\theta - Cl\ddot{x}\cancel{\sin\theta} - Cl^2\ddot{\theta}\dot{\theta}\cancel{\sin^2\theta} - Cl^2\dot{\theta}^3\cancel{\cos^2\theta} + Cl^2\dot{\theta}^3\cancel{\sin^2\theta}) \Delta\theta$$

$$\frac{df(t)}{d\ddot{x}} = Cl\cos\theta \Delta\ddot{x}$$

$$\Rightarrow (J + Cl^2)\Delta\ddot{\theta} + fp \Delta\dot{\theta} + Cgl\cos\theta \Delta\theta - Cl\cos\theta \Delta\ddot{x} = 0$$

$$\text{Punto de equilibrio } x_0 = 0 \qquad \theta_0 = 0$$

$$\Rightarrow (J + Cl^2)\Delta\ddot{\theta} + fp \Delta\dot{\theta} + Cgl\Delta\theta + Cl\Delta\ddot{x} = 0$$

Transformada de Laplace con condiciones iniciales nulas

$$L\{f(t)\} \Rightarrow (J + Cl^2)s^2\theta(s) + fps\theta(s) + Cgl\theta(s) + Cls^2X(s) = 0 \quad \text{Ecuación 11-3}$$

Obtenidas las ecuaciones en función de la frecuencia (Ecuación 10-3 y Ecuación 11-3), se procede a la obtención de la función de transferencia del puente grúa para poder realizar el diseño del controlador. Para tener una mejor apreciación del puente grúa, se obtiene el diagrama de bloques a partir de las ecuaciones obtenidas anteriormente, conservando la relación de desplazamiento y el ángulo de pando respecto a la señal de entrada.

$$U(s) = (M + C)s^2X(s) + fcsX(s) - Cls^2\theta(s)$$

$$(J + Cl^2)s^2\theta(s) + fps\theta(s) + Cgl\theta(s) + Cls^2X(s) = 0$$


### 3.1.1. Representación del ángulo de pando del gancho del puente grúa

$$[(M + C)s^2 + fcs]X(s) = U(s) + Cls^2\theta(s)$$

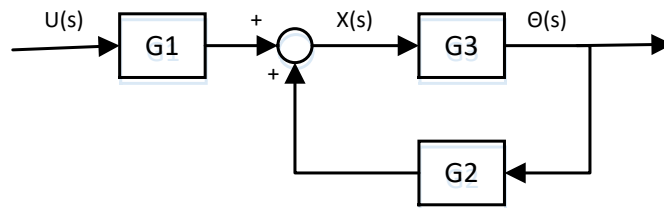
$$U(s) = \overset{\rightarrow G1}{\frac{1}{(M + C)s^2 + fcs}} u(s) + \overset{\rightarrow G2}{\frac{Cls^2}{(M + C)s^2 + fcs}} \theta(s)$$

$$(J + Cl^2)s^2\theta(s) + fps\theta(s) + Cgl\theta(s) - Cls^2x(s) = 0$$

$$\theta(s) = \frac{Cls^2}{(J + Cl^2)s^2 + fps + Cgl} X(s)$$



El ángulo de pandeo del gancho del puente grúa es representado por la letra  $\theta$  y la señal de entrada de control con la letra U, por lo tanto, reemplazando U(s) en  $\theta(s)$  se obtiene el diagrama de control (Figura 3-3) y el modelo matemático (Ecuación 12-3) del gancho del puente grúa, la ecuación del sistema es indispensable para realizar el diseño del controlador.



**Figura 3-3: Diagrama de control del ángulo de pandeo del gancho del puente grúa**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$\theta(s) = \frac{Cls^2}{(J + Cl^2)s^2 + fps + Cgl} \left( \frac{1}{(M + C)s^2 + fcs} U(s) + \frac{Cls^2}{(M + C)s^2 + fcs} \theta(s) \right)$$

$$\theta(s) = \frac{Cls^2 (U(s) + Cls^2 \theta(s))}{(J + Cl^2)(M + C)s^4 + (J + Cl^2)fcs^3 + (M + C)fps^3 + fc fps^2 + Cgl(M + C)s^2 + Cglfcs}$$

$$\theta(s) = \frac{Cls^3 U(s) + C^2 l^2 s^2 \theta(s)}{(J + Cl^2)(M + C)s^4 + [(J + Cl^2)fc + (M + C)fp]s^3 + [fc fp + Cgl(M + C)]s^2 + Cglfcs}$$

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{Cls^2}{(J + Cl^2)(M + c)s^4 + [(J + Cl^2)fc + (M + C)fp]s^3 + [fpfc + Cgl(M + C)]s^2 + Cglfc}$$

**Ecuación 12-3**

**3.1.2. Desplazamiento del carro del puente grúa.**

$$[(M + C)s^2 + fcs]X(s) = U(s) + Cls^2\theta(s)$$

$$\theta(s) = \frac{(M + C)s^2 + fcs}{Cls^2} X(s) - \frac{1}{Cls^2} U(s)$$

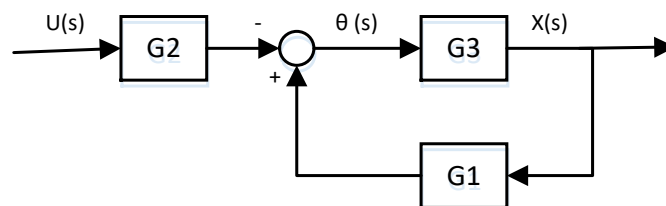
$\nearrow$  G1
 $\nearrow$  G2

$$(J + Cl^2)s^2\theta(s) + fps\theta(s) + Cgl\theta(s) - Cls^2x(s) = 0$$

$$X(s) = \frac{(J + Cl^2)s^2\theta(s) + fps + Cgl}{Cls} \theta(s)$$

$\searrow$  G3

El desplazamiento del puente grúa es representado por la letra X y la señal de entrada de control con la letra U, por lo tanto, se reemplaza  $\theta(s)$  en  $X(s)$  obteniendo el diagrama de control (Figura 4-3) y el modelo matemático (Ecuación 13-3) del carro del puente grúa, la ecuación del sistema es necesaria para obtener el controlador.



**Figura 4-3: Diagrama de control del ángulo de desplazamiento del carro del puente grúa**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$\begin{aligned}
X(s) &= \frac{(J + cC)s^2 + fps + Cgl}{Cl s^2} \left( \frac{(M + C)s^2 + fcs}{Cl s^2} X(s) - \frac{1}{Cl s^2} U(s) \right) \\
X(s) &= \frac{(J + Cl^2)(M + C)s^4 + (J + Cl^2)fcs^3 + (M + C)fps^3 + fpfcs^2 + (M + C)Cgls^2 + Cglfcs}{C^2 l^2 s^4} X(s) \\
&\quad - \frac{(J + Cl^2)s^2 + fps + Cgl}{C^2 l^2 s^4} U(s) \\
[(J + Cl^2)(M + C)s^4 + (J + Cl^2)fc + (M + C)fp]s^3 + [fpfc + (M + C)Cgl]s^2 + Cglfcs \\
&\quad - C^2 l^2 s^4] X(s) = [(J + Cl^2)s^2 + fps + Cgl]U(s) \\
\frac{X(s)}{U(s)} &= \frac{(J + Cl^2)s^2 + fps + Cgl}{[(J + Cl^2)(M + C) - C^2 l^2]s^4 + [(J + Cl^2)fc + (M + C)fp]s^3 + [fpfc + (M + C)Cgl]s^2 + Cglfcs}
\end{aligned}$$

**Ecuación 13-3**

### 3.2. Controlador para carro del puente grúa

La función de transferencia del carro del puente grúa  $X(s)/U(s)$ , se encuentra en términos generales, para comprobar la estabilidad del sistema, se reemplazan los siguientes valores que son obtenidos de los manuales y planos que fueron entregados con el sistema.

Peso del carro (M) = 26000kg

Longitud del cable (l) = 70m

Límites del riel = 17m

Gravedad (g) = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Masa de la carga (C) = 150000kg max

Coefficiente fricción rotativa (fp) = 1

Coefficiente fricción carro (fc) = 0,006

Momento de inercia (J) = 1/3 Cl<sup>2</sup> = 2,45 x 10<sup>8</sup>

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{9,8x10^8s^2 + s + 1,03x10^8}{1,911x10^{13}s^4 + 6,056x10^6s^3 + 1,813x10^{13}s^2 + 618030s}$$

**Ecuación 14-3**

Para comprobar la estabilidad de la función de transferencia se usa el teorema de Routh – Hurwitz, el cual es usado para comprobar la estabilidad de sistemas de orden superior al de segundo grado.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{9,8x10^8s^2 + s + 1,03x10^8}{1,911x10^{13}s^4 + 6,056x10^6s^3 + 1,813x10^{13}s^2 + 618030s}$$

$S^4$	$1,911x10^{13}$	$1,813x10^{13}$	$0$
$S^3$	$6,056x10^6$	$618030$	$0$
$S^2$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$S$	$c_1$	$c_2$	
$S^0$	$d_1$		

$$b_1 = -\frac{\begin{vmatrix} 1,911x10^{13} & 1,813x10^{13} \\ 6,056x10^6 & 618030 \end{vmatrix}}{6,056x10^6} = -\frac{1,1811x10^{19} - 1,0979x10^{20}}{6,056x10^6} = 1,4936x10^{13}$$

$$b_2 = -\frac{\begin{vmatrix} 1,911x10^{13} & 0 \\ 6,056x10^6 & 0 \end{vmatrix}}{6,056x10^6} = 0$$

Reemplaza por E una variable positiva pequeña que tiende a 0

$$b_2 = 0 \Rightarrow E$$

$$b_3 = 0 \Rightarrow E$$

$$c_1 = -\frac{\begin{vmatrix} 6,056x10^6 & 618030 \\ 1,4936x10^{13} & E \end{vmatrix}}{1,4936x10^{13}} = -\frac{6,056x10^6E - 9,2309x10^{18}}{1,4936x10^{13}} = -4,0546x10^{-7}E + 618030,26$$

Como  $E \Rightarrow 0$  el valor de  $c_1$  es (+)



$$c_2 = - \frac{\begin{vmatrix} 6,056x10^6 & E \\ 1,4936x10^{13} & E \end{vmatrix}}{1,4936x10^{13}} = - \frac{6,056x10^6E - 1,4936x10^{13}E}{1,4936x10^{13}} = 0,99E$$

$$d_1 = - \frac{\begin{vmatrix} 1,4936x10^{13} & E \\ -4,0546x10^{-7}E + 618030,26 & 0,99E \end{vmatrix}}{-4,0546x10^{-7}E + 618030,26}$$

$$= - \frac{1,4936x10^{13}E + 4,0546x10^{-7}E^2 - 618030,26E}{-4,0546x10^{-7}E + 618030,26}$$

Como  $E \Rightarrow 0$  el valor de  $d_1$  es (+)

R/: siendo  $b_1, c_1, d_1$  (+) el sistema es estable

### 3.2.1. Función de transferencia a lazo abierto del carro del puente grúa

En el diseño del regulador para el carro testero se usa la función de transferencia (Ecuación 14-3), que anteriormente se comprobó su estabilidad, cuya relación es de la distancia de desplazamiento con respecto a la señal de entrada. El carro testero realiza el desplazamiento de Este a Oeste.

$$M_p = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{9,8x10^8s^2 + s + 1,03x10^8}{1,911x10^{13}s^4 + 6,056x10^6s^3 + 1,813x10^{13}s^2 + 618030s}$$

$$s_{num} = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4(9,8x10^8)(1,03x10^8)}}{2(9,8x10^8)}$$

$$s_{num} = -5,1020x10^{-10} \pm j 0,3242$$

$$M_p = \frac{(s + 5,1020x10^{-10} - j0,3242)(s + 5,1020x10^{-10} + j0,3242)}{s(s + 1,414x10^{-7} - j0,9739)(s + 1,414x10^{-7} + j0,9739)(s + 3,4091x10^{-8})}$$

**Ecuación 15-3**

Una vez encontradas las raíces de las ecuaciones (Ecuación 15-3) se procede a realizar los pasos para la evaluación de la función de transferencia. En el transcurso de los pasos se tiene una idea

del tipo de controlador necesario para obtener los resultados deseados en el funcionamiento del carro testero.

Se obtienen la cantidad de polos y ceros que tiene la función de transferencia:

$$N_p = 4 \quad N_z = 2$$

Una vez identificados los polos y ceros, se procede a realizar los pasos para la evaluación de la función de transferencia.

(1) # Ramas

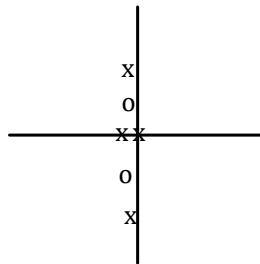
$$\max(N_p, N_z) = \max(4, 2) = 4 \text{ ramas}$$

(2) Puntos de salida y llegada

*ptos polos:*  $0$ ;  $-1,414 \times 10^{-7} + j0,9739$ ;  $-1,414 \times 10^{-7} - j0,9739$ ;  $-3,4091 \times 10^{-8}$

*ptos zeros:*  $-5,1020 \times 10^{-10} + j0,3242$ ;  $-5,1020 \times 10^{-10} - j0,3242$

(3) Eje Real



**Figura 5-3: Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

(4) Simetría

Obtenida en el apartado final

(5) Asíntotas

$$N_a = |N_p - N_z| = |4 - 2| = 2$$

$$\theta_a = \frac{(2q + 1)\pi}{N_a}$$

Donde  $q = 0,1,2, \dots, Na-1$

$$\theta_0 = \frac{(2(0) + 1)\pi}{2} = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

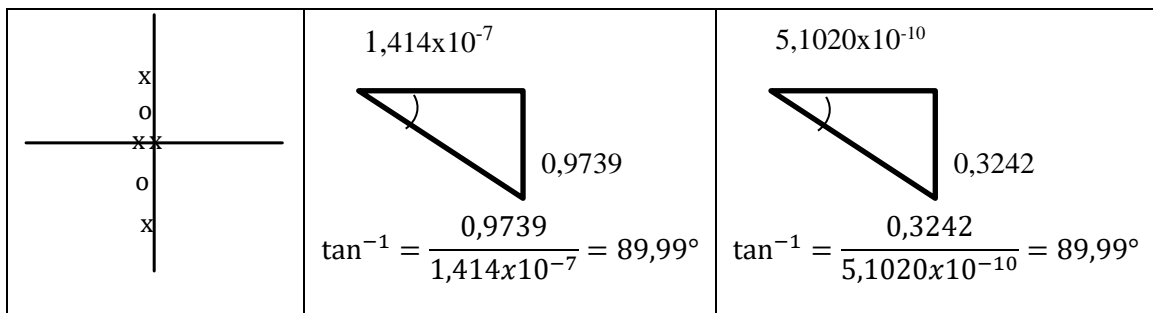
$$\theta_1 = \frac{(2(1) + 1)\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} = 270^\circ$$

(6) Centroide

$$\sigma_c = \frac{\sum p_i - \sum z_i}{Na} = \frac{(0 + 2(-1,414 \times 10^{-7}) - 3,4091 \times 10^{-8}) - 2(-5,1020 \times 10^{-10})}{2}$$

$$= -3,158 \times 10^{-7}$$

(7) Ángulos de salida y llegada



**Figura 6-3: Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Ángulo en el punto  $s=0$

$$\theta + 0 + 89,99 - 89,99 - (89,99 - 89,99) = 180$$

$$\theta = 180$$

Ángulo en el punto  $s = -1,414 \times 10^{-7} \pm j 0,09739$

$$\emptyset + 89,99 + 89,99 - 89,99 = 180$$

$$\emptyset = 90,01$$

Ángulo en el punto  $s = -3,4091 \times 10^{-8}$

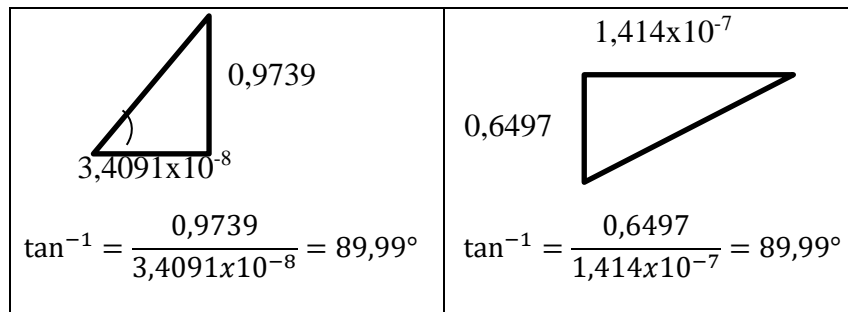
$$\emptyset + 180 + (89,99 - 89,99) - (89,99 - 89,99) = 180$$

$$\emptyset = 0$$

Ángulo en el punto  $s = -6,801 \times 10^{-9} \pm j 0,3743$

$$\phi + 90 + (180 - 89,99) + (180 - 89,99) = 180$$

$$\phi = -90,02 = 269,98$$



**Figura 7-3: Representación de los ángulos de llegada de los ceros desde los polos**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

(8) Punto de dispersión

$$\frac{dk}{ds} = 0$$

$$k = \frac{1}{F(s)} = \frac{1,911 \times 10^{13} s^4 + 6,056 \times 10^6 s^3 + 1,813 \times 10^{13} s^2 + 618030 s}{9,8 \times 10^8 s^4 + s + 1,03 \times 10^8}$$

$$\frac{dk}{ds} = \frac{3,7456 \times 10^{22} s^5 + 6,4332 \times 10^{15} s^4 + 7,8732 \times 10^{21} s^3 + 1,4228 \times 10^{15} s^2 + 3,7348 \times 10^{21} s + 6,3656 \times 10^{13}}{(9,8 \times 10^8 s^2 + s + 1,03 \times 10^8)^2}$$

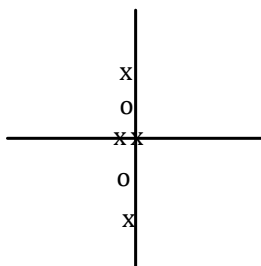
Para obtener el punto de dispersión, se usa únicamente la ecuación del numerador, en donde las raíces son los puntos que se pueden considerar el punto de dispersión, para este caso, el punto que se encuentre más cercano a 0.

$$3,7456 \times 10^{22} s^5 + 6,4332 \times 10^{15} s^4 + 7,8732 \times 10^{21} s^3 + 1,4228 \times 10^{15} s^2 + 3,7348 \times 10^{21} s + 6,3656 \times 10^{13} = 0$$

$$S_{1 \wedge 2} = -0,3246 \pm j 0,4857$$

$$S_{3 \wedge 4} = 0,3246 \pm j 0,4857$$

$$S_5 = -1,7044 \times 10^{-8} \quad \Rightarrow \text{Pto de dispersión}$$



**Figura 8-3: Representación de los polos y ceros del sistema**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 3.2.2. *Diseño del regulador del carro del puente grúa*

Para el diseño del regulador se toma en cuenta los siguientes requerimientos para las cuales se desea implementar el controlador, es decir, la mejora del funcionamiento del sistema que en este caso es el carro testero del puente grúa.

Requerimientos basados en el diseño de control:

$$t_s = \frac{\pi}{\sigma} \quad \text{Por diseño de control } \pm 5 \text{ del valor final}$$

$$t_r = \frac{\pi - \nu}{\omega_d}$$

$$\sigma = L\omega_n$$

$$\nu = \cos^{-1} L$$

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

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - L^2} = \sigma \tan \theta$$

$$K\omega_n^2 = \text{Numerador de la función de transferencia}$$

$$K = G(0)$$

$$M_p = e^{\frac{-L\pi}{\sqrt{1-L^2}}} = e^{-\pi/\tan \theta}$$

En este caso las condiciones relevantes para el diseño son: el tiempo de establecimiento ( $t_s$ ) y el error en régimen transitorio ( $M_p$ ). Por condiciones de diseño el valor de  $t_s$  se encuentra dentro

del rango de  $\pm 5\%$  del valor final, asumiendo sea igual a 1 tenemos un tiempo de estabilización igual a 1.05 segundo.

$M_p$  da el porcentaje en relación al valor final que establece la amplitud del primer pico de la señal de salida. Por las condiciones de trabajo del puente grúa y por el peso que es capaz de soportar se opta por un valor del 12% como error en estado transitorio.

Siendo  $t_s = 1,05$  y  $M_p = 12\%$

$$1,05 = \frac{\pi}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{\pi}{1,05} = 2,992$$

$$M_p = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$Wd = \delta \tan \theta$$

$$0,12 = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$= 2,992 \tan 55,98$$

$$= 4,4325$$

$$\ln(0,12) = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$-2,1202 = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi}{2,1202}$$

$$\theta = 55,98^\circ$$

$$\Rightarrow S = -2,992 \pm j 4,4325 \quad \text{Punto Dominante}$$

### 3.2.3. Control Proporcional ( $K_p$ )

Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 = 180$$

$$x_1 = \tan^{-1} \frac{(4,4325 - 0,9739)}{(2,992 - 1,414 \times 10^{-7})} = 49,14^\circ$$

$$\alpha_1 = 180 - 49,14^\circ = 130,86^\circ$$

$$x_2 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992} = 55,98^\circ$$

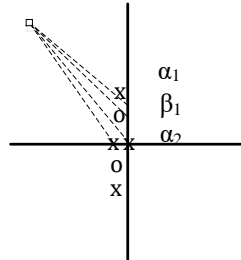
$$\alpha_2 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$x_3 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992 - 3,4091 \times 10^{-8}} = 55,98^\circ$$

$$\alpha_3 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \frac{(4,4325 - 0,3252)}{2,992 - 5,1020 \times 10^{-10}} = 53,93^\circ$$

$$\beta_1 = 180 - 53,93^\circ = 126,07^\circ$$



**Figura 9-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$\begin{aligned} |k_p| &= \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - 8i|} = \frac{|s| |s + 1,414 \times 10^{-7} \pm j 0,9739| |s + 3,4091 \times 10^{-8}|}{|s + 5,1020 \times 10^{-10} \pm j 0,3242|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j 4,4325| |-2,992 \pm j 4,4325 + 1,414 \times 10^{-7} \pm j 0,9739| |-2,992 \pm j 4,4325 + 3,4091 \times 10^{-8}|}{|-2,992 \pm j 4,4325 + 5,1020 \times 10^{-10} \pm j 0,3242|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j 4,4325| |-2,992 \pm j 5,4064| |-2,992 \pm j 4,4325|}{|-2,992 \pm j 4,7567|} \\ &= \frac{(5,3478)(6,1791)(5,3478)}{5,6195} = 31,45 \end{aligned}$$

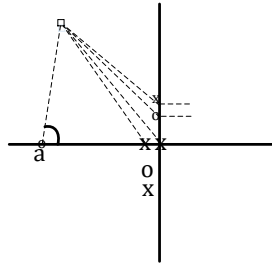
**Ecuación 16-3**

Comprobando el valor del error

$$e_p = \frac{1}{1 + k_p} = \frac{1}{1 + 31,45} = 0,031 \approx 3,1\%$$

**Ecuación 17-3**

### 3.2.4. Controlador Proporcional Derivativo ( $PD = k_{PD}(s + a)$ )



**Figura 10-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 - \beta_2 = 180$$

$$130,86 + 124,02 + 124,02 - 126,07 - \beta_2 = 180$$

$$\beta_2 = 72,83$$

$$\tan \beta_2 = \frac{4,4325}{a - 2,992}$$

$$a = \frac{4,4325}{\tan 72,83} + 2,992 = 4,3615$$

$$k_{PD} = \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - 8i|} = 31,45 \frac{1}{|s + 4,3615|} = 31,45 \frac{1}{|-2,992 \pm j4,4325 + 4,3615|}$$

$$k_{PD} = 31,45 \frac{1}{(4,6392)} = 6,779$$

$$PD = 6,779(s + 4,3625)$$

**Ecuación 18-3**

$$e_{PD} = \frac{1}{1 + kp} \leq 6\%$$

$$k_{PD} \geq \frac{1}{0,06} - 1$$

$$k_{PD} \geq 15,67$$



**3.2.5. Controlador Proporcional Integral (PI =  $\frac{k_{PI}(s+b)}{s}$ )**

$$b = \frac{1}{6}\sigma = \frac{1}{6}(2,992)$$

$$b = 0,4987$$

$$k_{PI} = \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - zi|} = \frac{6,779 |s + 0|}{|s + 0,4987|} = \frac{6,779 |-2,992 \pm j 4,4325|}{|-2,992 \pm j 4,4325 + 0,4987|}$$

$$k_{PI} = \frac{6,779 (5,3478)}{5,0856} = 7,129$$

$$PI = \frac{7,129(s + 0,4987)}{s}$$

**Ecuación 19-3**

**3.2.6. Control Proporcional Integral Derivativo PID =  $\frac{k_{PI}(s+b)(s+a)}{s}$**

$$PID = \frac{7,129(s + 0,4987)(s + 4,3625)}{s} = R(s)$$

**Ecuación 20-3**

Es suficiente con un PD para el controlador, la parte integral elimina el error, pero inestabiliza el sistema.

**3.3. Controlador para Gancho 150T**

La función de transferencia del gancho de 150T del puente grúa  $\theta(s)/U(s)$ , se encuentra en términos generales, para comprobar la estabilidad del sistema se reemplazan los siguientes valores que son obtenidos de los manuales y planos que fueron entregados con el sistema.

Peso del carro (M) = 26000kg

Longitud del cable (l) = 70m

Límites del riel = 17m

Gravedad (g) = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Masa de la carga (c) = 150000kg

Coefficiente fricción rotativa (fp) = 1

Coefficiente fricción carro (fc) = 0,006

Momento de inercia (J) = 1/3 Cl<sup>2</sup> = 2,45 x 10<sup>8</sup>

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1,05x10^7 s^2}{1,294x10^{14} s^4 + 6,056x10^6 s^3 + 1,813x10^{13} s^2 + 618030 s}$$

**Ecuación 21-3**

Al igual que en el controlador para el carro testero se comprueba la estabilidad de la función de transferencia de orden superior al de segundo grado usando el teorema de Routh – Hurwitz.

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1,05x10^7 s^2}{1,294x10^{14} s^4 + 6,056x10^6 s^3 + 1,813x10^{13} s^2 + 618030 s}$$

S <sup>4</sup>	1,294x10 <sup>14</sup>	1,813x10 <sup>13</sup>	0
S <sup>3</sup>	6,056x10 <sup>6</sup>	618030	0
S <sup>2</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>
S	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	
S <sup>0</sup>	d <sub>1</sub>		

$$b_1 = -\frac{\begin{vmatrix} 1,294x10^{14} & 1,813x10^{13} \\ 6,056x10^6 & 618030 \end{vmatrix}}{6,056x10^6} = -\frac{7,9973x10^{19} - 1,0979x10^{20}}{6,056x10^6} = 4,9235x10^{12}$$

$$b_2 = -\frac{\begin{vmatrix} 1,294x10^{14} & 0 \\ 6,056x10^6 & 0 \end{vmatrix}}{6,056x10^6} = 0$$

Reemplaza por E una variable positiva pequeña que tiende a 0

$$b_2 = 0 \quad \Rightarrow E$$

$$b_3 = 0 \quad \Rightarrow E$$

$$c_1 = - \frac{\begin{vmatrix} 6,056x10^6 & 618030 \\ 4,9235x10^{12} & E \end{vmatrix}}{4,9235x10^{12}} = - \frac{6,056x10^6 E - 3,0429x10^{18}}{4,9235x10^{12}}$$

$$= -1,23x10^{-6}E + 618035,95$$

Como  $E \Rightarrow 0$  el valor de  $C_1$  es (+)

$$c_2 = - \frac{\begin{vmatrix} 6,056x10^6 & E \\ 4,9235x10^{12} & E \end{vmatrix}}{4,9235x10^{12}} = - \frac{6,056x10^6 E - 4,9235x10^{12} E}{4,9235x10^{12}} = 0,99E$$

$$d_1 = - \frac{\begin{vmatrix} 4,9235x10^{12} & E \\ -1,23x10^{-6}E + 618035,95 & 0,99E \end{vmatrix}}{-1,23x10^{-6}E + 618035,95}$$

$$= - \frac{4,9235x10^{12}E + 1,23x10^{-6}E^2 - 618035,95E}{-1,23x10^{-6}E + 618035,95}$$

Como  $E \Rightarrow 0$  el valor de  $d_1$  es (+)

R/: siendo  $b_1, c_1, d_1$  (+) el sistema es estable

### 3.3.1. Función de transferencia a lazo abierto del gancho de 150T

La función de transferencia tiene la relación del pandeo ocasionado por el desplazamiento del carro testero y la señal de entrada hacia el control de los ganchos.

$$Mp = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1,05x10^7 s^2}{1,294x10^{14} s^4 + 6,056x10^6 s^3 + 1,813x10^{13} s^2 + 618030s}$$

$$Mp = \frac{1,05x10^7 s^2}{s(s + 6,3620x10^{-9} - j 0,3744)(s + 6,3620x10^{-9} + j 0,3744)(s + 3,4091x10^{-8})}$$

**Ecuación 22-3**

Una vez encontradas las raíces del numerador y del denominador (polos y ceros) se procede a hacer la evaluación de la función de transferencia como se lo realizó anteriormente.

$$Np = 4 \quad Nz = 2$$

(1) # Ramas

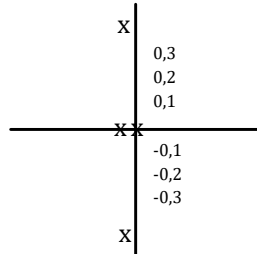
$$\max(Np, Nz) = \max(4, 2) = 4 \text{ ramas}$$

(2) Puntos de salida y llegada

ptos polos:  $0; -6,3620 \times 10^{-9} + j0,3744; -6,3620 \times 10^{-9} - j0,3744; -3,4091 \times 10^{-8}$

ptos zeros: 0

(3) Eje Real



**Figura 11-3: Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

(4) Simetría

Obtenida en el apartado final

(5) Asíntotas

$$N_a = |N_p - N_z| = |4 - 2| = 2$$

$$\theta_a = \frac{(2q + 1)\pi}{N_a}$$

Donde  $q = 0, 1, 2, \dots, N_a - 1$

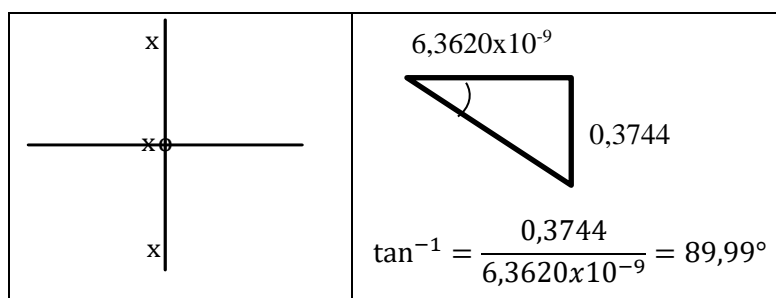
$$\theta_0 = \frac{(2(0) + 1)\pi}{2} = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

$$\theta_1 = \frac{(2(1) + 1)\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} = 270^\circ$$

(6) Centroide

$$\sigma_c = \frac{\sum p_i - \sum z_i}{N_a} = \frac{[(0 + 2(-6,3620 \times 10^{-9}) - 3,4091 \times 10^{-8}) - 0]}{2} = -2,3408 \times 10^{-8}$$

(7) Ángulos de salida y llegada



**Figura 12-3: Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Ángulo en el punto  $s=0$

$$\emptyset + 0 + (89,99 + 89,99) - 0 = 180$$

$$\emptyset = 0,02$$

Ángulo en el punto  $s = -3,1192 \times 10^{-8} \pm j0,3744$

$$\emptyset + 0 + 89,99 = 180$$

$$\emptyset = 90,01^\circ$$

Ángulo en el punto  $s = -3,4091 \times 10^{-8}$

$$\emptyset + 0 + (89,99) + 0 - 89,99 = 180$$

$$\emptyset = 180^\circ$$

(8) Pto de dispersión

$$\frac{dk}{ds} = 0$$

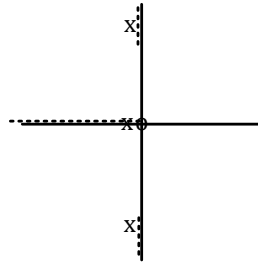
$$k = \frac{1}{F(s)} = \frac{1,294 \times 10^{14} s^4 + 6,056 \times 10^6 s^3 + 1,813 \times 10^{13} s^2 + 618030 s}{1,05 \times 10^7 s^2}$$

$$\frac{dk}{ds} = \frac{2,588 \times 10^{13} s^3 + 605600 s^2 - 61803}{1,05 \times 10^6 s^2}$$

$$2,588 \times 10^{13} s^3 + 605600 s^2 - 61803 = 0$$

$$S_1 = -1,3366 \times 10^{-3} \quad \Rightarrow \text{Pto de dispersión}$$

$$S_{2,3} = 6,6831 \times 10^{-4} \pm j 1,1576 \times 10^{-3}$$



**Figura 13-3: Representación de los polos y ceros del sistema**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 3.3.2. Diseño del regulador del gancho de 150T

Para el diseño del regulador del gancho de 150T se toma en cuenta los siguientes requerimientos para las cuales se desea implementar el controlador, es decir, la mejorar el funcionamiento del sistema.

Requerimientos basados en diseño de controladores:

$$t_s = \frac{\pi}{\sigma}$$

$$t_r = \frac{\pi - \nu}{\omega_d}$$

$$\sigma = L\omega_n$$

$$\nu = \cos^{-1} L$$

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

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - L^2} = \sigma \tan \theta$$

$$K\omega_n^2 = \text{Numerador de la función de transferencia}$$

$$K = G(0)$$

$$M_p = e^{\frac{-L\pi}{\sqrt{1-L^2}}} = e^{-\pi/\tan \theta}$$

Asumiendo  $t_s = 1,05$  seg

$$1,05 = \frac{\pi}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{\pi}{1,05} = 2,992$$

$$Mp = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$0,12 = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$\ln(0,12) = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$-2,1202 = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi}{2,1202}$$

$$\theta = 55,98^\circ$$

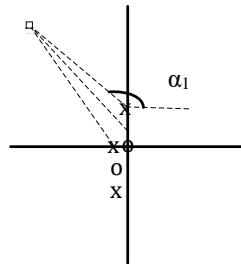
$$Wd = \delta \tan \theta$$

$$= 2,992 \tan 55,98$$

$$= 4,4325$$

$$\Rightarrow S = -2,992 \pm j4,4325 \quad \text{Punto Dominante}$$

### 3.3.3. Control proporcional ( $K_p$ )



**Figura 14-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 = 180$$

$$x_1 = \tan^{-1} \frac{(4,4325 - 0,3744)}{(2,992 - 6,3620 \times 10^{-9})} = 53,59^\circ$$

$$\alpha_1 = 180 - 53,59^\circ = 126,41^\circ$$

$$x_2 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992} = 55,98^\circ$$

$$\alpha_2 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$x_3 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992 - 3,4091 \times 10^{-8}} = 55,98^\circ$$

$$\alpha_3 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$\beta_1 = 124,02^\circ$$

$$\begin{aligned} |k_p| &= \frac{\prod |s - p_i|}{\prod |s - z_i|} = \frac{|s + 6,3620 \times 10^{-9} \pm j0,3744| |s + 3,4091 \times 10^{-8}| |s|}{|s| |s|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j4,4325 + 6,3620 \times 10^{-9} \pm j0,3744| |-2,992 \pm j4,4325 + 3,4091 \times 10^{-8}| |-2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j4,8069| |-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|} \\ &= \frac{(5,6620)(5,3478)(5,3478)}{(5,3478)(5,3478)} = 5,6620 \end{aligned}$$

**Ecuación 23-3**

Comprobando el valor del error

$$e_p = \frac{1}{1 + k_p} = \frac{1}{1 + 5,6620} = 0,15 \approx 15\%$$

### 3.3.4. Controlador Proporcional Derivativo ( $PD = k_{PD}(s + a)$ )

Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 - \beta_2 = 180$$

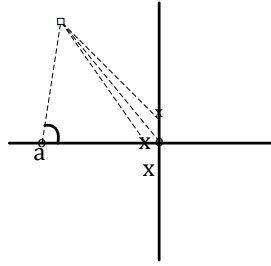
$$126,41 + 124,02 + 124,02 - 124,02 - \beta_2 = 180$$

$$\beta_2 = 70,43$$

$$\tan \beta_2 = \frac{4,4325}{a - 2,992}$$

$$a = \frac{4,4325}{\tan 70,43} + 2,992 = 4,5677$$





**Figura 15-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$k_{pD} = \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - zi|} = 5,6620 \frac{1}{|s + 4,5677|} = 5,6620 \frac{1}{|-2,992 \pm j4,4325 + 4,5677|}$$

$$= 5,6620 \frac{1}{|1,5757 \pm j4,4325|} = \frac{5,6620}{4,7042} = 1,2036$$

$$PD = 1,2036(s + 4,5677)$$

**Ecuación 24-3**

$$e_{pD} = \frac{1}{1 + k_p} \leq 6\%$$

$$k_{pD} \geq \frac{1}{0,06} - 1$$

$$k_{pD} \geq 15,67$$

### 3.3.5. Controlador Proporcional Integral ( $PI = \frac{k_{PI}(s+b)}{s}$ )

$$b = \frac{1\sigma}{6} = \frac{1}{6}(2,992)$$

$$b = 0,4987$$

$$k_{PI} = \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - zi|} = \frac{1,2036 |s|}{|s + 0,4987|} = \frac{1,2036 |-2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j0,4325 + 0,4987|}$$

$$k_{PI} = \frac{1,2036 (5,3478)}{5,0856} = 1,2657$$

$$PI = \frac{1,2657(s + 0,4987)}{s}$$

**Ecuación 25-3**

**3.3.6. Controlador Proporcional Integral Derivativo PID =  $\frac{k_{PI}(s+b)(s+a)}{s}$**

$$PID = \frac{1,2657(s + 0,4987)(s + 4,5677)}{s} = R(s)$$

**Ecuación 26-3**

### **3.4. Controlador para Gancho Auxiliar 15T**

Obteniendo la función de transferencia del gancho de 15T del puente grúa  $\theta(s)/U(s)$ , se comprueba la estabilidad del sistema reemplazando los siguientes valores que son obtenidos de los manuales y planos que fueron entregados con el sistema.

Peso del carro (M) = 26000kg

Longitud del cable (l) = 70m

Límites del riel = 17m

Gravedad (g) = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Masa de la carga (c)= 15000kg

Coefficiente fricción rotativa (fp) = 1

Coefficiente fricción carro (fc) = 0,006

Momento de inercia (J) = 1/3 Cl<sup>2</sup> = 2,45 x 10<sup>6</sup>

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1,05 \times 10^6 s^2}{3,014 \times 10^{12} s^4 + 6,29 \times 10^5 s^3 + 4,223 \times 10^{11} s^2 + 61803 s}$$

**Ecuación 27-3**

Aplicando Routh – Hurwitz a  $\theta(s)/U(s)$

$$\begin{array}{rcccc}
S^4 & 3,014x10^{12} & 4,223x10^{11} & 0 \\
S^3 & 6,29x10^5 & 61803 & 0 \\
S^2 & b_1 & b_2 & b_3 \\
S & c_1 & c_2 & \\
s^0 & d_1 & & 
\end{array}$$

$$b_1 = -\frac{\begin{vmatrix} 3,014x10^{12} & 4,223x10^{11} \\ 6,29x10^5 & 61803 \end{vmatrix}}{6,29x10^5} = -\frac{1,8627x10^{17} - 2,6563x10^{17}}{6,29x10^5} = 1,2617x10^{11}$$

$$b_2 = -\frac{\begin{vmatrix} 3,014x10^{12} & 61803 \\ 1,2617x10^{11} & \epsilon \end{vmatrix}}{6,29x10^5} = 0$$

Reemplaza por E una variable positiva pequeña que tiende a 0

$$b_2 = 0 \quad \Rightarrow E$$

$$b_3 = 0 \quad \Rightarrow E$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= -\frac{\begin{vmatrix} 6,29x10^5 & 61803 \\ 1,2617x10^{11} & E \end{vmatrix}}{1,2617x10^{11}} = -\frac{6,29x10^5 E - 7,7977x10^{15}}{1,2617x10^{11}} \\
&= -5,4688x10^{-6}E + 61803,12
\end{aligned}$$

Como E  $\Rightarrow$  0 el valor de  $c_1$  es (+)

$$c_2 = -\frac{\begin{vmatrix} 6,29x10^5 & E \\ 1,2617x10^{11} & E \end{vmatrix}}{1,2617x10^{11}} = -\frac{6,29x10^5 E - 1,2617x10^{11} E}{1,2617x10^{11}} = 0,99E$$

$$\begin{aligned}
d_1 &= -\frac{\begin{vmatrix} 1,2617x10^{11} & E \\ -5,4688x10^{-6}E + 61803,12 & 0,99E \end{vmatrix}}{-5,4688x10^{-6}E + 61803,12} \\
&= -\frac{1,2617x10^{11}E + 5,4688x10^{-6}E^2 - 61803,12E}{-5,4688x10^{-6}E + 61803,12}
\end{aligned}$$

Como E  $\Rightarrow$  0 el valor de  $d_1$  es (+)

R/: siendo  $b_1, c_1, d_1$  (+) el sistema es estable

### 3.4.1. Función de transferencia a Lazo Abierto para Gancho 15T

$$Mp = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1,05 \times 10^6 s^2}{3,014 \times 10^{12} s^4 + 6,29 \times 10^5 s^3 + 4,223 \times 10^{11} s^2 + 61803 s}$$

$$Mp = \frac{1,05 \times 10^6 s^2}{s(s + 3,1192 \times 10^{-8} - j0,3744)(s + 3,1192 \times 10^{-8} + j0,3744)(s + 1,4634 \times 10^{-7})}$$

**Ecuación 28-3**

$$Np = 4 \quad Nz = 2$$

(1) # Ramas

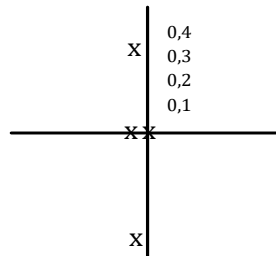
$$\max(Np, Nz) = \max(4, 2) = 4 \text{ ramas}$$

(2) Puntos de salida y llegada

$$\text{ptos polo: } 0; -3,1192 \times 10^{-8} + j0,3744; -3,1192 \times 10^{-8} - j0,3744; -1,4634 \times 10^{-7}$$

$$\text{ptos zeros: } 0$$

(3) Eje Real



**Figura 16-3: Ubicación de los polos y ceros de la función de transferencia**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

(4) Simetría

Obtenida en el apartado final

(5) Asíntotas

$$Na = |Np - Nz| = |4 - 2| = 2$$

$$\theta_a = \frac{(2q + 1)\pi}{Ma}$$

Donde  $q = 0, 1, 2, \dots, Na^{-1}$

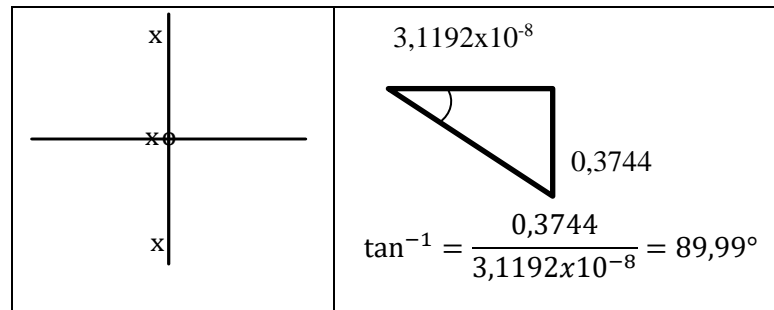
$$\theta_0 = \frac{(2(0) + 1)\pi}{2} = \frac{\pi}{2} = 90^\circ$$

$$\theta_1 = \frac{(2(1) + 1)\pi}{2} = \frac{3\pi}{2} = 270^\circ$$

(6) Centroide

$$\sigma_c = \frac{\sum p_i - \sum z_i}{Na} = \frac{[(0 + 2(-3,1192 \times 10^{-8}) - 1,4634 \times 10^{-7}) - 0]}{2} = -1,0436 \times 10^{-7}$$

(7) Ángulos de salida y llegada



**Figura 17-3: Representación de los ángulos de salida de los polos hacia los ceros**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Ángulo en el punto  $s=0$

$$\phi + 0 + (89,99 + 89,99) - 0 = 180$$

$$\phi = 0,02^\circ$$

Ángulo en el punto  $s = -3,1192 \times 10^{-8} \pm j0,3744$

$$\phi + 0 + 89,99 - 0 = 180$$

$$\phi = 90,01^\circ$$

Ángulo en el punto  $s = -1,4634 \times 10^{-7}$

$$\phi + 0 + (89,99) + 0 - 89,99 = 180$$

$$\phi = 180^\circ$$

(8) Punto de dispersión

$$\frac{dk}{ds} = 0$$

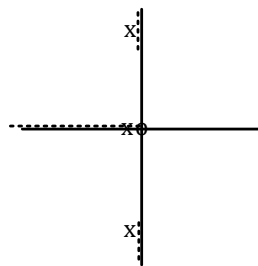
$$k = \frac{1}{F(s)} = \frac{3,014 \times 10^{12} s^4 + 6,29 \times 10^5 s^3 + 4,223 \times 10^{11} s^2 + 61803 s}{1,05 \times 10^6 s^2}$$

$$\frac{dk}{ds} = \frac{6,028 \times 10^{12} s^3 + 6,29 \times 10^5 s^2 - 61803}{1,05 \times 10^6 s^2}$$

$$6,028 \times 10^{12} s^3 + 6,29 \times 10^5 s^2 - 61803 = 0$$

$$S_1 = -2,1725 \times 10^{-3} \quad \Rightarrow \text{Pto de dispersión}$$

$$S_{2,3} = 1,0862 \times 10^3 \pm j 1,8814 \times 10^{-3}$$



**Figura 18-3: Representación de los polos y ceros del sistema**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

### 3.4.2. Diseño del regulador del gancho de 15T

Dentro de los requerimientos para el diseño del regulador del gancho de 15T se toma en cuenta los siguientes datos para implementar el controlador, es decir, la mejorar el funcionamiento del sistema.

Requerimientos basados en diseño de controladores:

$$ts = \frac{\pi}{\sigma}$$

$$ts = \frac{\pi - v}{\omega d}$$

$$\sigma = LWn$$

$$v = \cos^{-1} L$$

$$t_p = \frac{\pi}{Wd}$$

$$Wd = Wn\sqrt{1-L^2} = \sigma \tan \theta$$

$KWn^2 =$  Numerador de la función de transferencia

$$K = G(0)$$

$$M_p = e^{\frac{-L\pi}{\sqrt{1-L^2}}} = e^{-\pi/\tan \theta}$$

Asumiendo  $t_s = 1,05$  seg

$$1,05 = \frac{\pi}{\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{\pi}{1,05} = 2,992$$

$$M_p = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$Wd = \sigma \tan \theta$$

$$= 2,992 \tan 55,98^\circ$$

$$0,12 = e^{-\frac{\pi}{\tan \theta}}$$

$$= 4,4325$$

$$\ln(0,12) = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$-2,1202 = -\frac{\pi}{\tan \theta}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\pi}{2,1202}$$

$$\theta = 55,98^\circ$$

$$\Rightarrow S = -2,992 \pm j 4,4325 \quad \text{Punto Dominante}$$

### 3.4.3. Control Proporcional ( $K_p$ )

Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 = 180$$

$$x_1 = \tan^{-1} \frac{(4,4325 - 0,3744)}{(2,992 - 3,1192 \times 10^{-8})} = 53,59^\circ$$

$$\alpha_1 = 180 - 53,59^\circ = 126,41^\circ$$

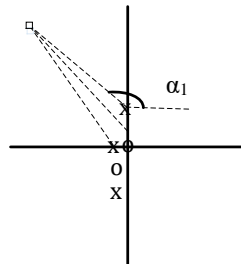
$$x_2 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992} = 55,98^\circ$$

$$\alpha_2 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$x_3 = \tan^{-1} \frac{4,4325}{2,992 - 1,4634 \times 10^{-7}} = 55,98^\circ$$

$$\alpha_3 = 180 - 55,98^\circ = 124,02^\circ$$

$$\beta_1 = 124,02^\circ$$



**Figura 19-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$\begin{aligned} |k_p| &= \frac{\prod |s - p_i|}{\prod |s - z_i|} = \frac{|s + 3,1192 \times 10^{-8} \pm j0,3744| |s + 1,4634 \times 10^{-7}| |s|}{|s| |s|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j4,4325 + 3,1192 \times 10^{-8} \pm j0,3744| |-2,992 \pm j4,4325 + 1,4634 \times 10^{-7}| |2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|} \\ &= \frac{|-2,992 \pm j4,8069| |-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j4,4325| |-2,992 \pm j4,4325|} \\ &= \frac{(5,6620)(5,3478)(5,3478)}{(5,3478)(5,3478)} = 5,662 \end{aligned}$$

**Ecuación 29-3**

Comprobando el valor del error

$$e_p = \frac{1}{1 + k_p} = \frac{1}{1 + 5,6620} = 0,15 \approx 15\%$$

#### 3.4.4. Controlador Proporcional Derivativo ( $PD = k_{pD}(s + a)$ )

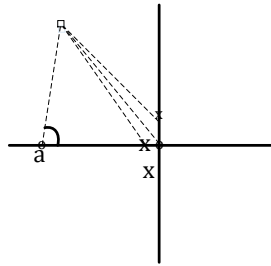
Criterio del Argumento

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 - \beta_1 - \beta_2 = 180$$



$$126,41 + 124,02 + 124,02 - 124,02 - \beta_2 = 180$$

$$\beta_2 = 70,43$$



**Figura 20-3: Polos, ceros y el punto dominante del control proporcional derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

$$\tan \beta_2 = \frac{4,4325}{a - 2,992}$$

$$a = \frac{4,4325}{\tan 70,43} + 2,992 = 4,5677$$

$$k_{PD} = \frac{\prod |s - p_i|}{\prod |s - z_i|} = 5,662 \frac{1}{|s + 4,5677|} = 5,662 \frac{1}{|-2,992 \pm j4,4325 + 4,5677|}$$

$$= 5,6620 \frac{1}{|1,5757 \pm j4,4325|} = \frac{5,662}{4,7042} = 1,2036$$

$$PD = 1,2036(s + 4,5677)$$

**Ecuación 30-3**

$$e_{pD} = \frac{1}{1 + k_p} \leq 15\%$$

$$k_{pD} \geq \frac{1}{0,15} - 1$$

$$k_{pD} \geq 5,667$$

**3.4.5. Controlador Proporcional Integral (PI =  $\frac{k_{PI}(s+b)}{s}$ )**

$$b = \frac{1\sigma}{6} = \frac{1}{6}(2,992)$$

$$b = 0,4987$$

$$k_{PI} = \frac{\prod |s - pi|}{\prod |s - zi|} = 1,2036 \frac{|s|}{|s + 0,4987|} = 1,2036 \frac{|-2,992 \pm j4,4325|}{|-2,992 \pm j0,4325 + 0,4987|}$$

$$= 1,2036 \frac{(5,3478)}{5,0856} = 1,2657$$

$$PI = \frac{1,2657(s + 0,4987)}{s}$$

**Ecuación 31-3**

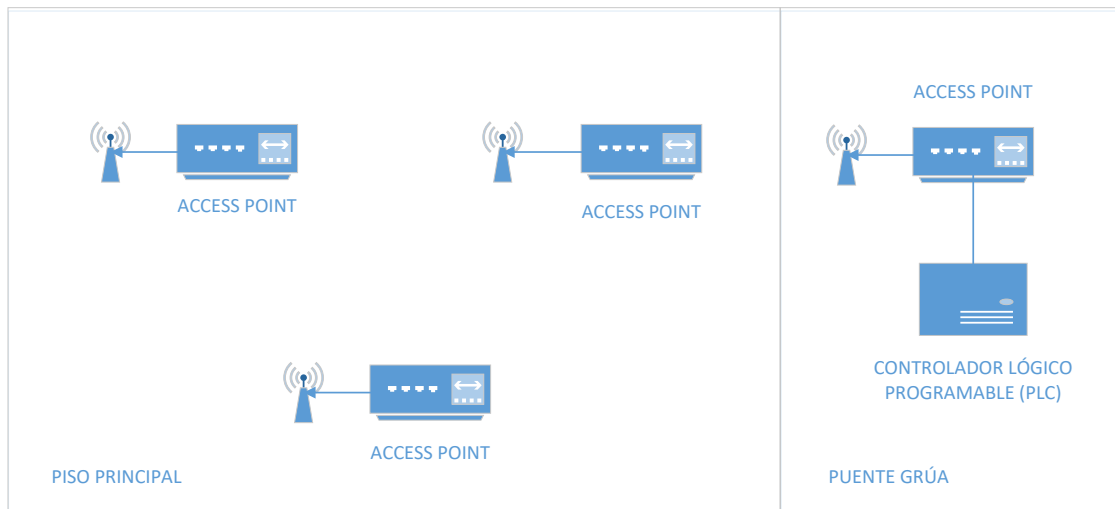
**3.4.6. Controlador Proporcional Integral Derivativo PID =  $\frac{k_{PI}(s+b)(s+a)}{s}$**

$$PID = \frac{1,2657(s + 0,4987)(s + 4,5677)}{s} = R(s)$$

**Ecuación 32-3**

**3.5. Diseño de la Red Inalámbrica**

Los equipos inalámbricos existentes en el mercado proveen un diseño para satisfacer las necesidades de los distintos ambientes industriales. Para este diseño se ha iniciado con el croquis de la red inalámbrica, cuya propuesta es la Figura 21-3.



**Figura 21-3: Distribución de los equipos de la red inalámbrica**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Los equipos (receptor y transmisor) tienen la tecnología para construir una red inalámbrica con la robustez necesaria para trabajos técnicos; el estándar IEEE 802.11 nos garantiza que los equipos funcionen en ambientes industriales con un ancho de banda desde 2,4 a 5 GHz. Por la distribución de los equipos en el área del piso principal de casa de máquinas, los dispositivos tienen una transmisión MIMO que permite enviar y recibir datos, además, los dispositivos tienen un grado de protección de IP 67 volviéndoles resistentes al polvo, humedad y líquidos a causa de las filtraciones de agua existentes en el piso principal.

Considerando el medio físico en el que se va a encontrar la red inalámbrica, se toma en cuenta que en el piso principal de casa de máquinas de la Central Agoyán, existe ruido con un valor máximo de 81dB. Este valor es un promedio de datos obtenidos usando un equipo que mide el nivel de ruido en el ambiente, también conocido como sonómetro. Semestralmente se toman mediciones hechas por el área de Seguridad Industrial y Salud Ocupacional de CELEC EP Hidroagoyán con el propósito de mantener las buenas condiciones físicas del personal que se encuentra expuestos a estos niveles de ruido.

El nivel de ruido de 81dB es medido en el piso principal de casas de máquinas que es producido cuando se encuentran generando las 2 unidades, por lo tanto, se realiza el estudio de la relación señal – ruido. Siendo  $1\text{dB}=0,001\text{dBm}$ , por lo tanto,  $81\text{dB} = 0,081\text{dBm}$ .

La medición en dB representa la ganancia de la potencia que el dispositivo tiene, es decir, al tener como potencia 20dBm significa que la potencia de la señal es aumentada 20 veces a la normal de la señal transmitida por el equipo. Por lo tanto, debemos pasar el valor de dB a W y continuar con el análisis de la ecuación.

$$P' = 10 \log\left(\frac{P}{1mW}\right)$$

$$P = \log^{-1}\left(\frac{P' + 10\log 1mW}{10}\right)$$

**Ecuación 33-3**

Entonces para 0,081dBm tenemos:

$$Pn = \log^{-1}\left(\frac{0,081 + 10\log 0,001}{10}\right)$$

$$Pn = 0.00188 W$$

**Ecuación 34-3**

Para 20dBm tenemos:

$$Ps = \log^{-1}\left(\frac{20 + 10\log 0,001}{10}\right)$$

$$Ps = 0.1 W$$

**Ecuación 35-3**

Reemplazando los valores de las ecuaciones 34-3 y 35-3 en la ecuación 2-2, obtenemos:

$$SNR = 10 \log(0,1) - 10\log(0,00188)$$

$$SNR = 17.258 dB$$

**Ecuación 36-3**

Debido a la distancia que se encuentra el transmisor móvil de los receptores; se especifica las pérdidas en la trayectoria en espacio libre; reemplazando los valores en la ecuación 3-2 obtenemos:

$$Lp = 20 \left( \log \frac{4\pi}{3 \times 10^8} + \log(2,4 \times 10^9) + \log 17 \right)$$

$$Lp = 20(-7,3779 + 9,3802 + 1,2304)$$

$$Lp = 64.654 dB$$

**Ecuación 37-3**

Al tratarse de una red inalámbrica se procede a comprobar la propagación de la señal en el espacio libre; usando la distancia máxima, mínima a la que se puede encontrar el transmisor, la distancia total de la cobertura del puente grúa y al ancho de banda a la que trabaja la red inalámbrica, se calcula la Zona de Fresnel obteniendo como resultado lo siguiente:

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{d_1 \times d_2}{d \times f}}$$

$$r = 17,32 \sqrt{\frac{0,002 \times 0,015}{0,017 \times 2,4}}$$

$$r = 17,32(0,0157)$$

$$r = 0,2712 \text{ m}$$

**Ecuación 38-3**

Al ser el medio de transmisión el aire, existe la posibilidad de que se encuentren objetos obstruyendo la transmisión, disminuyendo la comunicación entre el receptor y el transmisor. Por lo tanto, para el análisis es necesario el cálculo del primer radio de la zona de Fresnel, obtenido en la siguiente ecuación:

$$r_1 = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}}$$

$$r_1 = 8,657 \sqrt{\frac{0,017}{2,4}}$$

$$r_1 = 1,6626 \text{ m}$$

**Ecuación 39-3**

## CAPÍTULO IV

### 4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

#### 4.1. Simulación del Controlador

##### 4.1.1. Controlador del Carro Testero del Puente Grúa

Con las ecuaciones obtenidas en el capítulo 3, en donde se especificó el modelo matemático del puente grúa. Es necesaria la simulación del modelo inicial para poder comprobar la estabilidad de la máquina sin un controlador. Para la simulación del controlador se usa un software matemático (MATLAB) en el cuál se usa la función de transferencia con una entrada tipo impulso.

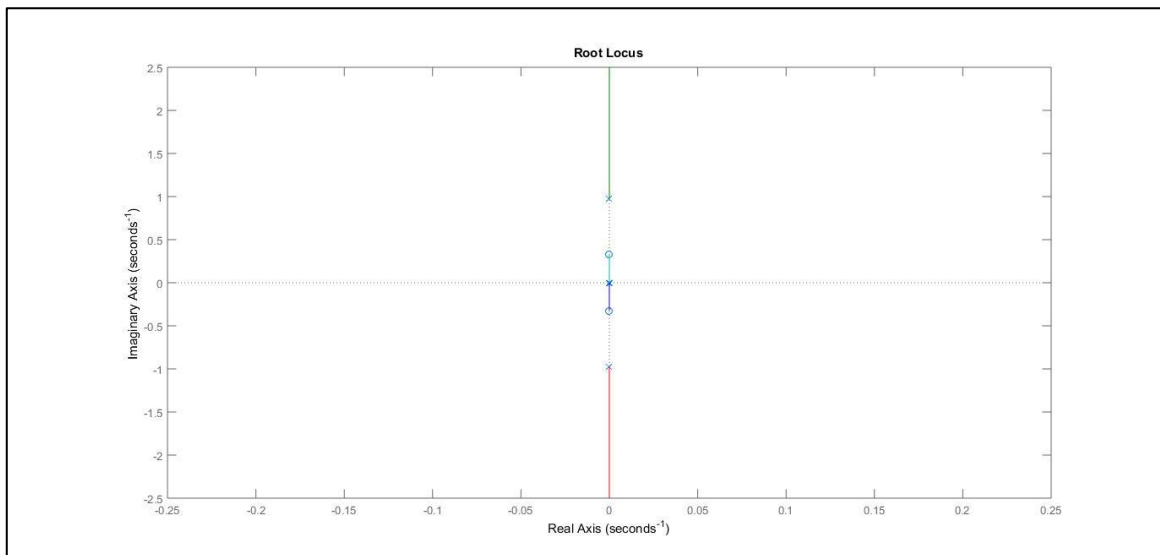
La simulación se la realiza en la ventana de comandos de Matlab, donde se digita las siguientes líneas de código consiguiendo los datos del comportamiento del carro testero en condiciones normales e incrementado el controlador diseñado:

```
% Desplazamiento del Carro Testero
clear all, clc, format short e
M=26000; %peso del carro
l=70; %longitud del cable
g=9.81; %gravedad
C=150000; %peso de la carga
fp=1; %coeficiente de fricción rotativa
fc=0.006; %coeficiente de fricción carro
j=(C*(l^2))/3; %momento de inercia
OU=tf([C*l 0 0],[(j+(C*(l^2))*(M+C)) (j+(C*(l^2)))*fc+((M+C)*fp)
(fp*fc)+(C*g*l*(M+C)) C*g*l*fc 0])
po=roots(OU.den{1});
zo=roots(OU.num{1});
XU=tf([j+(C*(l^2)) fp C*g*l],[(j+(C*(l^2))*(M+C))-((C^2)*(l^2))
(j+(C*(l^2)))*fc+((M+C)*fp) (fp*fc)+(C*g*l*(M+C)) C*g*l*fc 0])
px=roots(XU.den{1});
zx=roots(XU.num{1});
figure(1)
rlocus(XU) %Lugar Geométrico de las Raíces
figure(2)
impz(XU),grid %Función Transferencia del carro 150T
figure(3)
```

```

subplot(1,2,1),margin(XU),grid %Gráficas de Bode
subplot(1,2,2),nyquist(XU),grid
% Proporcional
kp=31.45;
Cp=feedback(kp*XU,1)
figure(4)
impulse(Cp)
% Proporcional Derivativo
kd=6.779
Cpd=feedback(tf([kd kp],[1])*XU,1)
figure(5)
impulse(Cpd)
% Proporcional Integral Derivativo
ki=7.129
Cpid=feedback(tf([kd kp ki],[1 0])*XU,1)
figure(6)
impulse(Cpid)

```

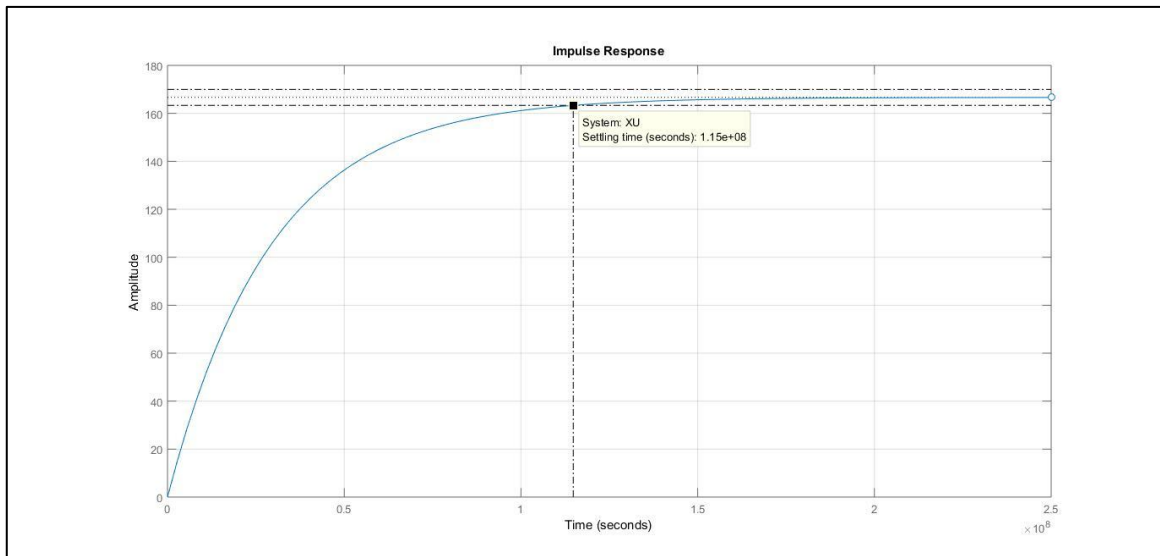


**Figura 1-4: Lugar geométrico de las raíces**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Comprobando las funciones de transferencia del sistema (Ecuación 14-3), se comprueba el lugar geométrico de las raíces, cuyos los resultados de la simulación se pueden observar en la Figura 1-4. Indicando gráficamente el lugar geométrico de las raíces que corresponde al carro testero del puente grúa; donde existen polos y ceros complejos conjugados cercanos al eje imaginario, por lo tanto, nos da a conocer que se está tratando con un sistema subamortiguado.

Simulando la función de transferencia del carro testero del puente grúa (Ecuación 14-3) con una entrada impulso para verificar su comportamiento, tenemos como resultado la siguiente figura:



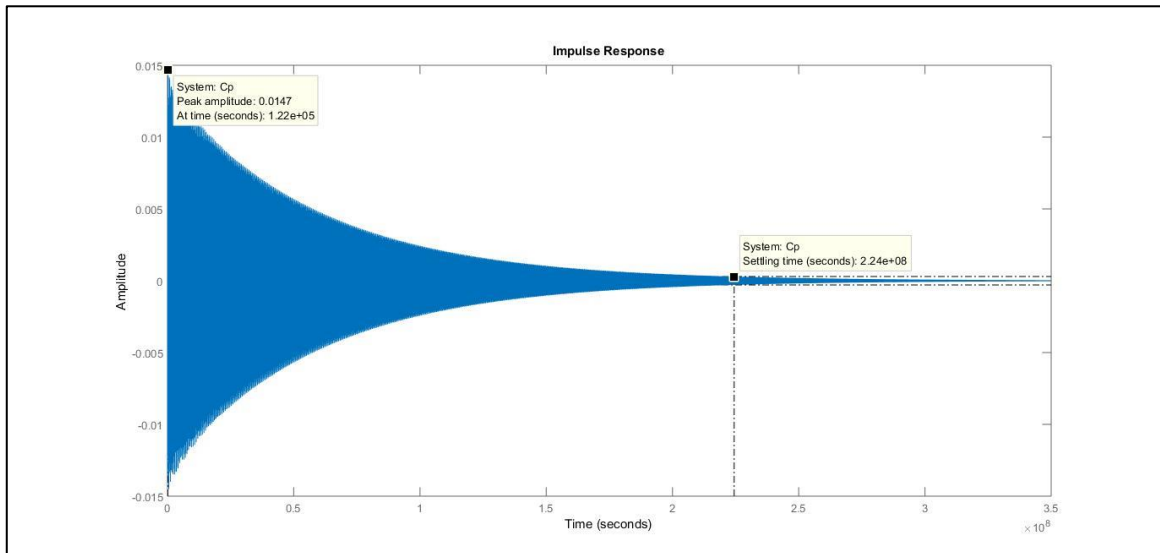
**Figura 2-4: Comportamiento del sistema ante una entrada impulso**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

El sistema no tiene oscilación ni tampoco un tiempo pico, con un tiempo de estabilización de  $1.15 \times 10^8$  segundos desde que se inicia su funcionamiento. A pesar de que el sistema no contiene un controlador, es estable sin oscilaciones con pérdidas normales por su uso. El diseño y la simulación del carro testero está basado con la carga máxima de diseño del carro que es de 150T.

En el diseño del controlador se mejora el tiempo de estabilización por lo que, a continuación, se especifica el diseño de cada controlador para el carro testero del puente grúa. La simulación del controlador proporcional obtenido en la Ecuación 16-3 se muestra en la Figura 3-4.





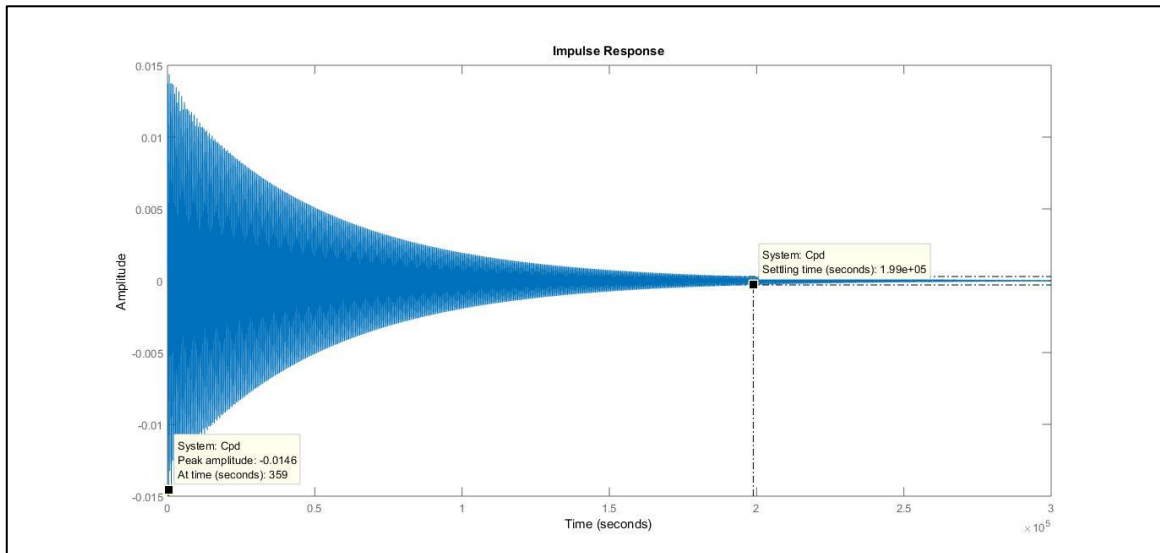
**Figura 3-4: Simulación del Controlador Proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Como se indica en la figura, la amplitud del error en estado estacionario del carro testero del puente grúa disminuye hasta llegar a 0. Sin embargo, se produce una respuesta oscilatoria en el funcionamiento del sistema, cuyo valor de la amplitud pico es de 0.0147 que es alcanzado a los  $1.22 \times 10^5$  segundos, siendo un valor cercano a 0 no excede el 30% de la sobreoscilación que es una consideración de diseño de controladores.

A pesar de que el valor de amplitud es pequeño; el tiempo de estabilización se incrementa a  $2.24 \times 10^8$  segundos, un valor superior al valor de estabilización normal del sistema, por lo tanto, el aumento de la robustez del controlador es necesaria para mejorar la respuesta del sistema.

En la Figura 4-4 se muestra la simulación del controlador proporcional derivativo (Ecuación 18-3). Con el aumento de la parte derivativa se mejora el tiempo de estabilización reduciéndolo a  $1.99 \times 10^5$  segundos; el valor de la amplitud pico del error es de -0.0146 alcanzado en los 359 segundos. Se conserva la amplitud del error, pero se mejora el tiempo de respuesta del sistema.

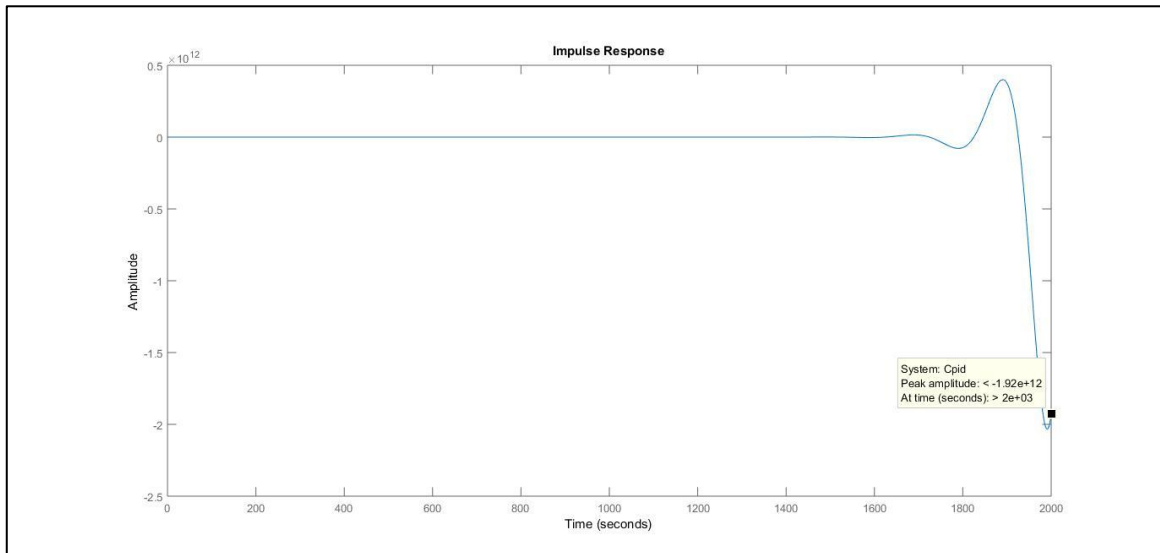


**Figura 4-4: Simulación del Controlador Proporcional Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

Con la intención de mejorar el controlador y con el objetivo de reducir e inclusive eliminar la amplitud del error; se incrementa la parte integral (Ecuación 20-3), obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5-4. Se muestra una mejora en la amplitud del error en estado estacionario, sin embargo, la gráfica indica que mientras más tiempo se encuentre funcionando el sistema, el error diverge teniendo una amplitud pico superior al 30% que es de  $-1.92 \times 10^{12}$  en el tiempo de  $2 \times 10^3$  segundos. La parte integral para mejorar el controlador, le da una estabilidad total temporal al sistema, sin embargo, después de un determinado tiempo, el sistema se vuelve más oscilatorio e inestable.

El error en estado estacionario es provocado en el momento en que se implementa la acción proporcional, sin embargo, al compensar con la acción integral el sistema se vuelve inestable, este comportamiento es peculiar cuando se trata de forzar a mejorar el sistema cuando sus componentes físicos no lo permiten.



**Figura 5-4: Simulación del Control Proporcional Integral Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

#### 4.1.2. Controlador del Gancho de 150T

En el caso del gancho de 150T se digitan las siguientes líneas de código en la ventana de comandos de Matlab. Para simular el comportamiento del gancho se obtienen datos usando las ecuaciones de las condiciones actuales de funcionamiento del gancho (Ecuación 21-3) y cuando se incrementa el controlador diseñado (Ecuación 24-3):

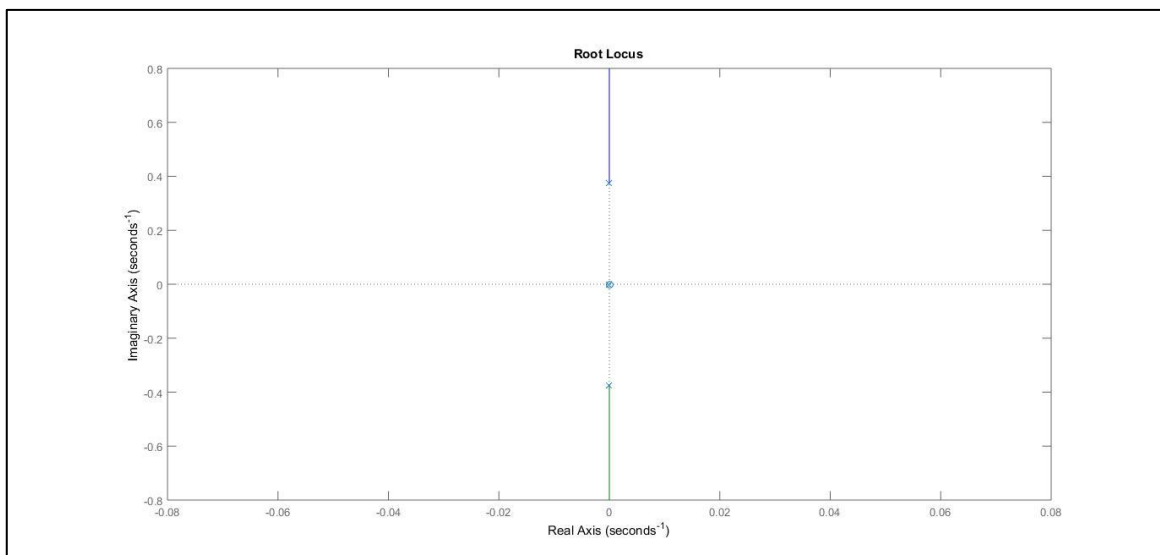
```
% Gancho Principal de 150t
clear all, clc, format short e
M=26000; %peso del carro
l=70; %longitud del cable
g=9.81; %gravedad
C=150000; %peso de la carga
fp=1; %coeficiente de fricción rotativa
fc=0.006; %coeficiente de fricción carro
j=(C*(l^2))/3; %momento de inercia
OU=tf([C*l 0 0],[(j+(C*(l^2))*(M+C)) (j+(C*(l^2)))*fc+((M+C)*fp)
(fp*fc)+(C*g*l*(M+C)) C*g*l*fc 0])
po=roots(OU.den{1});
zo=roots(OU.num{1});
figure(1)
rlocus(OU) %Lugar Geométrico de las Raíces
figure(2)
impz(OU),grid %Función Transferencia del carro 150T
figure(3)
subplot(1,2,1),margin(OU),grid %Gráficas de Bode
```

```

subplot(1,2,2),nyquist(OU),grid
% Proporcional
kp=5.6620;
Cp=feedback(kp*OU,1)
figure(4)
impulse(Cp)
% Proporcional Derivativo
kd=1.2036;
Cpd=feedback(tf([kd kp],[1])*OU,1)
figure(5)
impulse(Cpd)
% Proporcional Integral Derivativo
ki=1.2657;
Cpid=feedback(tf([kd kp ki],[1 0])*OU,1)
figure(6)
impulse(Cpid)

```

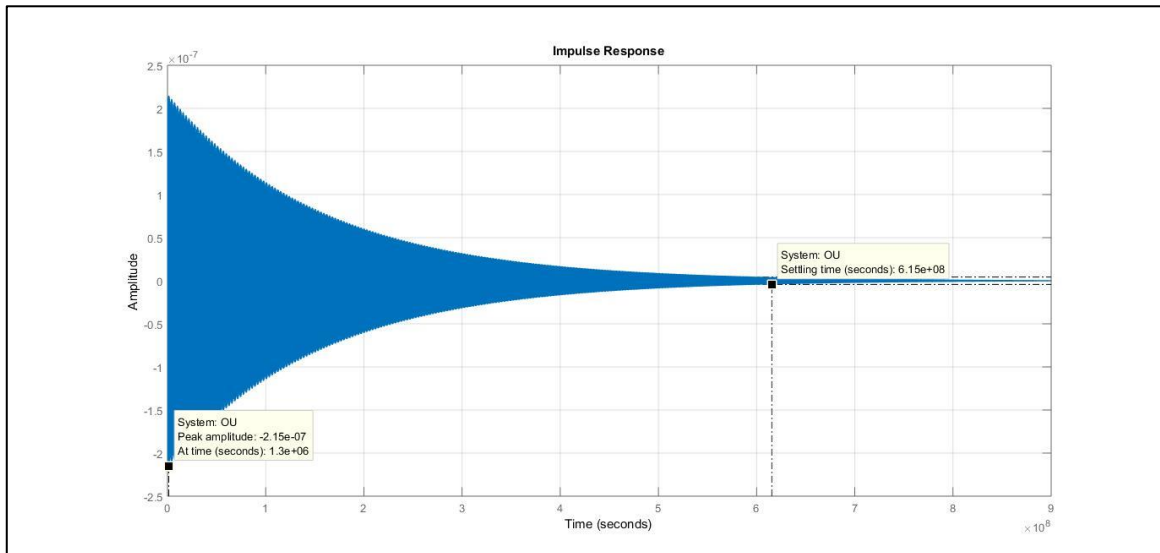
Comprobando la estabilidad del gancho de 150T, la simulación para comprobar el sistema empieza con el lugar geométrico de las raíces utilizando la Ecuación 22-3 que es la función de transferencia perteneciente al gancho del carro testero.



**Figura 6-4: Lugar geométrico de las raíces**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

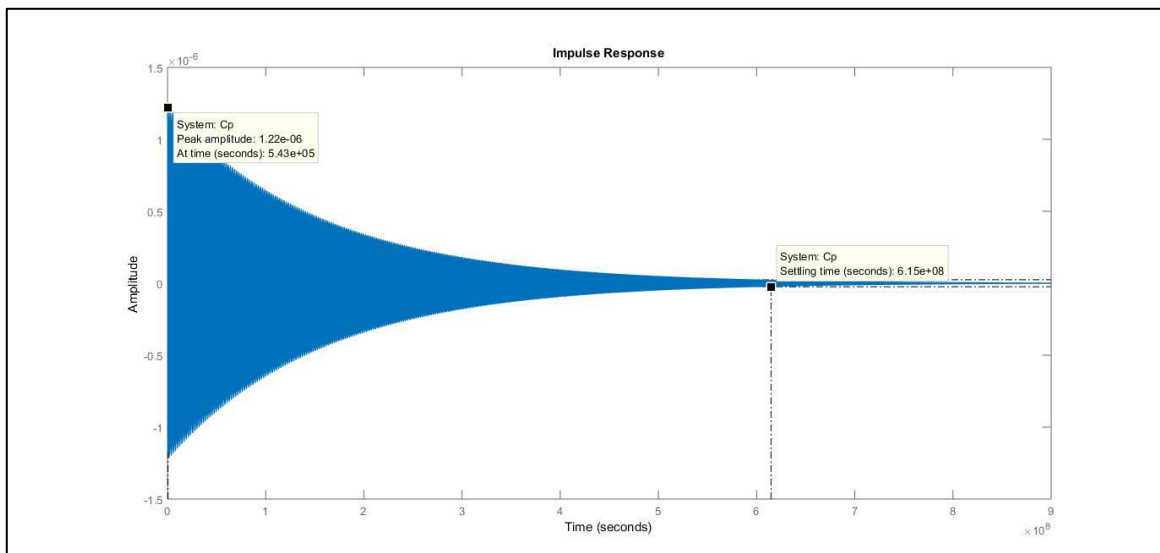
La Figura 6-4 muestra la posición de los polos y ceros, encontrándose cercanos al eje imaginario comprobando que se trata de un sistema subamortiguado. La simulación del sistema está hecha con la carga máxima para la cual está diseñada; al tratarse de un sistema estable se simula el comportamiento del sistema como se muestra en la Figura 7-4.



**Figura 7-4: Comportamiento del sistema ante una entrada impulso**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

La simulación de la función de transferencia del gancho de 150T ante una entrada impulso (Figura 7-4) nos indica que se trata de un sistema subamortiguado, sin embargo, la amplitud del error en estado estacionario del sistema es cercana a 0 con un valor máximo de  $-2.15 \times 10^{-7}$  en  $1.3 \times 10^6$  segundos, estabilizando la oscilación del sistema en  $6.15 \times 10^8$  segundos.



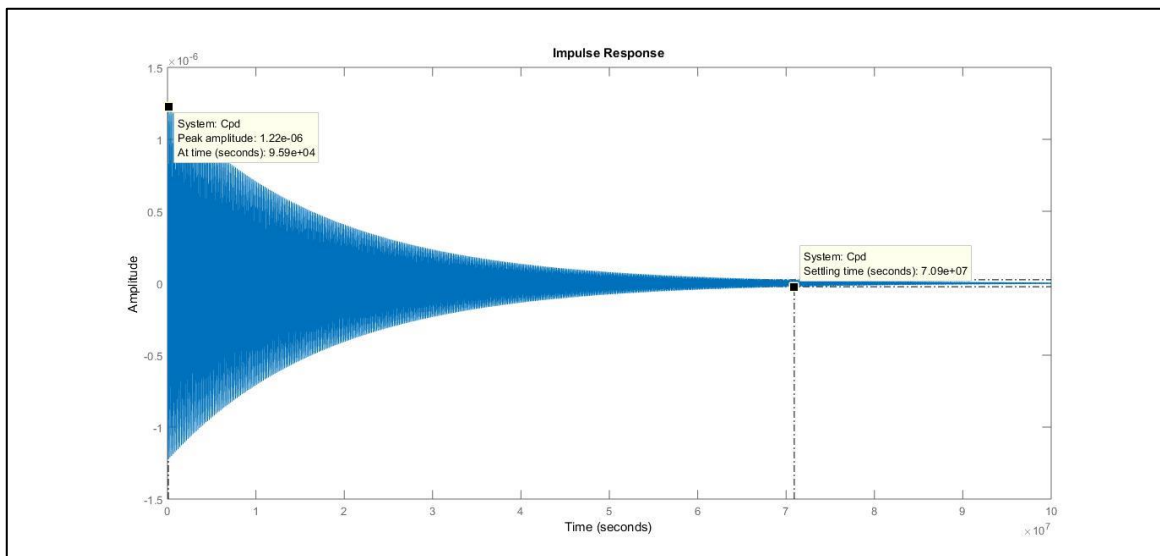
**Figura 8-4: Simulación del Controlador Proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

El sistema no necesita de un controlador debido a que su oscilación es mínima, sin embargo, para mejorar el comportamiento del sistema se implementa la acción proporcional como se muestra en la Figura 8-4.

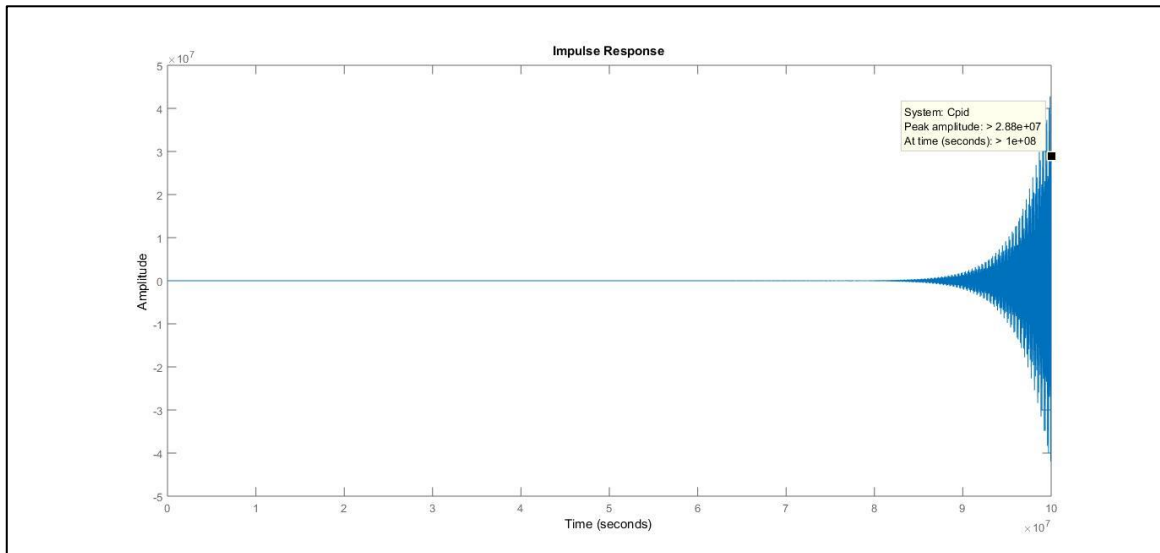
La implementación del control proporcional no fue suficiente para poder mejorar el sistema; la amplitud pico de la oscilación es de  $1.22 \times 10^{-6}$  a los  $5.43 \times 10^5$  segundos, con un tiempo de estabilización de  $6.15 \times 10^8$  segundos. Es necesario mejorar el controlador agregando la parte derivativa para mejorar el tiempo de estabilización del sistema, la Figura 9-4 muestra el resultado de la acción derivativa.

La implementación de la acción derivativa (Figura 9-4) provoca una mejora en el tiempo de estabilización del sistema en  $7.09 \times 10^7$  segundos, sin embargo, la amplitud del error se ve afectada a un valor pico de  $1.22 \times 10^{-6}$  en  $9.59 \times 10^4$  segundos. La mejora en los tiempos de comportamiento del sistema provoca que la amplitud pico incremente, sin embargo, el valor sigue siendo cercano a 0 por lo que la afección no es considerable.



**Figura 9-4: Simulación del Controlador Proporcional Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)



**Figura 10-4: Simulación del Control Proporcional Integral Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

La acción integral elimina completamente el error en estado estacionario, sin embargo, al aumentar la robustez del controlador, el sistema se vuelve inestable en un tiempo mayor a  $9 \times 10^7$  segundos con una amplitud pico de  $2.88 \times 10^7$ . Dicha amplitud es considerablemente grande por lo que el sistema se convierte completamente en inestable, perdiendo el control en su totalidad como se muestra en la Figura 10-4.

#### 4.1.3. Controlador del Gancho de 15T

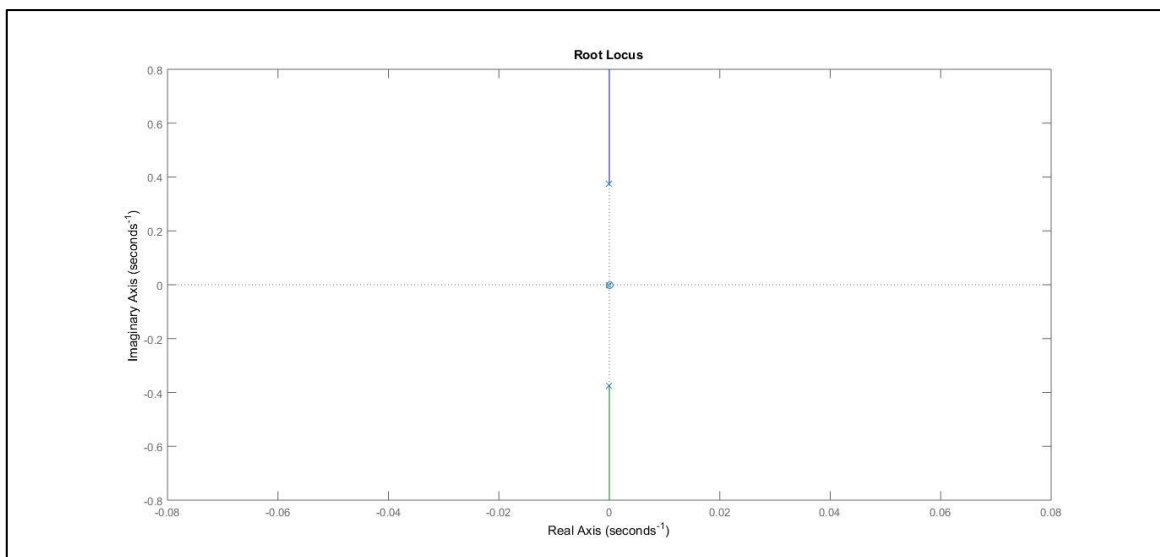
Al igual que para el gancho principal del puente grúa, se realiza la simulación de la función de transferencia (Ecuación 27-3) del gancho de 15T para comprobar la estabilidad del sistema; usando la ventana de comandos de Matlab se verifica el comportamiento del gancho en condiciones normales e incrementando el controlador (Ecuación 30-3):

```
% Gancho Auxiliar de 15t
clear all, clc, format short e
M=26000; %peso del carro
l=70; %longitud del cable
g=9.81; %gravedad
C=15000; %peso de la carga
fp=1; %coeficiente de fricción rotativa
```

```

fc=0.006; %coeficiente de fricción carro
j=(C*(1^2))/3; %momento de inercia
OU=tf([C*1 0 0],[(j+(C*(1^2))*(M+C)) (j+(C*(1^2)))*fc+((M+C)*fp)
(fp*fc)+(C*g*1*(M+C)) C*g*1*fc 0])
po=roots(OU.den{1});
zo=roots(OU.num{1});
figure(1)
rlocus(OU) %Lugar Geométrico de las Raíces
figure(2)
impz(OU),grid %Función Transferencia del carro 150T
figure(3)
subplot(1,2,1),margin(OU),grid %Gráficas de Bode
subplot(1,2,2),nyquist(OU),grid
% Proporcional
kp=5.6620;
Cp=feedback(kp*OU,1)
figure(4)
impz(Cp)
% Proporcional Derivativo
kd=1.2036;
Cpd=feedback(tf([kd kp],[1])*OU,1)
figure(5)
impz(Cpd)
% Proporcional Integral Derivativo
ki=1.2657;
Cpid=feedback(tf([kd kp ki],[1 0])*OU,1)
figure(6)
impz(Cpid)

```



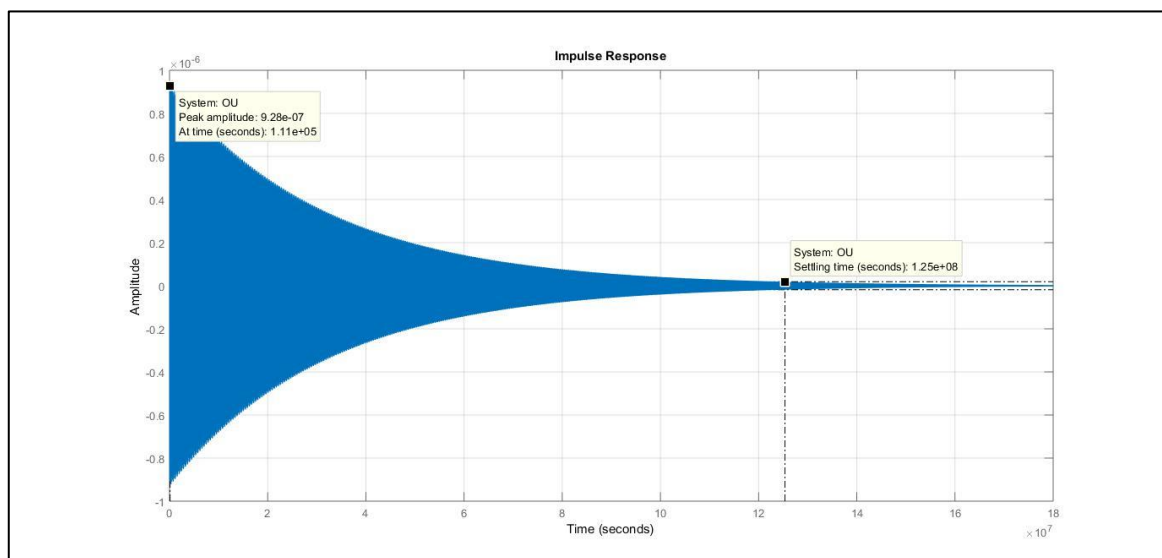
**Figura 11-4: Lugar geométrico de las raíces**

Realizado por: Ramos, H. (2016)



Los polos y ceros del sistema se encuentran cercanos al eje imaginario, por lo tanto, la Figura 11-4 nos indica que se trata de un sistema subamortiguado. El sistema es estable por lo que la simulación de la función de transferencia con una entrada tipo impulso es realizada para ver el comportamiento del sistema.

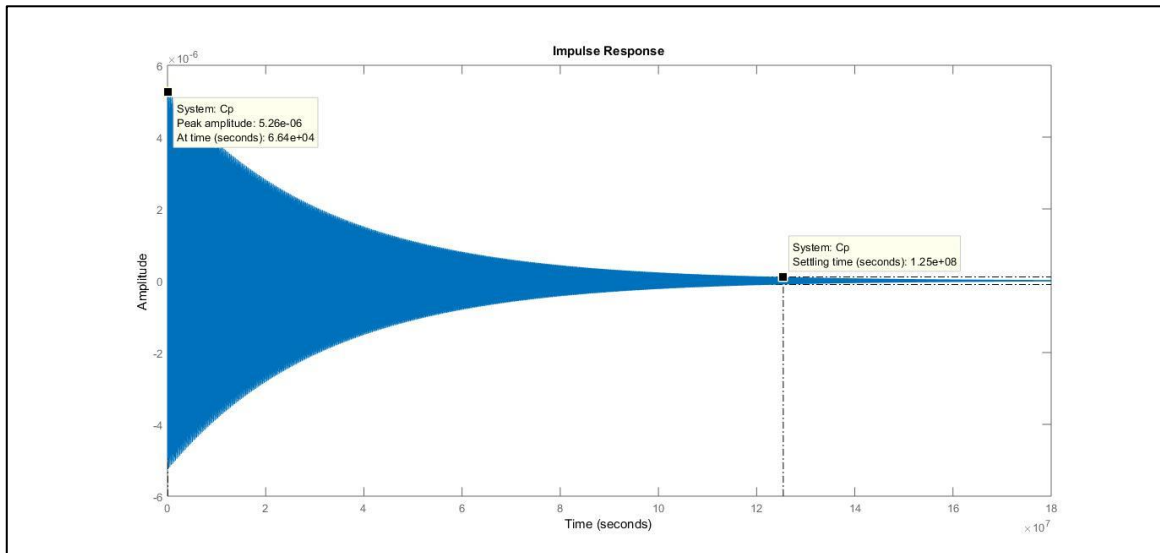
La Figura 12-4 muestra un sistema subamortiguado con una amplitud del error en estado estacionario de  $9.28 \times 10^{-7}$  en un tiempo de  $1.11 \times 10^5$  segundos y un tiempo de establecimiento en  $1.25 \times 10^8$  segundos. La amplitud del error tiene un valor muy pequeño cercano a 0 por lo que la oscilación no ocasiona afectaciones en el funcionamiento del sistema.



**Figura 12-4: Comportamiento del sistema ante una entrada impulso**

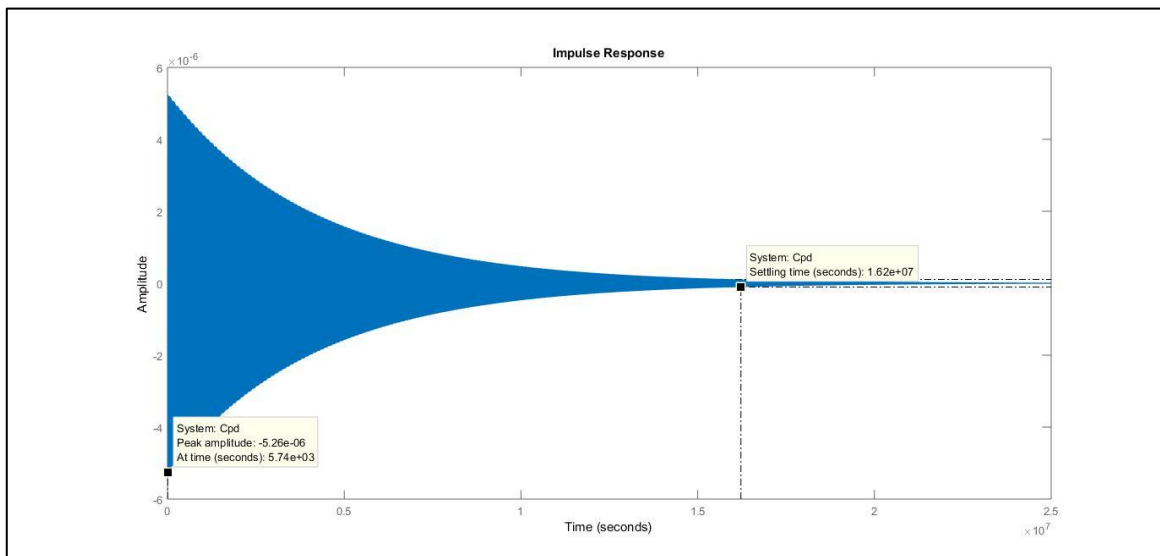
Realizado por: Ramos, H. (2016)

El control proporcional mejoró el tiempo del pico de la amplitud a  $6.64 \times 10^4$  segundos, pero aumentó el valor del error a  $5.26 \times 10^{-6}$  (Figura 13-4). Sin embargo, el valor de la amplitud al aplicar la acción proporcional es cercano a 0 por lo que la afección es mínima. Para mejorar el tiempo de estabilización con la acción proporcional,  $1.25 \times 10^8$  segundos, se aumenta la acción derivativa como se muestra en la Figura 14-4.



**Figura 13-4: Simulación Controlador Proporcional**

Realizado por: Ramos, H. (2016)



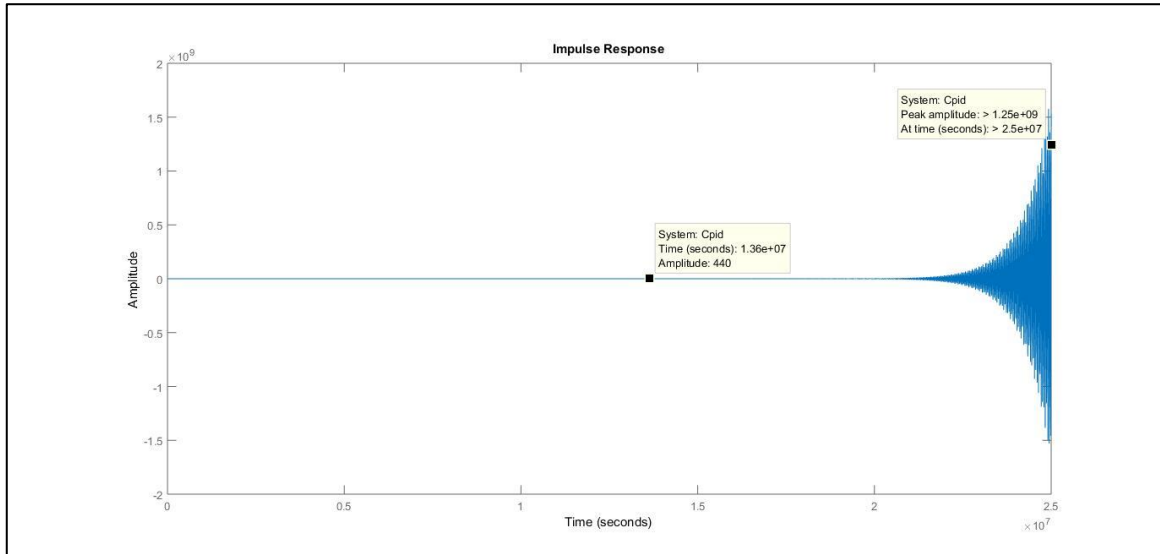
**Figura 14-4: Simulación Controlador Proporcional Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

La acción derivativa mejora el tiempo de respuesta de la estabilización del sistema a  $1.62 \times 10^7$  segundos y el pico de amplitud del error estacionario a  $-5.26 \times 10^{-6}$  en  $5.74 \times 10^3$  segundos. Con

las intenciones de eliminar el error se implementa la acción integral, los resultados se indican en la Figura 15-4.

La implementación de la acción proporcional al controlador elimina el error, sin embargo, el sistema se vuelve inestable en los  $1.36 \times 10^7$  segundos con una amplitud pico mayor a  $1.25 \times 10^9$ . El sistema se vuelve inconsistente por lo que la robustez que se aplica al controlador (incremento de la acción integral) no es la mejor opción para el sistema.



**Figura 15-4: Simulación del Controlador Proporcional Integral Derivativo**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

La simulación constata las mejoras de los controladores diseñados en los movimientos del carro testero y de los ganchos de 150 y 15T; en la tabla se especifica los valores obtenidos de la simulación realizada en el programa Matlab.

**Tabla 1-4: Valores obtenidos de la simulación de los sistemas**

	Condiciones normales		Controlador Proporcional		Controlador Proporcional Derivativo		Controlador Proporcional Integral Derivativo	
	Oscilación	Tiempo Estabilización	Oscilación	Tiempo Estabilización	Oscilación	Tiempo Estabilización	Oscilación	Tiempo Estabilización
Carro Testero		$1.15 \times 10^8$ seg	0.0147	$2.24 \times 10^8$ seg	0.0147	$1.99 \times 10^5$ seg	$1.92 \times 10^{12}$	$< 2 \times 10^3$ seg
Gancho de 150T	$2.15 \times 10^{-7}$	$6.15 \times 10^8$ seg	$1.22 \times 10^{-6}$	$6.15 \times 10^8$ seg	$1.22 \times 10^{-6}$	$7.09 \times 10^7$ seg	$2.88 \times 10^7$	$< 1 \times 10^8$ seg
Gancho de 15T	$9.28 \times 10^{-7}$	$1.25 \times 10^8$ seg	$5.26 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^8$ seg	$5.26 \times 10^{-6}$	$1.62 \times 10^7$ seg	$1.25 \times 10^9$	$< 1.36 \times 10^7$ seg

Realizado por: Ramos, H. (2016)

## 4.2. Resultados de Diseño de la Red Inalámbrica

### 4.2.1. Análisis de la señal transmitida

El diseño inalámbrico contiene la información necesaria para constatar su robustez, por lo que en el estudio el valor de la SNR es fundamental debido al sector industrial en el que se va a encontrar los equipos inalámbricos, es por ellos que, el ruido afecta directamente con el funcionamiento de la red, decayendo la señal de transmisión e inclusive distorsionándola.

El resultado de SNR es de 17,258dB, este valor demuestra que la afectación del ruido a la señal del transmisor no es considerable, se encuentra dentro del valor de una señal óptima de funcionamiento, como se indica la siguiente tabla:

**Tabla 2-4: Tipos de señal dependiendo del valor de SNR**

Valor SNR	Descripción
6dB o menos	Señal deficiente sin estabilidad, conexión imposible
Entre 7dB y 10dB	Señal inestable, conexión probable con problemas permanentes
Entre 11dB y 20dB	Señal óptima de comunicación
21dB o más	Señal excelente para completar la comunicación

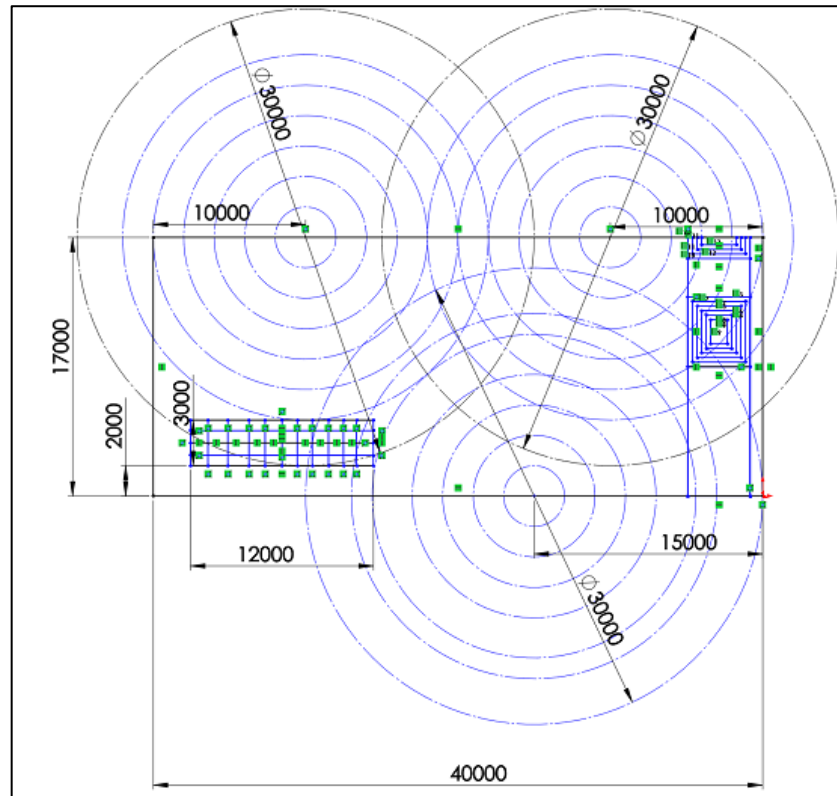
Fuente: FERRAN, 2015

La zona de Fresnel detalla el volumen que ocupa la señal en el espacio libre; este volumen es el que rodea al radio enlace directo entre el receptor y el transmisor. El valor de la zona de Fresnel debe ser máximo el 20% del primer radio de la zona. Teniendo un radio de 1,6626m en la primera zona, por lo tanto, el 20% tiene un valor de 0,3325m.

Al tener la zona de Fresnel un valor de 0,2712m, los obstáculos presentes en la red inalámbrica no dificultan la comunicación entre receptor y transmisor.

#### 4.2.2. Cobertura de la señal

Tomando como referencia los datos de fábrica del documento SIMATIC\_NET\_IKPI\_chap\_08\_Spanish\_2012 donde se encuentran la información de los equipos de comunicación inalámbrica de la marca Siemens. Los dispositivos inalámbricos que se ofertan tienen una cobertura de 30m de área de trabajo.



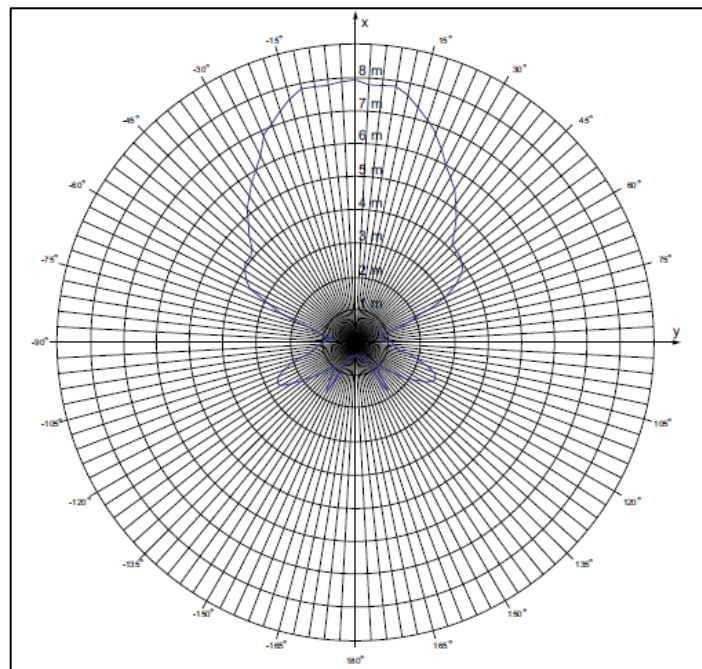
**Figura 16-4: Área de Cobertura de la Red Inalámbrica**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

La Figura 16-4 muestra la ubicación de los Access Point en el piso principal de casa de máquinas y el área de cobertura de los equipos; cada uno posee una antena omnidireccional para cubrir una mayor área y evitar las pérdidas de comunicación entre los dispositivos que controlan los movimientos del puente grúa. Cada arreglo de circunferencia representa la cobertura de 1 Access Point, es decir, indica la distancia del área de trabajo, que para este proyecto se ha optado por los dispositivos que ofrecen una cobertura de 30m. En el lado derecho de la figura se

encuentra el lugar donde reposa el puente grúa, la cobertura de la red abarca desde el punto inicial de trabajo de la máquina. En el lado inferior izquierdo de la figura se encuentran los reguladores de voltaje, equipos necesarios para el funcionamiento de las unidades generadoras, que inyectan voltaje al rotor del generador, por lo tanto, el área segura alrededor de los dispositivos es de 2 m para evitar accidentes laborales y problemas en los equipos. La red alcanza la distancia de seguridad de los reguladores de voltaje.

La señal enviada por el transmisor es lo suficientemente fuerte para poder ser captada por el receptor sin presentar inconvenientes en el funcionamiento, sin embargo, la señal del transmisor se atenúa dependiendo de la distancia que se encuentre el transmisor del área de cobertura del Access Point. Como referencia se toma los datos del equipo de Siemens SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2 (Figura 17-4).



**Figura 17-4: Área de cobertura del SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2**

Realizado por: SIEMENS. (2010)

La Figura 17-4 muestra el comportamiento de la señal del transmisor con una distancia máxima de alejamiento de 8 m del área de cobertura del receptor, por lo que, al excederse de esta distancia la señal se perdería y el receptor no podría captar ningún mando enviado por el transmisor.

Estas consideraciones son necesarias para la ubicación y la manipulación de los equipos en un ambiente industrial con las condiciones como se presenta en el piso principal de casa de máquinas de la Central Agoyan.

#### **4.2.3. Selección de Equipos Inalámbricos**

Las características mencionadas en el capítulo 3 son la base para la selección de los equipos, sin embargo, para el diseño es necesario conocer las características propias del transmisor y del receptor, de tal manera que las propiedades del equipo cubran con las especificaciones obtenidas en el cálculo; consiguiendo que la red inalámbrica mantenga su área de cobertura además de su confiabilidad y funcionamiento.

Recopilando la información de fabricantes de equipos industriales, existen equipos que cubren con las características para instalar la red, estos dispositivos contienen las siguientes características:

##### Datos del Transmisor

- Rangos de Frecuencia: 5180 MHz a 5835 MHz, 2412 MHz a 2484 MHz
- Ancho de Banda 5GHz: 17dBm
- Ancho de Banda 2,4 GHz: 20 dBm
- Impedancia: 50  $\Omega$
- Cobertura: 8 m

##### Datos del Receptor

- Longitud máxima de cableado: 55 m
- Rangos de Frecuencia: 2412 MHz a 2480 MHz, 4920 MHz a 5820 MHz

#### **4.3. Comprobación de Hipótesis**

El coeficiente de correlación de Pearson es un estadígrafo pensado para medir el grado de asociación de las variables cuantitativas con una escala mínima de intervalos, que busca

identificar una relación lineal entre variables. La relación lineal significa que puede existir variables fuertemente asociadas.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución y de fácil interpretación debido a que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1.

**Tabla 3-4: Cálculo de la Correlación de Pearson**

Opciones de las variables	x (Tiempo de Estabilización en Condiciones Normales)	y (Tiempo de Estabilización Incrementado Controlador)	(x <sup>1</sup> =x-xm)	(y <sup>1</sup> =y-ym)	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	x*y
Carro Testero	115000000	199000	-170000000	-28900666,67	2,89E+16	8,35249E+14	4,91311E+15
Gancho de 150T	615000000	70900000	330000000	41800333,33	1,089E+17	1,74727E+15	1,37941E+16
Gancho de 15T	125000000	16200000	-160000000	-12899666,67	2,56E+16	1,66401E+14	2,06395E+15
Sumatoria			0	0	1,634E+17	2,74892E+15	2,07712E+16
Media	285000000	29099666,67					

Realizado por: Ramos, H. (2016)

En la tabla se encuentran los datos obtenidos de la simulación del comportamiento del carro testero y de los ganchos de 150 y 15T. Valores cuya unidad de medida están dados en segundos. Cálculo de la correlación de Pearson:

$$r = \frac{\sum x * y}{\sqrt{(\sum x^2 * \sum y^2)}}$$

Donde:

r = Coeficiente de correlación de Pearson

x =Variable Independiente Ajustada

y =Variable Dependiente Ajustada

Reemplazando valores:

$$r = \frac{\sum x * y}{\sqrt{(\sum x^2 * \sum y^2)}}$$

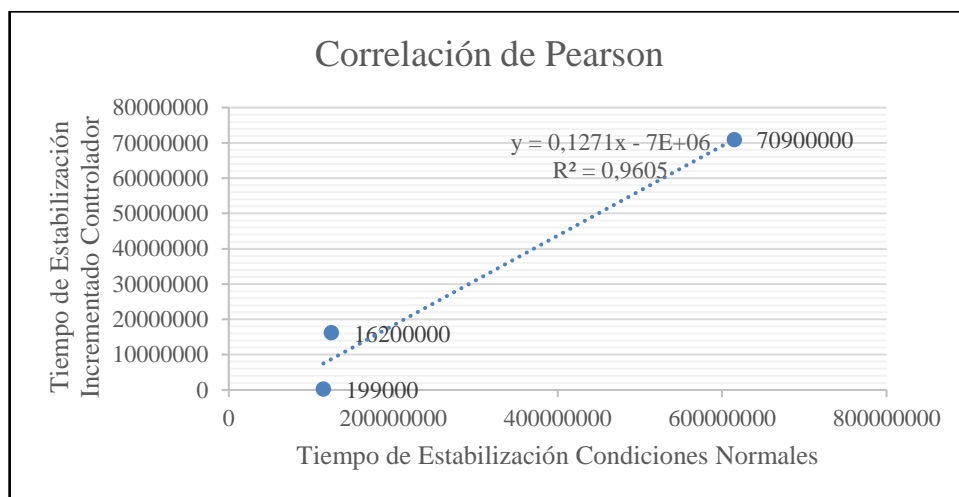
$$r = \frac{2,07712E + 16}{\sqrt{(1,634E + 17 * 2,74892E + 15)}}$$

$$r = 0,980063143$$



El índice de correlación de Pearson arroja un valor de 0,980063143 que significa el grado de asociación de las variables de objeto de estudio es una correlación de signo positivo y casi perfecta, es decir, a través del controlador por cada segundo que se optimice el tiempo de estabilización tanto del carro testero como de los ganchos de 150 y de 15T mejoran su comportamiento en un 98.006343% de segundo.

Demostrando así que existe una mejora en los tiempos de estabilización del carro testero y de los ganchos de 150 y 15T, debido a la aplicación del controlador. Por lo tanto, se acepta la hipótesis alternativa: El diseño de un algoritmo de control utilizando redes inalámbricas para el control en conjunto del Puente Grúa de Casa de Máquinas de CELEC EP UNIDAD DE NEGOCIO HIDROAGOYAN CENTRAL AGOYAN, mejora la precisión de los movimientos en maniobras de transporte, montaje y desmontaje de las unidades generadoras de electricidad.



**Figura 18-4: Comprobación Gráfica de la Correlación de Pearson**

Realizado por: Ramos, H. (2016)

## CONCLUSIONES

- El puente grúa de casa de máquinas es controlado por equipos electromecánicos que permite realizar los movimientos de montaje, desmontaje y traslación de partes industriales. Con el control actual, el comportamiento del carro testero tiene un tiempo de estabilización de  $1,15 \times 10^8$  seg con carga máxima de diseño. El gancho de 150 y 15T tiene una oscilación normal debido a que para evitar el pandeo es necesario que se encuentren centradas con un ángulo de desviación de  $0^\circ$ , por lo tanto, el gancho de 150T tiene una oscilación de amplitud  $-2,15 \times 10^{-7}$  y un tiempo de estabilización de  $6,15 \times 10^8$  seg; mientras que el gancho de 15T tiene una oscilación de amplitud de  $9,28 \times 10^{-7}$  y cuenta con un tiempo de estabilización de  $1,25 \times 10^8$  seg.

El regulador diseñado para el carro y los ganchos mejora el tiempo de establecimiento y afecta la amplitud del pico de oscilación. En el caso del carro testero lo convierte en un sistema subamortiguado con una respuesta oscilatoria cuya amplitud pico es de  $-0,0146$  y un tiempo de estabilización de  $1,99 \times 10^5$  seg con la carga máxima de diseño. Los ganchos al ser sistemas subamortiguados, la amplitud pico de oscilación varía; en el caso del gancho de 150T la amplitud tiene un valor de  $1,22 \times 10^{-6}$  con un tiempo de estabilización de  $7,09 \times 10^7$  seg. De la misma forma el controlador diseñado para el gancho de 15T provoca en el sistema una amplitud pico de  $-5,26 \times 10^{-6}$  y un tiempo de  $1,62 \times 10^7$  seg.

La mejora del tiempo de estabilización es notable tanto en el carro testero como en los ganchos, mejorando el comportamiento de los sistemas subamortiguados, además, el incremento en la amplitud del pico de oscilación es mínimo por su valor cercano a 0 lo que significa una afectación mínima e imperceptible.

- Para la simulación del algoritmo de control se toma el modelo matemático del puente grúa. Las funciones de transferencia obtenidas están relacionadas con las variables de desplazamiento del carro testero, el ángulo de pandeo de los ganchos y la señal de entrada del controlador.

La simulación del control actual del puente grúa es necesaria para conocer la condición con la que está trabajando la máquina, obteniendo como resultado un sistema subamortiguado con un tiempo de estabilización de  $1,15 \times 10^8$  seg. En el caso de los ganchos de 150 y 15T

también se tratan de sistemas subamortiguados con respuestas oscilatorias con una amplitud en el pico más alto de oscilación de  $-2,15 \times 10^{-7}$  y  $9,28 \times 10^{-7}$  respectivamente. El controlador diseñado tiene un nivel de robustez capaz de mejorar los sistemas sin afectarlo ni volverlo inestable.

Al incrementar la acción proporcional al controlador incrementa la robustez del sistema ante las perturbaciones externas. En el caso del carro testero la acción proporcional cambia al sistema críticamente amortiguado por un subamortiguado con una respuesta oscilatoria con un valor pico de 0,0147. Por su parte los ganchos de 150 y 15T también son sistemas subamortiguados con una amplitud pico de  $1,22 \times 10^{-6}$  y  $5,26 \times 10^{-6}$  respectivamente.

Aumentando la parte derivativa al controlador mejora el tiempo de estabilización de la respuesta oscilatoria; el carro testero tiende a estabilizarse en  $1,99 \times 10^5$  seg, los ganchos de 150 y 15T se estabilizan en  $7,09 \times 10^7$  y  $1,62 \times 10^7$  seg respectivamente. En este punto el controlador es un proporcional derivativo proveyéndole de robustez y mejoramiento en el tiempo de estabilización del sistema.

Adicionando la acción integral al controlador PD se elimina el error en estado estacionario, es decir, se elimina el pico de la respuesta oscilatoria, sin embargo, para el carro testero, los ganchos de 150 y 15T los vuelve sistemas inestables, poco confiables con valores de oscilación pico de  $1,92 \times 10^{12}$ ,  $2,88 \times 10^7$  y  $1,25 \times 10^9$  respectivamente. En este caso el controlador no necesita la acción integral, el regulador es lo suficientemente robusto con la acción proporcional y derivativa.

- El área de operación del puente grúa se encuentra en el piso principal de casa de máquinas de la central Agoyán, 17x40 m. Para manipular el puente sin estar en la cabina de mando se encuentra la botonera conectada y sujeta a la estructura del puente grúa. La longitud que tiene el cable conectado a la botonera es lo que define el área de la movilidad del operador del puente grúa.

La conexión inalámbrica provee de mayor movilidad en el área de operación ya que no existen cables de por medio. Los actuales equipos inalámbricos están diseñados con una robustez capaz de soportar los ambientes industriales. Tomando como referencia un transmisor inalámbrico de la marca Siemens, SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2, ofrece una señal de transmisión de 20dBm con un campo de cobertura de 8 m. Mientras

mayor sea la distancia del transmisor con respecto al área que abarca el receptor la señal tiende a debilitarse.

Durante el tiempo que el puente grúa se encuentre en operación la señal desde el transmisor al receptor se mantiene constante. El incremento de una antena exterior al receptor, aporta con 3dBi a la cobertura del equipo, es decir, repotencia al doble el área que cubre el receptor.

- Casa de máquinas de la central Agoyán tiene un nivel de ruido alrededor de 100 dB, ocasionado por las unidades generadoras de energía; en el piso principal el nivel de ruido varía de 70 a 80 dB. El valor de SNR (relación señal ruido) establece que la afectación de la señal enviada por el transmisor en presencia del ruido no es en gran escala. Tomando como referencia el equipo SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2 que tiene una potencia máxima de transmisión de señal equivalente a 20dBm. El valor de SNR con presencia de ruido de 81dB es igual a 17dBm, el resultado está dentro del rango considerado como una señal óptima de comunicación.

Al ser el aire el medio de comunicación existe la probabilidad de la presencia de obstáculos. Calculando la Zona de Fresnel y tomando la distancia máxima y mínima a la que el transmisor móvil se puede encontrar, tenemos una señal con una propagación de radio de 0,2712 m correspondiente al elipsoide que se forma entre la antena del receptor y del transmisor. La primera Zona de Fresnel cuyo valor es de 1,6626 m define la altura apropiada a la que deben estar los equipos y mantener una transmisión sin ángulos de desviación sin atenuar la señal.

## RECOMENDACIONES

- El cambio de la tecnología es ineludible ya que la mayoría de los equipos, que forman parte del control del puente grúa, tienen repuestos de difícil adquisición o ya no se fabrican.
- Los resultados matemáticos son la base del diseño, sin embargo, analizar la estabilidad de la función de transferencia comprueba que se ha realizado el modelo matemático correctamente.
- En el piso principal existen reguladores de tensión que son necesarios para el funcionamiento de las unidades generadoras, por lo que los equipos de la red se diseñan al lado contrario a la ubicación de los reguladores para evitar interferencias.
- Dentro de las características físicas del transmisor debe tomarse en cuenta que no sea muy pesado para su fácil transportación y uso por parte del operario encargado de la manipulación del puente grúa.

## BIBLIOGRAFÍA

**ADDISON, B.** (2007). Síntesis de Controladores con Compensación AW y desempeño en H2-H. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 30(3), pp. 263-272.

**ALFONSI, A., & PÉREZ, J.** (2009). Modelo y Control Asistido por Computadora de un Sistema Industrial. Caso: Planta Piloto Compacta-UCV. Univesidad, Ciencia y Tecnología, 13(50), pp. 43-50.

**ÁLVAREZ, C., SOTO, A., & WATKINS, F.** (2009). Simulación de Controladores Digitales. Ingeniere, Revista chilena de ingeniería, 17(3), pp. 309-316.

**FERRAN, M. S.** (2015). ADSL Ayuda Comunidad de Banda Ancha. [En Línea]

Obtenido de:

[http://www.adslayuda.com/generico-ruido\\_atenuacion.html](http://www.adslayuda.com/generico-ruido_atenuacion.html)

**GARCÍA, R., CLOTET, R., ZAMBRANO, A., GILBERT, L., HUERTA, M., & DE ANDRADE, M.** (junio de 2010). Diseño de una Red Inalámbrica para aplicaciones de Telemedicina. Universidad, Ciencia y Tecnología, 14(55), pp. 109-118.

**HURTADO, L., & VILLAREAL, L.** (2010). Control Robusto de un Sistema Mecánico simple mediante una herramienta gráfica. Dyna, pp. 214-223.

**LOZANO-VALENCIA, L. F., RODRÍGUEZ-GARCÍA, L. F., & GIRALDO-BUITRAGO, D.** (2012). Diseño, Validación e Implementación de un Controlador PID Autosintonizado. Tecnológicas, 28, pp. 33-53.

**MONSALVE POSADA, J. F., ARIAS LONDOÑO, A., & MEJÍA ARANGO, J. G.** (2015). Desempeño de redes inalámbricas y redes industriales inalámbricas en procesos de control en tiempo real bajo ambientes industriales. TecnoLógicas, 18(34), pp. 87-99.

**NISE, N. S.** (2002). Sistemas de Control para Ingeniería. México: CONTINENTAL, pp. 37-838.

**OGATA, K.** (2010). Ingeniería de Control Moderna. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A., pp. 13-818.

**RAIRÁN-ANTOLINES, J. D., & FONSECA-GÓMEZ, J. M.** (2011). Doble Lazo de Control para Regular la Posición y la Velocidad en un Motor de Corriente Directa. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 15(2), pp. 337-357.

**RAIRÁN-ANTOLINES, J. D., GUERRERO-CIFUENTES, C. E., & MATEUS-PINEDA, J. A.** (2010). Diseño de Controladores de tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) y Difuso para la Posición de un Motor de Corriente Continua (DC). Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 14(1), pp. 137-160.

**RUGE-RUGE, I. A.** (2011). Optimización de Señal de Control en Reguladores PID con Arquitectura Antireset Wind-Up. Tecnura, 15(30), pp. 24-31.

**SIEMENS.** (2010). SIMATIC MOBIL PANEL 277f-iwlan-v2\_2010-10. Recuperado el 10 del 2016, de Profinet: <https://mall.industry.siemens.com>

**SIEMENS.** (2012). SIMATIC\_NET\_IKPI\_chap\_08\_Spanish\_2012. Recuperado el 02 del 2017, de Profinet: <https://mall.industry.siemens.com>

**SMITH, C. A., & CORRIPIO, A. B.** (1991). Control Automático de Procesos. México: LIMUSA, pp. 17-609.

**TANENBAUM, A. S., & WETHERALL, D. J.** (2012). Redes de Computadoras. México: PEARSON, pp. 15-745.